

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В Е С Т Н И К

**ЛУГАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 11
2023**

**VII научно-техническая конференция
«АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД»**

27 ноября – 2 декабря 2023 года

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Луганск 2023

ВЕСТНИК

ЛУГАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

№ 11 2023

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ОСНОВАН В 2015 ГОДУ
ВХОДИТ В БАЗУ
РИНЦ

ОСНОВАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО

«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации,
печати и массовых коммуникаций
Серия № ПИ 000170 от 19 января 2021 г.

Свидетельство о государственной регистрации
Издателя, изготовителя и распространителя средства
массовой информации
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015г.

Журнал включен в перечень научных изданий ВАК ЛНР (Приказ № 8-ОД от 8.01.19) в котором могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата физико-математических, химических, технических, экономических, исторических, философских, филологических, юридических, педагогических, психологических, социологических наук.

ISSN 2522-4905

Главная редакционная коллегия :

Рябичев В.Д., докт. техн. наук, (главный редактор),
Гутько Ю.И., докт. техн. наук, (зам. главн. редактора),
Витренко В.А., докт. техн. наук (зам. главн. редактора),
Авершин А.А., канд. психол. наук,
Андрійчук Н.Д., докт. техн. наук,
Атоян А.И., докт. филос. наук,
Белых А.С., докт. пед. наук,
Бельдюгин В.А., канд. ист. наук,
Болдырев К.А., докт. экон. наук,
Будиков Л.Я., докт. техн. наук,
Губачева Л.А., докт. техн. наук,
Дейнека И.Г., докт. техн. наук,
Дрозд Г.Я., докт. техн. наук,
Ерошин С.С., докт. техн. наук,
Замота Т.Н., докт. техн. наук,
Исаев В.Д., докт. филос. наук,
Клименко А.С., докт. филол. наук,
Кривоколыско С.Г., докт. хим. наук,
Крохмалева Е.Г., канд. пед. наук,
Корсунов К.А., докт. техн. наук,
Лазор В.В., докт. юридич. наук,
Лазор Л.И., докт. юридич. наук,
Лустенко А.Ю., докт. филос. наук,

Ляпин В.П., докт. биол. наук,
Максимова Т.С., докт. экон. наук,
Максимов В.В., докт. экон. наук,
Мечетный Ю.Н., докт. мед. наук,
Мирошников В.В., докт. техн. наук,
Мортиков В.В., докт. экон. наук,
Нечаев Г.И., докт. техн. наук,
Панайотов К.К., канд. техн. наук,
Родионов А.В., докт. экон. наук,
Рябичева Л.А., докт. техн. наук,
Салита С.В., докт. экон. наук,
Санжаров С.Н., докт. ист. наук,
Свиридова Н.Д., докт. экон. наук,
Сёмин Д.А., докт. техн. наук,
Скляр П.П., докт. психол. наук,
Тарарычкин И.А., докт. техн. наук,
Тисунова В.Н., докт. экон. наук,
Утутов Н.Л., докт. техн. наук,
Фесенко Ю.П., докт. филол. наук,
Харьковский Р.Г., канд. ист. наук,
Шамшина И.И., докт. юридич. наук,
Шелото В.М., докт. филос. наук,
Яковенко В.В., докт. техн. наук

Ответственный за выпуск: Сёмин Д.А.

Рекомендовано в печать Ученым советом Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
(Протокол № 1 от 13.09.2023 г.)

Материалы номера печатаются на языке оригинала.

VESTNIK

LUGANSK
VLADIMIR DAHL
STATE UNIVERSITY

№ 11 2023

THE SCIENTIFIC JOURNAL
WAS FOUNDED IN 2015
INCLUDED INTO THE BASE OF
RISC

FOUNDER

LSU NAMED AFTER V. DAHL

Journal is registered by the Ministry of Information,
Publishing and Mass Communications
Series № PI 000170 of January, 19 2021

State Registration Certificate of Publisher, Producer
and Distributor of means of mass information

MI-SRG ID 000003 of November, 20 2015

С О Д Е Р Ж А Н И Е

О ДВУХ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ	
Агаханов Э. К., Алибеков А. К., Джабраилов А. З.-----	9
ПОИСК ЭКОНОМИЧНОГО ВАРИАНТА ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ С ЛУПИНГОМ И ВСТАВКОЙ	
Алибеков А. К., Агаханов Э. К.-----	14
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДА ДЛЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА	
Батурин А. А., Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Гойдо М. Е., Талалушкин Е. В. -----	18
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАДИАЛЬНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ШПИНДЕЛЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА	
Брешев В. Е. -----	25
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ С КАСКАДНЫМ СЖАТИЕМ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ	
Брянцев М. А., Данилейченко А. А., Ковтун А. С., Доценко Д. М.-----	30
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА	
Бугаенко В. В., Гусенцова Я. А., Красногрудов А. В., Кочнева О. В.-----	35
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ	
Капустин Д. А., Кущенко А. В., Швыров В. В., Сентяй Р. Н. -----	40
УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУЙНОГО НАСОСА-СМЕСИТЕЛЯ	
Квенцель А. Л., Ремень В. И. -----	46
МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ЭРЛИФТА И ЕЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ	
Кононенко А. П., Божко Р. И., Миронычев И. И. -----	56
ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫХОДНОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО КЛАПАНА СОЛЕНОИДНОГО ТИПА	
Мальцев Я. И., Мальцева М. О., Суворова Е. Ю.-----	62
АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО ТЕЧЕНИИ ПО ТРУБОПРОВОДУ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ	
Сентяй Р. Н., Капустин Д. А., Гутько Ю. И., Швыров В. В.-----	68
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ	
Сёмин Д. А., Нечаев Г. И., Левашов Я. Н., Михайличенко А. А. -----	75
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ЕЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВИХРЕКАМЕРНЫМ НАГНЕТАТЕЛЕМ	
Сёмин Д. А., Левашов А. Н., Ковалевский Д. С.-----	81

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВИХРЕВЫХ КЛАПАНОВ С ДИФфуЗОРНЫМИ ВЫХОДНЫМИ КАНАЛАМИ Сёмин Д. А., Левашов Я. Н., Левашов А. Н., Серых А. В. -----	85
АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н. -----	91
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПНЕВМАТИКИ Сулига С. В. -----	94
ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ С ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ Турушина Н. В., Жарский Н. И. -----	99
УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ВЫСКОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ Тырловой С. И., Костенко А. В., Чудной А. А. -----	102
ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА Чебан В. Г. -----	106
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА ГАЗИФИКАЦИИ ГРАФИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ Чижевская Д. Ю., Никитин Ю. Н., Шабрацкий С. В. -----	110
ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУКИ	
ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЭЛЕКТРОННЫХ, НАНОЭЛЕКТРОННЫХ, ОПТИЧЕСКИХ И КВАНТОВЫХ ЦЕПЯХ Бобровский Г. А. -----	115
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ЗАГОТОВКУ ПРИ ТОЧЕНИИ С НАГРЕВОМ Гаврыш В. С. -----	142
РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕРМОЗАЩИТНОГО ПАКЕТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ Дейнека И. Г., Соболева Н. С. -----	145
АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИМ ИГРАМ В КОНТЕКСТЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ Клипаков С. А., Таращанский М. Т. -----	149
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА Корсунов К. А., Лыштван Е. Ю., Харченко Е. И., Чаленко А. В. -----	152
ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ РЕЧЕВОГО ЭТИКЕТА В АНГЛОЯЗЫЧНЫХ СТРАНАХ Костина В. С., Лучко А. М. -----	158

ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОДХОД КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ-ФИЗИКОВ Корсунов К. А., Харченко Е. И., Чаленко А. В. -----	162
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕШЕХОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ В ОБЩЕЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ Пассажира С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СЛЕДА Лучко М. И. -----	167
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТУДЕНТА ВУЗА Лыштван Е. Ю., Каменев С. А., Воробьев С. Г. -----	172
АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА Малахова В. В., Малахов О. В. -----	177
РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА Мелёхина А. В. -----	180
ОТДЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СУЩНОСТИ, НАЗНАЧЕНИИ И ПРИМЕНЕНИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКАХ МЕТОДА ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНОЙ АБРАЗИВНОЙ СРЕДОЙ Мицык В. Я., Покинтелица Н. И., Чесноков А. В. -----	184
К ВОПРОСУ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВОГО ГАЗА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОТ РЕЖИМОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕМЕНТАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10(6) КВ ГУП ЛНР «РЕСПУБЛИКАНСКАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ» РОССИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ Парсентьев О. С. -----	192
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРА-ОПЕРАТОРА ЧПУ Перевозчиков В. А. -----	235
КВАЗИЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Половинка Д. В., Ивлев М. Н., Рублева Ю. В. -----	239
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ, ЕЕ СУЩНОСТЬ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ Протасов В. В., Черняева О. В., Черняев А. В. -----	246
ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕЦИАЛА РЕГИОНА НА ПРИМЕРЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ Протасов В. В., Таран А. А. -----	251
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ КАК УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ Протасов В. В., Черныш Л. Н., Шевченко Я. С. -----	256
РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРИТА ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОСТОГО УДАРНОГО КРАТЕРА Саркисов А. А., Чаленко А. В. -----	261

CONTENTS

ABOUT TWO EQUIVALENCES ULTIMATE STRESS STATE OF SOILS <i>Agakhanov E. K., Alibekov A. K., Dzhabrailov A. Z.</i> -----	9
FINDING AN ECONOMICAL OPTION FROM PIPELINES WITH LOOPING AND INSERTION <i>Alibekov A. K., Agakhanov E. K.</i> -----	14
ELECTROHYDRAULIC CONTROL SYSTEM OF THE BENCH FOR FULL-SCALE TESTING OF LARGE DIAMETER PIPES <i>Baturin A. A., Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Goydo M. E., Talalushkin E. V.</i> -----	18
COMPUTATIONAL COMPUTER EXPERIMENTS IN RESEARCH OF RADIAL GAS-STATIC SUPPORTS OF A GRINDING MACHINE SPINDLE <i>Breshev V. E.</i> -----	25
DEFINING THE PARAMETERS OF A MOTOR WITH CASCADE FLUID COMPRESSION <i>Bryantsev M. A., Danileychenko A. A., Kovtun A. S., Dotsenko D. M.</i> -----	30
ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF METHODS FOR REGULATING THE SPEED OF THE OUTPUT LINK OF A VOLUMETRIC HYDRAULIC DRIVE <i>Bugaenko V., Gusentsova Ya., Krasnogradov A., Kochneva O.</i> -----	35
NUMERICAL METHODS FOR DETERMINING PRESSURE LOSS DURING THE FLOW OF NON-NEWTONIAN FLUIDS <i>Kapustin D. A., Kushchenko A. V., Shvyrov V. V., Sentyay R. N.</i> -----	40
REFINED MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS AND CHARACTERISTICS OF THE JET MIXING PUMP <i>Kventsel A. L., Remen V. I.</i> -----	46
THE WORKING PROCESS MODEL OF THE INJECTION AIRLIFT AND ITS NUMERICAL SOLUTION <i>Kononenko A. P., Bozhko R. I., Mironychev I. I.</i> -----	56
PROFILING THE FLOW PART OF THE OUTLET CHANNEL OF AN ELECTRO-PNEUMATIC VALVE OF THE SOLENOID TYPE <i>Maltsev Y. I., Maltseva M. O., Suvorova E. Y.</i> -----	62
AUTOMATION OF CONTROL OF QUALITY PARAMETERS OF COAL-WATER FUEL DURING ITS FLOW THROUGH A PIPELINE USING THE EDGE CURRENT METHOD <i>Sentyay R. N., Kapustin D. A., Gutko Yu. I., Shvyrov V. V.</i> -----	68
INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN HYDRODYNAMIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF VORTEX PIPELINE FITTINGS OF TRANSPORT SYSTEMS <i>Syomin D. A., Nechaev G. I., Levashov Y. N., Mikhailichenko A. A.</i> -----	75
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE BULK MEDIUM ON THE PROCESS OF ITS TRANSPORTATION BY A VORTEX CHAMBER SUPERCHARGER <i>Syomin D. A., Levashov A. N., Kovalevsky D. S.</i> -----	81

ESTIMATION OF THE FLOW CAPACITY OF VORTEX VALVES WITH DIFFUSER OUTPUT CHANNELS <i>Syomin D.A., Levashov Ya.N., Levashov A.N., Serykh A.V.</i> -----	85
ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ROTARY EXTRACTION PROCESS <i>Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N.</i> -----	91
MODERN PROBLEMS AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PNEUMATICS <i>Suliga S. V.</i> -----	94
THE USE OF DEVICES WITH AN AIR CUSHION TO EXPAND THE OPERATIONAL CAPABILITIES OF THE TRANSPORT SYSTEM <i>Turusina N. V., Zharskiy N. I.</i> -----	99
IMPROVING THE PERFORMANCE OF HIGH-SPEED DIESEL FUEL PUMPS IN OPERATION <i>Tyrlovoi S. I., Kostenko A. V., Chudnoj A. A.</i> -----	102
CIRCULATION INSTALLATION <i>Cheban V. G.</i> -----	106
RESOURCE-SAVING TRANSPORT SYSTEM FOR GASIFICATION OF GRAPHITE-CONTAINING WASTE <i>Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N., Shabratsky S. V.</i> -----	110
OTHER AREAS OF SCIENCE	
VIRTUAL EXPERIMENT IN ELECTRONIC, NANOELECTRONIC, OPTICAL AND QUANTUM CIRCUITS <i>Bobrowskiy G. A.</i> -----	115
INVESTIGATION OF THE EFFECTIVE HEAT FLOW TO THE WORKPIECE DURING TURNING WITH HEATING <i>Gavrysh V. S.</i> -----	142
CALCULATION OF THE OPTIMAL THICKNESS OF THE THERMAL PROTECTION PACKAGE FOR THE MANUFACTURE OF SPECIAL CLOTHING <i>Deineka I. G., Soboleva N. S.</i> -----	145
ALGORITHM FOR TEACHING CLASSICAL GAMES IN THE CONTEXT OF REINFORCEMENT LEARNING <i>Klipakov S.A., Tarashchanskii M.T.</i> -----	149
INVESTIGATION OF NONLINEAR OSCILLATORY SYSTEMS BY THE METHOD OF COMPUTATIONAL EXPERIMENT <i>Korsunov K. A., Lyshtvan E. Y., Kharchenko E. I., Chalenko A. V.</i> -----	152
DISTINCTIVE FEATURES OF SPEECH ETIQUETTE IN ENGLISH-SPEAKING COUNTRIES <i>Kostina V. S., Luchko A.M.</i> -----	158
THE DESIGN AND RESEARCH APPROACH AS A MEANS OF FORMING THE BASIC PROFESSIONAL COMPETENCIES OF PHYSICS STUDENTS <i>Korsunov K. A., Kharchenko E. I., Chalenko A. V.</i> -----	162

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE PEDESTRIAN COMPONENT IN THE TOTAL DURATION OF THE PASSENGER'S MOVEMENT USING A DIGITAL TRANSPORT TRAIL <i>Luchko M. I.</i> -----	167
DESIGNING AN INDIVIDUAL TRAJECTORY OF A UNIVERSITY STUDENT'S PROFESSIONAL DEVELOPMENT <i>Lyshtvan E. Y., Kamenev S. A., Vorobjov S. G.</i> -----	172
ANALYSIS OF STATISTICAL DATA USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE <i>Malakhova V. V., Malakhov O. V.</i> -----	177
THE ROLE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF LEARNING A FOREIGN LANGUAGE <i>Melyokhina A. V.</i> -----	180
SEPARATE PROVISIONS ON THE NATURE, PURPOSE AND APPLICATION AT THE PRODUCTION SITES OF VIBRATION TREATMENT OF PARTS WITH A FREE ABRASIVE MEDIUM <i>Mitsyk V. Ya., Pokintelitsa N. I., Chesnokov A. V.</i> -----	184
ON THE ISSUE OF MINIMIZING OF ACTIVE ELECTRICITY AND GREENHOUSE EMISSIONS INTO THE ENVIRONMENT FROM HIGHER HARMONIC MODES IN ELEMENTS OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS WITH A VOLTAGE OF 10(6) KV OF THE SUE LPR «REPUBLICAN GRID COMPANY» OF RUSSIA DURING THE TRANSPORTATION OF ELECTRICITY TO CONSUMERS <i>Parsentev O. S.</i> -----	192
DEVELOPMENT OF A TEACHING METHOD CNC OPERATOR ENGINEER <i>Perevozchikov V. A.</i> -----	235
QUASI-FREQUENCY-PHASE CONTROL OF THE ROTATIONAL SPEED OF ASYNCHRONOUS MOTORS <i>Polovinka D. V., Ivlev M. N., Rubleva Yu. V.</i> -----	239
COMPETITIVENESS OF THE ENTERPRISE, ITS ESSENCE AND METHODS OF ASSESSMENT <i>Protasov V. V., Chernyaeva O. V., Chernyaev A. V.</i> -----	246
ASSESSMENT AND ANALYSIS OF THE PRODUCTION POTENTIAL OF THE REGION USING THE EXAMPLE OF THE ROSTOV REGION <i>Protasov V. V., Taran A. A.</i> -----	251
COMPETITIVENESS AS A CONDITION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE <i>Protasov V. V., Chernysh L. N., Shevchenko Y. S.</i> -----	256
CALCULATION OF METEORITE CHARACTERISTICS BASED ON THE PARAMETERS OF A SIMPLE IMPACT CRATER <i>Sarkisov A. A., Chalenko A. V.</i> -----	261

УДК 539.3

О ДВУХ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ

Агаханов Э. К., Алибеков А. К., Джабраилов А. З.

ABOUT TWO EQUIVALENCES ULTIMATE STRESS STATE OF SOILS

Agakhanov E. K., Alibekov A. K., Dzhabrailov A. Z.

В работе по расчетной модели теории предельного равновесия из соответствующей системы уравнений для случая плоской задачи установлено, что напряжения от собственного веса грунта эквивалентны напряжениям от поверхностных сил с точностью до всестороннего гидростатического сжатия и предельное напряженное состояние связного грунта эквивалентно предельному напряженному состоянию сыпучего грунта с точностью до всестороннего равномерного сжатия. В качестве примера рассмотрена задача определения давления от собственного веса связного грунта на подпорную стенку.

Ключевые слова: предельное напряженное состояние, эквивалентность воздействий, эквивалентность грунтов, подпорная стенка, давление грунта.

Введение. Полемизируя с существующим мнением, что современные численные методы позволяют решить практически любую задачу, необходимо отметить, что аналитические и экспериментальные методы по-прежнему являются актуальными. Создание эквивалентных (фиктивных) расчетных схем (моделей) позволяет решать задачи без воспроизведения их условий и использовать существующие методы, разработанные с полнотой, достаточной для получения эффективных решений, для решения новых задач [1, 2]. Фиктивные расчетные схемы (модели) особенно используются при экспериментальном решении задач, так как осуществимость каждого воздействия ограничена возможностями техники моделирования [3, 4].

Для исследования вопросов прочности и устойчивости грунтовых масс, находящихся под действием различных нагрузок, а также для определения давления грунта на наземные и подземные сооружения, широко применяется расчетная модель теории предельного равновесия, отвечающая такому состоянию грунтовой среды, когда во всех ее точках возникают смещения одной части грунта относительно другой. Расчетная модель теории предельного равновесия основана на предположении, что во всех точках грунтовой среды имеются площадки, по которым имеет место предельное напряженное состояние.

Цель исследования. По расчетной модели теории предельного равновесия установить эквивалентности между напряжениями от собственного веса грунта и поверхностных сил, и предельными напряженными состояниями связного и сыпучего грунтов.

Изложение основных материалов. Система уравнений для предельного напряженного состояния грунта в случае плоской задачи имеет вид [5]:

Уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Условие предельного равновесия:
для сыпучего грунта

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi, \quad (2)$$

для связного грунта

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \sin \varphi, \quad (3)$$

где γ - удельный вес грунта, φ - угол внутреннего трения грунта, c - удельное сцепление грунта.

Помимо удовлетворения этой системе уравнений, напряжения на граничных поверхностях должны удовлетворять соответствующим граничным условиям, о которых подробнее будет сказано при решении конкретных задач.

Рассмотрим грунтовый массив под действием только сил собственного веса [6]. Возникающие в нем напряжения удовлетворяются следующим уравнениям равновесия и граничным условиям:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x^\gamma}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^\gamma}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}^\gamma}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z^\gamma}{\partial z} + \gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^\gamma l + \tau_{xz}^\gamma m &= 0, \\ \tau_{zx}^\gamma l + \sigma_z^\gamma m &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Обозначим через $\sigma_x^p, \sigma_z^p, \tau_{xz}^p, \tau_{zx}^p$ напряжения, возникающие в грунтовом массиве от поверхностных сил P , распределенных по граничной поверхности и направленных нормально к этой поверхности. В таком случае, очевидно, что эти напряжения удовлетворяют уравнениям

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x^p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^p}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}^p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z^p}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^p l + \tau_{xz}^p m &= p_x, \\ \tau_{zx}^p l + \sigma_z^p m &= p_z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Нетрудно убедиться, что напряжения в грунтовом массиве от действия сил собственного веса, представленные в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^\gamma &= \sigma_x^p + p, \\ \sigma_z^\gamma &= \sigma_z^p + p, \\ \tau_{xz}^\gamma &= \tau_{xz}^p, \\ \tau_{zx}^\gamma &= \tau_{zx}^p, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

удовлетворяют граничным условиям (5).

Подставляя в (4) формулы для напряжений из (8), получим

$$p = -\gamma z. \quad (9)$$

Таким образом, в предельном напряженном состоянии напряжения от собственного веса грунта эквивалентны напряжениям от поверхностных сил с точностью до всестороннего гидростатического сжатия.

Теперь представим условие предельного равновесия для связного грунта (3) в форме, аналогичной форме (2) для сыпучего грунта:

$$\begin{aligned} &(\sigma_1 + c \cdot \text{Ctg} \varphi) - (\sigma_2 + c \cdot \text{Ctg} \varphi) = \\ &= [(\sigma_1 + c \cdot \text{Ctg} \varphi) + (\sigma_2 + c \cdot \text{Ctg} \varphi)] \text{Sin} \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

Если грунт изотропен, вследствие чего удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ по всем площадкам, проходящим через каждую точку грунта, одинаковы, то величина $c \cdot \text{Ctg} \varphi$ также будет одинаковой для всех любым образом ориентированных площадок, проходящих через данную точку. Поэтому эту величину можно рассматривать как всестороннее равномерное сжатие $\sigma_c = c \cdot \text{Ctg} \varphi$, эквивалентное связности.

Если грунт к тому же однороден, то величина σ_c одинакова во всех точках грунта и систему уравнений равновесия можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_x + \sigma_c) + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z + \sigma_c) + \gamma &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Сравнение системы уравнений теории предельного равновесия для связного грунта в виде (11) и (10) с соответствующей системой уравнений (1) и (2) для сыпучего грунта позволяет отметить, что предельное напряженное состояние связного грунта эквивалентно предельному напряженному состоянию сыпучего грунта с точностью до всестороннего равномерного сжатия $\sigma_c = c \cdot \text{Ctg} \varphi$, эквивалентного связности.

Остановимся в качестве примера на вопросе о давлении связного грунта на абсолютно гладкую вертикальную подпорную стенку, которое возникает под действием собственного веса грунта. В таком случае, рассматривая напряженное состояние в любой точке, совпадающей с поверхностью стенки, следует принять, что главные площадки для таких точек совпадают или перпендикулярны гладкой поверхности стенки. Выделим элемент, показанный на рис. 1, и обозначим главные напряжения соответственно σ_1 и σ_2 .

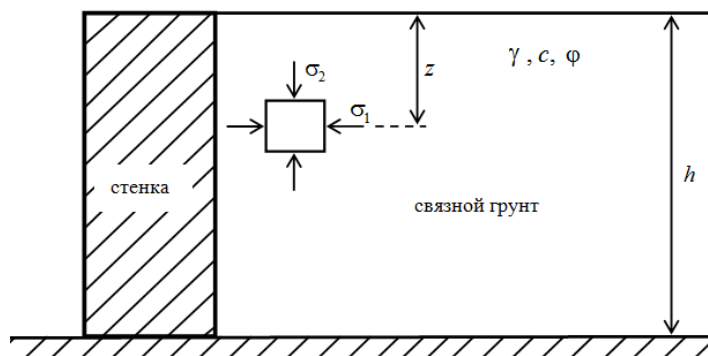


Рис. 1. Расчетная схема стенки со связным грунтом

Для определения активного давления связного грунта на подпорную стенку в соответствии с установленной эквивалентностью предельных

напряженных состояний составляем расчетную схему для сыпучего грунта (рис. 2).

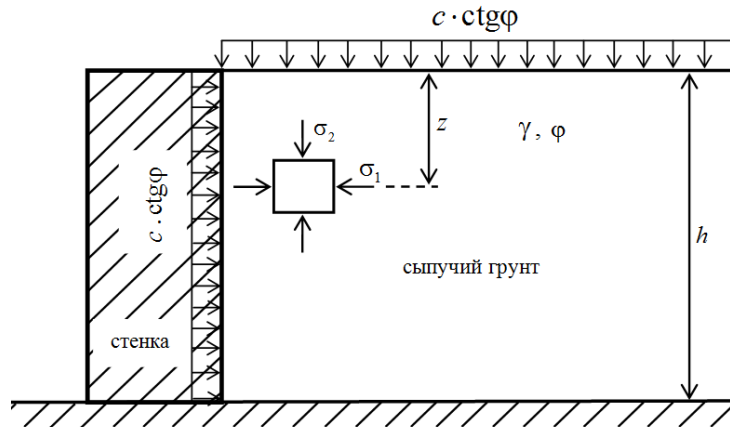


Рис. 2. Эквивалентная расчетная схема стенки с сыпучим грунтом

Тогда в условиях, когда трение на стенке отсутствует, главное напряжение

$$\sigma_2 = \gamma \cdot z + c \cdot Ctg\varphi. \quad (12)$$

Из условия предельного равновесия для сыпучего грунта получаем:

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + c \cdot Ctg\varphi) \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (13)$$

Тогда активное давление связного грунта на подпорную стенку

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + c \cdot Ctg\varphi) \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - c \cdot Ctg\varphi \quad (14)$$

или, произведя преобразования с учетом

$$Ctg\varphi \cdot \left[1 - tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right] = 2 \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right),$$

получим

$$\sigma_1 = \gamma \cdot z \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (15)$$

Полное активное давление связного грунта на стенку равно:

$$E_p = \int_0^h \sigma_1 dz = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot h \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (16)$$

Предположим, что на поверхности грунта расположена равномерно распределенная нагрузка q . Для случая действия равномерно распределенной нагрузки и собственного веса грунта расчетная схема стенки со связным грунтом показана на рис. 3. Соответствующая эквивалентная расчетная схема стенки с сыпучим грунтом показана на рис. 4.

Полагая так же, что трение на стенке отсутствует, главное напряжение

$$\sigma_2 = \gamma \cdot z + q + c \cdot Ctg\varphi. \quad (17)$$

Согласно условию предельного равновесия, для сыпучего грунта имеем:

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + q + c \cdot Ctg\varphi) \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (18)$$

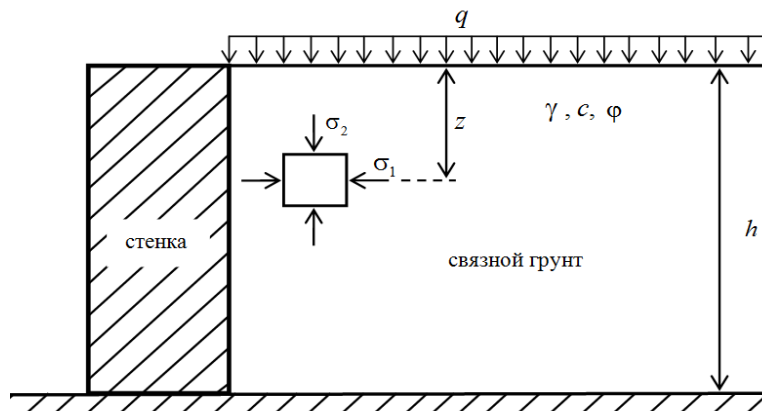


Рис. 3. Расчетная схема стенки со связным грунтом с равномерно распределенной нагрузкой на поверхности

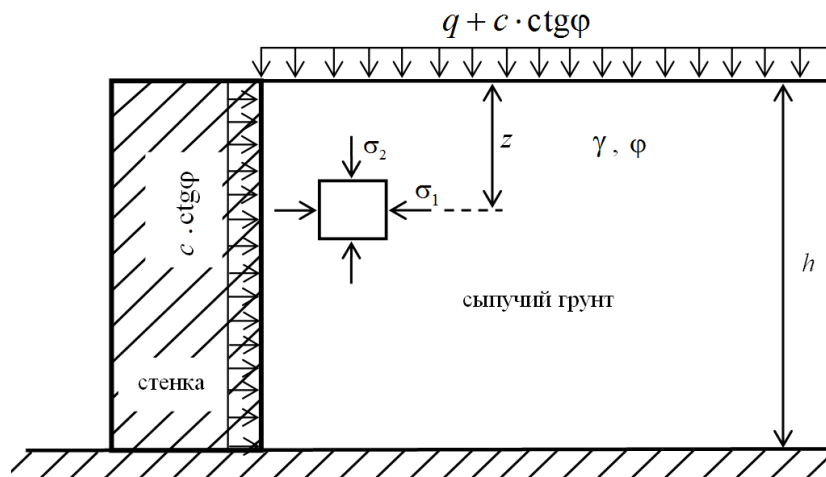


Рис. 4. Эквивалентная расчетная схема стенки с сыпучим грунтом

Для активного давления связного грунта на подпорную стенку получаем:

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + q + c \cdot \text{Ctg}\varphi) \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - c \cdot \text{Ctg}\varphi \quad (19)$$

или, произведя аналогичные, как и выше преобразования получим

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + q) \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \cdot c \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (20)$$

Тогда для полного активного давления связного грунта на стенку имеем:

$$E_p = \int_0^h \sigma_1 dz = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) + q \cdot h \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \cdot c \cdot h \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (21)$$

Аналогичным способом может быть получено выражение для отпора или пассивного давления на стенку, соответствующее предельному сопротивлению грунта при принудительном горизонтальном смещении стенки какой-либо внешней силой, направленной в сторону грунта.

В этом случае по аналогии с (20)

$$\sigma_1 = (\gamma \cdot z + q) \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \cdot c \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (22)$$

откуда полная величина отпора равна:

$$E_{om} = \int_0^h \sigma_1 dz = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + q \cdot h \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \cdot c \cdot h \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (23)$$

Формулы для активного и пассивного давления грунта на подпорную стенку имеют широкое распространение в инженерной практике.

Совпадение для рассмотренной в качестве примера задачи решения с известными ранее [5, 7, 8] свидетельствует о достоверности полученных в работе результатов.

Поступая совершенно аналогичным способом или используя методы физического моделирования с применением полученных эквивалентностей для предельного напряженного состояния грунтов можно определить давление связного грунта на различные наземные и подземные сооружения, а также исследовать вопросы прочности и устойчивости грунтовых масс.

Выводы. По результатам проведенных исследований можно заключить следующее:

1. В предельном напряженном состоянии напряжения от собственного веса грунта эквивалентны напряжениям от поверхностных сил с точностью до всестороннего гидростатического сжатия.

2. Предельное напряженное состояние связного грунта эквивалентно предельному напряженному состоянию сыпучего грунта с точностью до всестороннего равномерного сжатия.

3. Установленные эквивалентности можно использовать при исследовании прочности и устойчивости грунтовых масс, а также при определении давления грунтов на различные наземные и подземные сооружения.

Л и т е р а т у р а

1. Агаханов Э.К., Агаханов М.К. О возможности применения эквивалентности воздействий в аналитических решениях задач теории упругости. Вестник МГСУ. 2010. № 4-3. С. 144-148.
2. Агаханов Э.К., Агаханов М.К. О моделировании действия объемных сил в упругоползучем теле. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № 1 (129). С. 25а-26.
3. Савостьянов В.Н., Агаханов Э.К. Об эквивалентности воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела. Известия

высших учебных заведений. Строительство. 1995. № 10. С. 26-30.

4. Agakhanov E., Sultanova L., Hizriyeva Z., Agakhanov M. Conditions of equivalence of effects for the solid body from incompressible material. В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. С. 01031.

5. Флорин В.А. Основы механики грунтов, т.1, Госстройиздат, 1959, 356 с.

6. Agakhanov E., Batmanov T., Agakhanov M. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout. В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. С. 03047.

7. Цытович Н.А. Механика грунтов, М., ВШ, 1983, 288 с.

8. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н., Механика грунтов, основания и фундаменты, М., АСВ, 1994, 527 с.

Agakhanov E.K., Alibekov A.K., Dzhabrailov A.Z.

ABOUT TWO EQUIVALENCES ULTIMATE STRESS STATE OF SOILS

In the work on the calculation model of the theory of limit equilibrium from the corresponding system of equations for the case of a plane problem, it was established that the stresses from the own weight of the soil are equivalent to the stresses from surface forces up to all-round hydrostatic compression and the limiting stress state of cohesive soil is equivalent to the limiting stress state of granular soil up to all-round uniform compression. As an example, the problem of determining the pressure from the own weight of cohesive soil on a retaining wall is considered.

Key words: ultimate stress state, equivalence of impacts, equivalence of soils, retaining wall, soil pressure.

Агаханов Элифхан Керимханович, д.т.н., профессор кафедры «Транспортные сооружения и

строительные материалы» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала.

E-mail: Elifhan@bk.ru.

Agakhanov Elifkhan Kerimkhanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Structures and Construction Materials, Dagestan State Technical University, Makhachkala.

Алибеков Али Казобекович, к.т.н., доцент кафедры «Нефтегазовое дело» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала.

E-mail: ali.dgtu@rambler.ru.

Alibekov Ali Kazibekovich, Ph.D. Associate Professor, Department of Oil and Gas Well Drilling, Dagestan State Technical University, Makhachkala.

Джабраилов Адалет Залович, аспирант кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала.

E-mail: zalovich84@mail.ru.

Dzhabrailov Adalet Zalovich, postgraduate student of the Department of Transport Structures and Construction Materials, Dagestan State Technical University, Makhachkala.

Рецензент: Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, д.т.н., профессор кафедры сопротивления материалов, теоретической и строительной механики Дагестанского государственного технического университета.

Статья подана 18.12.2023

УДК 627.132:532.543

ПОИСК ЭКОНОМИЧНОГО ВАРИАНТА ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ С ЛУПИНГОМ И ВСТАВКОЙ

Алибеков А. К., Агаханов Э. К.

FINDING AN ECONOMICAL OPTION FROM PIPELINES WITH LOOPING AND INSERTION

Alibekov A. K., Agakhanov E. K.

Рассмотрена задача поиска экономического варианта из двух способов увеличения пропускной способности длинных трубопроводов: с лупингом и вставкой. В качестве критерия принята минимальная материалоемкость трубопроводов. При решении задачи использована методика расчета длинных трубопроводов с учетом различия в шероховатости основного трубопровода, лупинга и вставки. Задаваясь параметрами лупинга, определены пропускная способность, диаметр вставки и коэффициент экономической эффективности трубопровода. По результатам расчетов в большинстве случаев предпочтительным оказался вариант со вставкой. Однако задача является многофакторной и конкретные случаи рекомендуется рассчитать по приведенному алгоритму. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе и проектной деятельности при реконструкции магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: гидравлически длинные трубы, вставка, лупинг, пропускной способности, экономичный вариант.

Введение. В условиях роста производства и нарастающей численности городского населения возникает необходимость увеличения пропускной способности существующей трубопроводной сети и прокладки новых инженерных сетей. Вопросам расчета трубопроводов и поиску оптимального варианта посвящены теоретические и экспериментальные работы многих ученых. Данная работа посвящена дальнейшему развитию методики расчета сложных трубопроводов с лупингом и вставкой и поиску наиболее экономичного решения. Наличие такой методики позволит проектировщикам обоснованно принимать решения при реконструкции существующих и прокладке новых трубопроводных сетей.

Места подключения лупинга или замены участка трубопровода на трубу большего диаметра определяются в зависимости от конкретных местных условий и экономической целесообразностью. При этом обязательным условием является учет всех определяющих

факторов и сравнение вариантов. Представляется экономически выгодным увеличение пропускной способности существующего трубопровода осуществить путем реконструкции части в виде устройства вставки или лупинга вместо демонтажа и монтажа нового трубопровода. Отмеченное определило актуальность и задачу настоящей работы.

Цель исследования заключалась в установлении алгоритма поиска экономического по критерию наименьшей материалоемкости варианта из трубопроводов с лупингом и вставкой при одинаковой пропускной способности и разных шероховатостях отдельных участков трубопроводов (рис. 1).

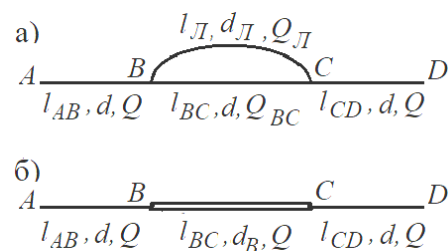


Рис. 1. Схема трубопровода:
а – с лупингом, б – со вставкой

Изложение основных материалов. Параметры принятых для исследования трубопроводов, представленные на рисунке 1, приняты следующими:

- длины участков BC со вставкой и лупингом равны между собой,
- расходы и разность напоров в крайних точках A и D, B и C трубопровода в обоих случаях а) и б) одинаковые,
- абсолютная эквивалентная шероховатость участков вставки и лупинга не равны шероховатости существующего реконструируемого трубопровода,
- область гидравлического сопротивления квадратичная (для частичного облегчения решения

задачи), тогда и коэффициент трения найдем из формулы Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где Δ и d — соответственно эквивалентная шероховатость и диаметр трубопровода участка BC .

Сравнение двух вариантов увеличения пропускной способности трубопроводов будет осуществляться при одинаковых значениях расхода Q . Такой же расход при последовательном соединении труб протекает и на участках AB и CD . Тогда при одинаковом диаметре d и протяженности стоимости этих участков AB и CD в обоих вариантах будут одинаковыми и их можно исключить из дальнейшего рассмотрения. Поставленная задача сводится к сравнению участка BC с лупингом и со вставкой.

Согласно [1 - 4] зависимость для определения потерь напора H при расчете длинных труб с учетом (1) можно представить в виде:

$$H = s_0 l Q^2 = \frac{8}{g \pi^2 d^5} 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} l Q^2 = \frac{c \Delta^{0,25}}{d^{5,25}} l Q^2, \quad (2)$$

где s_0 — удельное сопротивление трубопровода, $s_0 = 8\lambda / (g \pi^2 d^5)$,

d и l — соответственно диаметр и длина трубопровода BC ,

c — обозначение, $c = 8 \cdot 0,11 / (g \pi^2) = 0,009098$.

Проблема увеличения пропускной способности основного трубопровода возникает позже его возведения, значит, у лупинга, вставки и существующего трубопровода, который нужно считать бывшем в эксплуатации, шероховатости будут разными и это в расчетах надо учитывать, включая изменения в период эксплуатации.

Сначала рассмотрим вариант с лупингом (рисунок 1, а). На участке BC лупинг и основной трубопровод соединены параллельно, потери напора H по двум трубам будут одинаковыми и из (2) суммарный расход по участку с лупингом

$$Q = \sqrt{\frac{H}{c}} \left(\sqrt{\frac{d_{\text{л}}^{5,25}}{\Delta_{\text{л}}^{0,25} l_{\text{л}}}} + \sqrt{\frac{d^{5,25}}{\Delta^{0,25} l}} \right), \quad (3)$$

где $d_{\text{л}}$ — диаметр лупинга,

Δ , $\Delta_{\text{л}}$ — соответственно абсолютные эквивалентные шероховатости основного трубопровода BC и лупинга,

$l_{\text{л}}$ — длина лупинга, которую с определенной точностью можно принять равной длине l участка BC .

Анализируя зависимость (3) можно указать на характер влияния отдельных факторов на величину расхода: с увеличением напора H и диаметров труб

расход увеличивается, а с ростом шероховатости и длин трубопроводов уменьшается.

Далее рассмотрим второй случай (рис. 1, б): участок BC заменим вставкой диаметром $d_{\text{в}}$. Для сравнения вариантов при одинаковых условиях подставим (3) в (2) и выразим оттуда диаметр $d_{\text{в}}$:

$$d_{\text{в}}^{5,25} = l \Delta_B^{0,25} \left(\sqrt{\frac{d^{5,25}}{\Delta^{0,25}}} + \sqrt{\frac{d_{\text{л}}^{5,25}}{\Delta_{\text{л}}^{0,25}}} \right)^2.$$

Отсюда при принятии $l \approx l_{\text{л}}$ получим другое выражение для определения диаметра вставки:

$$d_{\text{в}} = \left[\Delta_B^{0,25} \left(\sqrt{\frac{d^{5,25}}{\Delta^{0,25}}} + \sqrt{\frac{d_{\text{л}}^{5,25}}{\Delta_{\text{л}}^{0,25}}} \right)^2 \right]^{1/5,25}. \quad (4)$$

Если предусмотреть лупинг того же диаметра, что и существующий трубопровод ($d_{\text{л}} = d$), длины лупинга и вставки одинаковой протяженности ($l_{\text{л}} = l_B = l_{BC}$), потери напора на участке лупинга и вставки одинаковые (H), а также шероховатости существующего трубопровода, лупинга и вставки равны между собой ($\Delta = \Delta_{\text{л}} = \Delta_B$), то при одинаковой пропускной способности схем с лупингом и вставкой диаметр вставки можно найти по инженерной формуле, получаемой из (4):

$$d_{\text{в}} \approx 1,3d. \quad (5)$$

Относительно критерия выбора экономичного решения отметим: 1) в условиях рыночной экономики расценки на работу и материалы зависят от региона, времени года, удаленности места строительства, применяемой технологии производства работ и т. д., 2) по стоимости различные виды работ по возведению трубчатой сети не являются равнозначными (например, земляные работы являются самыми дешевыми).

В результате подобных рассуждений для оценки предпочтительности одной из двух рассматриваемых схем в качестве критерия была принята масса трубопровода $M_{\text{л}}$ или объем материала $W_{\text{л}}$, необходимый для изготовления лупинга.

Задавшись диаметром лупинга $d_{\text{л}}$,

$$M_{\text{л}} = \rho W_{\text{л}} = \rho \delta_{\text{л}} \pi d_{\text{л}} l_{\text{л}}, \quad (6)$$

где δ — определяемая по нормативам толщина стенок трубопровода, зависящая от диаметра, материала и назначения трубопровода,

ρ — плотность материала трубопровода.

Определив по одной из формул (3 - 5) диаметр вставки и вычитая объем материала демонтируемого участка BC , найдем дополнительную массу

материала M_B , необходимую для изготовления вставки:

$$M_B = \rho W_B = \rho \pi l (\delta_B d_B - \delta d), \quad (7)$$

Возьмем отношение (7) к (6):

$$k = \frac{M_B}{M_L} = \frac{\delta_B d_B - \delta d}{\delta_L d_L} \quad (8)$$

Отсюда с учетом (4) окончательно получим:

$$k = \frac{1}{\delta_L d_L} \left\{ \delta_B \left[\Delta_B^{0,25} \left(\sqrt{\frac{d^{5,25}}{\Delta_B^{0,25}}} + \sqrt{\frac{d_L^{5,25}}{\Delta_L^{0,25}}} \right)^2 \right]^{1/5,25} - \delta d \right\} \quad (9)$$

Очевидно, экономичным будет вариант, соответствующий минимальной материалоемкости по (6) и (7), что в отношении коэффициента k означает:

- при $k > 1$ экономичнее схема с лупингом,
- при $k < 1$ предпочтительней схема со вставкой,

- при $k = 1$ оба варианта равноценны.

Назовем k коэффициентом экономической эффективности трубопровода.

При выполнении практических расчетов необходимо проверить зону гидравлического сопротивления, когда коэффициент трения, возможно, будет зависеть от числа Рейнольдса и относительной шероховатости. Если в случае квадратичного сопротивления можно получить выражения для определения диаметра вставки в явном виде, как выше, то в общем случае поставленную задачу придется решать одним из методов: подбора, последовательных итераций, решения неявных уравнений или первоначально задавшись квадратичной областью сопротивления с последующей проверкой [1-2 и др.].

Результаты исследований. Алгоритм поиска экономичного варианта из трубопроводов с лупингом и со вставкой покажем для наглядности с помощью численных расчетов. Однако исследуемая задача является многомерной: согласно (9) экономичный вариант определяется 8 параметрами. Если каждый параметр принять меняющимся на минимальных трех уровнях, то необходимое число расчетных случаев $N = 3^8 = 6561$, что очень много. При малом числе расчетов результаты, включая графики, в большей степени будут носить качественный характер. В то же время наглядность графиков для многих исследователей является более предпочтительной.

В качестве примера рассмотрим трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов [5] для участка BC $l = l_L = 1000$ м, с потерей напора на этой длине $H = 10$ м.

Существующая труба умеренно заржавевшая имеет внутренний диаметр $d = 0,151$ м толщину стенок $\delta = 0,008$ м, шероховатость $\Delta = 0,0005$ м.

Лупинг возводится из новой трубы шероховатостью $\Delta_L = 0,00006$ м. Задаваясь рядом значений внутреннего диаметра лупинга d_L , по [5] примем среднюю толщину стенок δ_L . Далее по (3) находим соответствующие значения пропускной способности Q для случая трубопровода с лупингом.

Для прокладки вставки также используется новая труба ($\Delta_B = 0,0006$ м) с диаметром d_B , определяемым по (4).

Принятые для расчета исходные данные и полученные результаты расчетов представлены в таблице 1, где $d_{B,пр}$ – округленный согласно [5] в большую сторону до стандартного значения практический диаметр вставки,

$k_{пр}$, – практическое значение коэффициента экономической эффективности, подсчитанное по (8) или (9) при диаметре $d_{B,пр}$,

$k_{пр без}$ – то же, что и $k_{пр}$, но без учета массы трубы на участке BC , то есть при возведении новой вставки заменяемая на старом участке труба просто выбрасывается.

Таблица 1

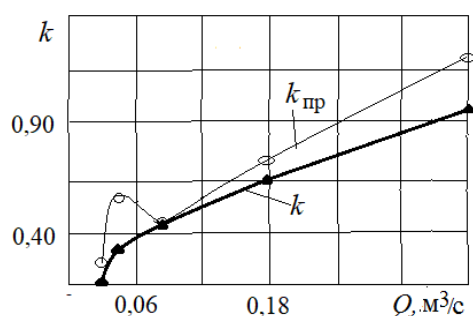
Определение коэффициента экономической эффективности трубопровода

d_L , м	0,110	0,140	0,210	0,310	0,415
δ_L , м	0,005	0,008	0,009	0,010	0,011
Q , м ³ /с	0,030	0,039	0,078	0,187	0,370
d_B , м	0,1617	0,1798	0,2332	0,3227	0,4227
$d_{B,пр}$, м	0,170	0,210	0,236	0,346	0,517
δ_B , м	0,008	0,009	0,009	0,010	0,013
k	0,16	0,37	0,47	0,65	0,94
$k_{пр}$	0,28	0,61	0,48	0,73	1,21
$k_{пр без}$	2,47	1,70	1,12	1,16	1,47

По результатам проведенного небольшого объема расчетов, представленных в табл. 1 и на рис. 2, получены частично ожидаемые результаты: с ростом диаметра лупинга или вставки расход увеличивается. А в отношении цели исследования однозначный ответ не получен, что объясняется отмеченной выше многомерностью поставленной задачи.

При указанных выше условиях проведения расчетов получается, что экономически выгодным является вариант со вставкой, тем более если иметь в виду, что в случае с лупингом будут дополнительные затраты на проведение еще одной нитки.

Согласно рисунку 2 теоретическая кривая $k = f(Q)$ получилась монотонно возрастающей, а практическая кривая $k_{пр} = f(Q)$ имеет участки возрастания и убывания, причем размах будет тем большим, чем больше разница между округленным до стандартного диаметра $d_{B,пр}$ и истинным значением d_B

Рис. 2. Зависимость $k=f(Q)$

Выводы. По результатам проведенного исследования можно отметить:

- поставленная задача является многомерной и в конкретном случае расчеты нужно вести при соответствующих значениях определяющих параметров,
- разработана методика поиска экономичного варианта из длинных трубопроводов со вставкой и лупингом
- на основе выполненных расчетов по критерию наименьшей материалоемкости предпочтение можно отдать варианту трубопровода со вставкой,
- результаты исследований могут быть использованы в проектной деятельности и в учебном процессе в случае необходимости увеличения пропускной способности существующих магистральных трубопроводов.

Л и т е р а т у р а

1. Алибеков А. К., Гидравлика: курс лекций/ А. К. Алибеков. – Махачкала: ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2015. 108 с.
2. Алибеков А.К., Ирзаев Г.Х. Расчет длинных трубопроводов с лупингом // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. «Актуальные вопросы механики текучих сред», № 11 (53). 2021. С.9-12.
3. Гиргидов А.Д., Механика жидкости и газа (гидравлика): учебник/ А.Д. Гиргидов. - М.: ИНФРА-М, 2018. 704 с.
4. Дроздова Ю.А. и др. Гидравлический расчет сложных трубопроводов. Учебное пособие по дисциплинам «Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика» и «Гидромеханика» / Дроздова Ю.А., Кравченко М.Н., Разбегина Е.Г. - М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. - 60 с.

5. ГОСТ 31447-2012. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов: - М.: Стандартинформ, 2013. 32 с.

Alibekov A.K., Agakhanov E.K.

FINDING AN ECONOMICAL OPTION FROM PIPELINES WITH LOOPING AND INSERTION

The problem of finding an economical option of two ways to increase the throughput of long pipelines: with looping and insertion is considered. The minimum material consumption of pipelines is accepted as a criterion. In solving the problem, a method for calculating long pipelines was used, taking into account differences in the roughness of the main pipeline, looping and insertion. By setting the parameters of the looping, the throughput, the insertion diameter and the coefficient of economic efficiency of the pipeline are determined. According to the results of calculations, in most cases, the option with an insert turned out to be preferable. However, the task is multifactorial and it is recommended to calculate specific cases according to the given algorithm. The research results can be used in the educational process and project activities during the reconstruction of main pipelines.

Key words: hydraulically long pipes, insertion, looping, flow capacity, economical option.

Алибеков Али Казибекович, к.т.н., доцент кафедры «Нефтегазовое дело» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала.

E-mail: ali.dgtu@rambler.ru.

Alibekov Ali Kazibekovich, Ph.D. Associate Professor, Department of Oil and Gas Well Drilling, Dagestan State Technical University, Makhachkala.

Агаханов Элифхан Керимханович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала.

E-mail: elifhan@bk.ru.

Agakhanov Elifkhan Kerimkhanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Highways, Foundations and Foundations", Dagestan State Technical University, Makhachkala.

Рецензент: Баламирзоев Абдул Гаджибалаевич, д.т.н., профессор кафедры «Экономика и управление» Махачкалинского филиала МАДИ.

Статья подана 15.12.2023

УДК 62-822

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДА ДЛЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Батурин А. А., Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Гойдо М. Е., Талалушкин Е. В.

ELECTROHYDRAULIC CONTROL SYSTEM OF THE BENCH FOR FULL-SCALE TESTING OF LARGE DIAMETER PIPES

Baturin A. A., Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Goydo M. E., Talalushkin E. V.

Приведена информация о составе и работе гидросистемы стенда оригинальной конструкции, предназначенного для испытания труб большого диаметра (до 1220 мм), используемых в нефтегазовой промышленности для транспортировки нефти и газа, на долговечность внутренним давлением и изгибающим моментом. Стенд разработан и изготовлен в ООО «Уральский инженеринговый центр» (г. Челябинск). Рассмотрены алгоритмы управления работой стенда для случаев, когда испытания трубы при нагружении ее внутренним давлением и изгибающим моментом производятся по отдельности и совместно.

Ключевые слова: стенд для испытания труб на долговечность; гидравлическая система; алгоритмы управления.

Введение. Исследование прочности, ресурса, стойкости к внешним механическим нагрузкам и сейсмическим воздействиям труб, применяемых в нефтегазовой промышленности, предполагает проведение соответствующих стендовых испытаний. Результатом указанных исследований может стать определение сроков безопасной эксплуатации и ремонта труб, внесение поправочных коэффициентов в расчетные схемы (при несоответствии расчетных и фактических показателей работы труб).

С учетом разных размеров труб, используемых для транспортировки нефти и газа, и задач их испытаний существует достаточно большое число предложений по исполнению стендов для проведения испытаний труб [1, ..., 8].

В связи с многообразием технических требований, предъявляемых в каждом конкретном случае к стенду для испытания труб, существующие стенды подобного рода в большинстве случаев являются уникальными по своей конструкции, и новые проектируемые стенды во многом отличаются от известных аналогов.

Технический объект. Для проведения натурных испытаний труб большого наружного диаметра (от 820 до 1220 мм) длиной от 4 до 12,2 м на долговечность внутренним давлением и

поперечными силами, создающими изгибающий момент, и доведения трубы до потери устойчивости в ООО «Уральский инженеринговый центр» (г. Челябинск) разработан испытательный стенд оригинальной конструкции (рис. 1) [9]. Стенд допускает проведение указанных видов испытаний как по отдельности, так и в комплексе.

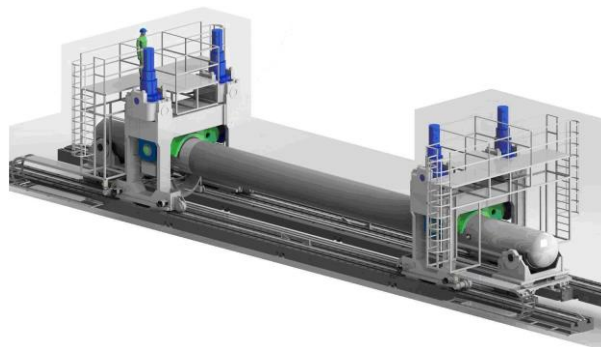


Рис. 1. Общий вид испытательного стенда

Технические решения. Нагружение трубы изгибающим моментом осуществляется посредством четырех идентичных поршневых гидроцилиндров двухстороннего действия с двухсторонним штоком (далее называемых нагружающими гидроцилиндрами), установленных попарно на каждом из двух порталов стенда (см. рис. 1) симметрично относительно вертикальной продольной осевой плоскости портала (и стенда в целом). При этом корпус каждого из этих гидроцилиндров (рис. 2) посредством карданного подвеса соединен с соответствующим порталом (рис. 3), а его нижний шток посредством проушины со сферическим шарниром соединен с хомутом, через который сила, создаваемая парой гидроцилиндров, установленных на портале, передается на испытываемую трубу, обеспечивая нагружение последней изгибающим моментом.

Указанные гидроцилиндры выполнены с гидростатическими опорами и снабжены датчиком положения поршня со штоками. Для

автоматического дистанционного контроля значения силы, создаваемой гидроцилиндром, используется датчик силы.

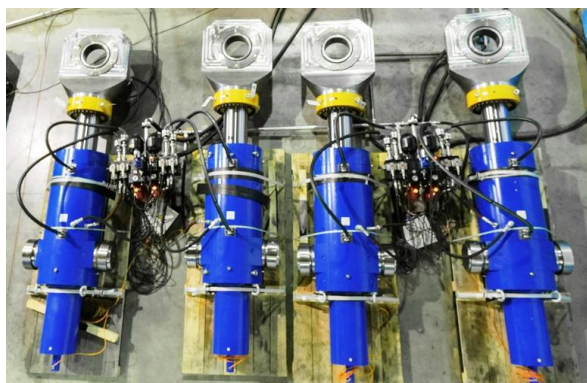


Рис. 2. Нагружающие гидроцилиндры на участке испытаний готовой продукции ООО «Уральский инжиниринговый центр»



Рис. 3. Общий вид одного портала (без нагружающих гидроцилиндров)

Для управления каждым из нагружающих гидроцилиндров служит индивидуальный четырехлинейный трехпозиционный гидрораспределитель с пропорциональным электрическим управлением.

Привод двух ведущих колес каждого из порталов осуществляется посредством двух параллельно подключенных к управляющему ими гидрораспределителю героторных гидромоторов, валы которых соединены с соответствующими колесами через планетарные редукторы. Синхронизация вращения валов этих гидромоторов обеспечивается за счет механической связи приводимых ими колес через соответствующий портал и направляющие, по которым осуществляется перемещение портала.

Для подъема и фиксации каждого портала относительно его направляющих (например, перед началом проведения испытаний) и опускания

портала на его направляющие для перемещения (например, после проведения испытаний) в составе портала имеются четыре винтовых домкрата с приводом от индивидуальных героторных гидромоторов, рабочие каналы которых соединены параллельно.

При нагружении испытываемой трубы изгибающим моментом поперечная сила, создаваемая парой нагружающих гидроцилиндров, установленных на портале, передается на трубу посредством хомута. Перед закреплением трубы на стенде хомут должен быть установлен таким образом, чтобы ось его внутренней поверхности располагалась горизонтально и параллельно продольной оси стенда. Для этого на портале расположены четыре установочных поршневых гидроцилиндра двухстороннего действия с односторонним штоком, два из которых расположены горизонтально, а два других – вертикально. Указанная установка хомута осуществляется при выдвижении штоков гидроцилиндров на полную величину (до упора их поршней в проходные крышки), что обеспечивается при монтаже стенда. Перед началом проведения испытаний трубы штоки всех установочных гидроцилиндров должны быть втянуты до упора их поршней в непроходные крышки.

В качестве рабочей жидкости для испытания труб внутренним давлением используется водная эмульсия. Оборудование для приготовления, хранения, перекачки и фильтрации эмульсии входит в состав стенда. Для заполнения трубы эмульсией и повышения ее давления до начального установленного уровня, а также откачки эмульсии из трубы после проведения испытаний используется центробежный насос.

Для обеспечения изменения давления эмульсии в трубе, подлежащей испытаниям, по заданному закону используются масляно-эмульсионные гидропреобразователи.

Гидропреобразователь представляет собой комбинацию поршневого гидроцилиндра двухстороннего действия с односторонним штоком, работающего на гидравлическом масле (далее называемого масляным гидроцилиндром), и поршневого гидроцилиндра одностороннего действия с односторонним штоком, работающего на эмульсии (далее называемого эмульсионным гидроцилиндром). У эмульсионного гидроцилиндра рабочей является поршневая полость, а штоковая посредством сапуна (воздушного фильтра) соединена с окружающей средой (атмосферой). Корпуса масляного и эмульсионного гидроцилиндров жестко соединены между собой, а шток является общим и жестко соединен с поршнями обоих гидроцилиндров. В силу указанной конструкции при осуществлении возвратно-поступательного движения поршня со штоком масляного гидроцилиндра эмульсионный гидроцилиндр работает как пульсатор, создавая

поток эмульсии, изменяющий направление своего движения с изменением направления движения поршня.

Применение гидропреобразователей с использованием в качестве второй рабочей жидкости гидравлического масла обусловлено тем, что гидравлические устройства, работающие на масле, имеют более широкую номенклатуру и функциональные возможности, обладают большими доступностью и долговечностью и при прочих равных условиях более низкой стоимостью.

Каждый гидропреобразователь выполнен с датчиком положения его подвижных частей (поршней со штоком), установленным со стороны масляного гидроцилиндра.

Для повышения долговечности гидропреобразователя путем снижения вероятности попадания в поршневую рабочую полость эмульсионного гидроцилиндра загрязнений из эмульсии, заполняющей испытываемую трубу, указанная полость соединяется с внутренней полостью трубы через напорный фильтр с обратными клапанами, обеспечивающими возможность движения эмульсии через фильтр только в направлении гидропреобразователя (для исключения вымывания из фильтроэлементов частиц загрязнений при изменении направления движения эмульсии на участке между гидропреобразователем и испытываемой трубой).

Для управления подачей рабочей жидкости в поршневую и штоковую полости масляного гидроцилиндра, входящего в состав гидропреобразователя, используется четырехлинейный трехпозиционный гидрораспределитель с пропорциональным электрическим управлением, индивидуальный для каждого гидропреобразователя.

В составе насосной установки стенда, работающей на гидравлическом масле, можно выделить четыре группы насосов: 1) группу силовых насосов для питания рабочей жидкостью высокого давления гидропривода нагружения трубы внутренним давлением; 2) группу силовых насосов для питания рабочей жидкостью высокого давления гидропривода нагружения трубы изгибающим моментом; 3) группу силовых насосов для питания рабочей жидкостью высокого давления гидростатических опор нагружающих гидроцилиндров и для осуществления управления двухкаскадными направляющими и пропорциональными гидрораспределителями; 4) группу насосов низкого давления для осуществления кондиционирования (фильтрации, нагрева и охлаждения) рабочей жидкости и создания подпора на входе силовых насосов (рис. 4).

Все силовые насосы являются одинаковыми. Это аксиально-поршневые регулируемые насосы, оснащенные регулятором давления с дистанционным управлением. Для дистанционного управления давлением настройки регуляторов

силовых насосов каждой из вышеуказанных групп используется соответствующий предохранительный клапан с пропорциональным электрическим управлением.



Рис. 4. Вид части насосной установки стенда с гидропреобразователями

Предусмотрена возможность объединения потоков рабочей жидкости от силовых насосов, предназначенных для питания рабочей жидкостью гидроприводов нагружения трубы внутренним давлением и нагружения трубы изгибающим моментом, с обеспечением настройки регуляторов этих насосов на один и тот же уровень давления. Такое объединение может быть полезно, например, в случае потребности в повышенном расходе рабочей жидкости при испытании труб внутренним давлением.

Помимо упомянутых выше датчиков положения и силы, гидросистема стенда укомплектована комплексом датчиков давления, температуры и уровня рабочей жидкости, сигнализаторов загрязненности фильтров (реле перепада давления), концевых выключателей, позволяющих контролировать состояние и работу отдельных гидравлических устройств, корректировать управляющие сигналы, осуществлять блокировки, исключающие возникновение аварийных ситуаций, и диагностировать возможные неисправности.

Алгоритм управления. Выбор (задание) вида испытаний и закона изменения контролируемых параметров осуществляется оператором с использованием АРМ (автоматизированного рабочего места) стенда (рис. 5).

Внутреннее давление $p_{тр}$ в испытываемой трубе измеряется напрямую посредством датчика давления.

Величина изгибающего момента $M_{тр}$ трубы связана с суммарным усилием $R_{сум}$, создаваемым двумя нагружающими гидроцилиндрами, установленными на одном портале, соотношением

$$M_{тр} = R_{сум} h,$$

где h — плечо действия силы $R_{\text{сум}}$ относительно опорной точки трубы.

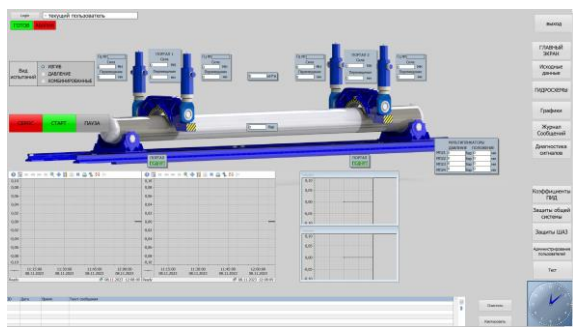


Рис. 5. Вид главного экрана монитора АРМ стэнда

При текущем заданном значении изгибающего момента $M_{\text{тр.зад}}$ трубы и известном значении плеча h , которое устанавливается перед началом испытаний и в процессе их проведения не изменяется, требуемое текущее значение силы $R_{\text{сум.зад}}$ определяется на основании вышеприведенного соотношения, как

$$R_{\text{сум.зад}} = M_{\text{тр.зад}} / h.$$

Фактическое значение суммарного усилия $R_{\text{сум.ф}}$, создаваемого двумя нагружающими гидроцилиндрами, установленными на портале, складывается из усилий $R_{1.ф}$ и $R_{2.ф}$, создаваемых каждым из этих гидроцилиндров по отдельности и измеряемых напрямую посредством соответствующих датчиков силы:

$$R_{\text{сум.ф}} = R_{1.ф} + R_{2.ф}.$$

В связи с тем, что значения $M_{\text{тр}}$ и $R_{\text{сум}}$ взаимосвязаны однозначно зависимостью: $M_{\text{тр}} = R_{\text{сум}} h$, — каждая из величин $M_{\text{тр}}$ и $R_{\text{сум}}$ при нагружении трубы изгибающим моментом может использоваться в качестве контролируемого параметра. Поскольку при работе стэнда на основании прямых измерений определяется величина $R_{\text{сум}}$, то далее для определенности она рассматривается в качестве контролируемого параметра.

В связи с тем, что конструкцией стэнда предусмотрено нескольких устройств как для изменения внутреннего давления в трубе, так и для изменения изгибающего момента испытуемой трубы, которые должны работать синхронно по перемещению их подвижных звеньев: до четырех гидропреобразователей при нагружении трубы внутренним давлением и каждая пара нагружающих гидроцилиндров, установленных на одном портале, — то для решения задач автоматического изменения

как внутреннего давления $p_{\text{тр}}$ в трубе, так и поперечной силы $R_{\text{сум}}$, создающей изгибающий момент $M_{\text{тр}}$ трубы, может использоваться один и тот же алгоритм.

С учетом вышесказанного далее приняты следующие обозначения: x — контролируемый параметр ($p_{\text{тр}}$ или $R_{\text{сум}}$); x_{max} — заданное максимальное значение контролируемого параметра; x_{min} — заданное минимальное значение контролируемого параметра; $x_{\text{зад}}$ — текущее заданное значение контролируемого параметра; $x_{\text{ф}}$ — текущее фактическое значение контролируемого параметра (в соответствии с сигналами соответствующих датчиков); $z_{\text{вед}}$ — текущая координата подвижного звена ведущего устройства (гидропреобразователя или нагружающего гидроцилиндра), используемого для обеспечения изменения контролируемого параметра (соответственно $p_{\text{тр}}$ или $R_{\text{сум}}$) по заданному закону; z_i — текущая координата подвижного звена i -го ведомого устройства (гидропреобразователя или нагружающего гидроцилиндра), используемого для обеспечения изменения контролируемого параметра (соответственно $p_{\text{тр}}$ или $R_{\text{сум}}$) по заданному закону; t — время с начала текущего цикла нагружения.

Выбор (назначение) ведущего и ведомого исполнительных устройств (нагружающих гидроцилиндров каждого из порталов и гидропреобразователей) производится оператором с АРМ стэнда.

Для ведущего исполнительного механизма управляющий сигнал $U_{\text{к.вед}}$, поступающий с выхода контроллера на вход электронного блока управления пропорционального гидрораспределителя, управляющего данным исполнительным механизмом, в процессе работы стэнда в автоматическом режиме формируется следующим образом:

$$U_{\text{к.вед}} = k_{\text{ос}} (x_{\text{зад}} - x_{\text{ф}}) + k_{\text{инт}} \int_0^t (x_{\text{зад}} - x_{\text{ф}}) dt.$$

Для i -го ведомого исполнительного механизма управляющий сигнал $U_{\text{к.}i}$, поступающий с выхода контроллера на вход электронного блока управления пропорционального гидрораспределителя, управляющего этим исполнительным механизмом, в процессе работы стэнда в автоматическом режиме формируется следующим образом:

$$U_{\text{к.}i} = k_{\text{ос}} (x_{\text{зад}} - x_{\text{ф}}) + k_{\text{инт}} \int_0^t (x_{\text{зад}} - x_{\text{ф}}) dt + k_{\text{ос.}i} (z_{\text{вед}} - z_i) + k_{\text{инт.}i} \int_0^t (z_{\text{вед}} - z_i) dt.$$

В вышеприведенных выражениях: k_{oc} , $k_{инт}$, $k_{oc,i}$, $k_{инт,i}$ — коэффициенты усиления.

Если в соответствующий момент времени контролируемый параметр x при его увеличении не достиг значения x_{max} , то в последующие моменты времени возможность уменьшения управляющего сигнала, подаваемого на вход электронного блока управления пропорционального регулирующего гидроаппарата, блокируется до тех пор, пока не будет достигнуто значение x_{max} (при этом увеличение упомянутого управляющего сигнала возможно). Если в соответствующий момент времени контролируемый параметр x при его уменьшении не достиг значения x_{min} , то в последующие моменты времени возможность увеличения управляющего сигнала, подаваемого на вход электронного блока управления пропорционального регулирующего гидроаппарата, блокируется до тех пор, пока не будет достигнуто значение x_{min} (при этом возможно уменьшение упомянутого управляющего сигнала). Поскольку из-за указанной корректировки продолжительность каждого цикла испытаний может оказаться больше заданной, то в пределах каждого цикла отсчет времени производится с момента окончания предыдущего цикла (то есть при гарантированном достижении контролируемым параметром значения x_{min}).

В процессе испытаний текущие значения координат $z_{вед}$ и z_i постоянно сравниваются с их «эталонными» значениями, полученными при прочих равных условиях (при аналогичных значениях $x_{зад}$) при тестовом нагружении. В случае превышения расхождением между текущими и «эталонными» значениями координат некоторого порогового уровня, установленного (заданного) с АРМ стенда, оператор должен с учетом конкретной ситуации принять решение о прекращении или продолжении испытаний.

При одновременном нагружении трубы внутренним давлением и изгибающим моментом для исключения роста рассогласования по времени фактических моментов достижения внутренним давлением и изгибающим моментом максимальных и минимальных значений свыше максимально допустимого значения циклы нагружения трубы по обоим указанным параметрам начинаются одновременно и для каждого нового цикла отсчет времени начинается с нуля.

Если при испытаниях трубы с одновременным нагружением ее внутренним давлением и изгибающим моментом каким-либо параметром достигнуто максимальное (минимальное) значение, а другим параметром еще нет, то уменьшение (увеличение) значения параметра, которым достигнуто максимальное (минимальное) значение,

блокируется до тех пор, пока другим параметром не будет достигнуто соответствующее значение.

Выбор параметров гидросистемы стенда выполнен из условия обеспечения всех предъявляемых к стенду требований для случая проведения самых напряженных с точки зрения потребляемой энергии испытаний. В соответствии с этим осуществлен, в частности, выбор числа и типоразмеров силовых насосов, числа масляно-эмульсионных гидропреобразователей для нагружения труб внутренним давлением, числа и типоразмеров насосов системы кондиционирования (фильтрации и охлаждения) гидравлического масла, числа и типоразмеров теплообменных аппаратов с воздушным охлаждением.

Следует отметить, что для упрощения конструкции гидросистемы стенда в ней не предусмотрено осуществление рекуперации энергии. Поэтому при работе стенда вся потребляемая энергия в конечном итоге преобразуется в тепловую энергию и теряется. В связи с этим для минимизации потерь энергии в процессе проведения испытаний актуальной является задача выбора рационального числа силовых насосов и их рабочего давления, а также числа циркуляционных насосов и используемых теплообменных аппаратов на основании данных о параметрах трубы, подлежащей испытанию, и о требуемых режимах проведения испытаний [9].

В системе управления стенда предусмотрено автоматическое определение необходимых параметров работы его гидросистемы на основании данных о параметрах трубы, подлежащей испытанию, и требуемых режимах проведения испытаний, которые вводятся оператором стенда в интерактивном режиме с использованием АРМ стенда (рис. 6).

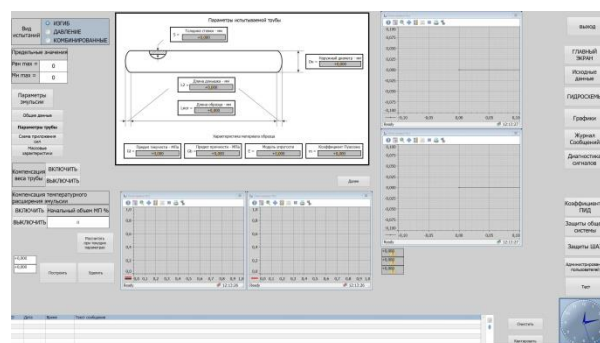


Рис. 6. Вид экрана монитора АРМ стенда для ввода данных об испытываемой трубе

Все вычисления производятся с помощью компьютера с использованием специального программного обеспечения, разработанного на основании соответствующего математического обеспечения.

Потребление энергии при эксплуатации стенда может быть существенно снижено, если в процессе его работы изменять давление настройки

регуляторов силовых насосов в соответствии с требуемым законом изменения контролируемого параметра с запасом на гидравлические и механические потери, необходимым для гарантированного решения задач регулирования, и производить корректировку алгоритма регулирования давления настройки регуляторов силовых насосов на этапе работы гидроприводов с попутной нагрузкой [11, 12]. Применение клапанов с пропорциональным гидравлическим управлением для настройки регуляторов силовых насосов обеспечивает такую возможность.

Выводы. Спроектированный испытательный стенд позволяет проводить исследования прочности, ресурса, стойкости к внешним механическим нагрузкам и сейсмическим воздействиям труб большого диаметра, в частности, труб, используемых в нефтегазовой отрасли промышленности. Результатом указанных исследований может стать определение сроков безопасной эксплуатации и ремонта труб, внесение поправочных коэффициентов в расчетные схемы (при несоответствии расчетных и фактических показателей работы труб).

Использование для настройки регуляторов давления силовых насосов гидросистемы стенда предохранительных клапанов с пропорциональным электрическим управлением позволяет организовать управление работой стенда, при котором достигается минимизация потребления энергии.

Л и т е р а т у р а

1. Авторское свидетельство СССР № 170720. Установка для испытания сварных соединений трубчатых образцов / Ружицкий Б.М. // Оpubл. в Б.И. 1965. № 9.
2. Авторское свидетельство СССР № 1145271. Устройство для испытания труб на изгиб в условиях внутреннего давления / Карпов С.В. // Оpubл. в Б.И. 1985. № 10.
3. Авторское свидетельство СССР № 1174558. Стенд для испытаний нефтепромысловых труб и их соединений / Жаров В.Н., Щербюк Н.Д., Юшук В.М., Якубовский Н.В. // Оpubл. в Б.И. 1985. № 31.
4. Патент РФ № 2097725. Стенд для гидравлического испытания труб / Борзунов Б.Н., Рогозин Л.С. // Оpubл. в Б.И. 1997. № 30.
5. Патент РФ № 2222800. Стенд для испытания труб внутренним давлением и на изгиб и гидравлическая система стенда / Зинин Г.А., Мирошник А.Д., Васин Е.С., Соловьев В.А. // Оpubл. в Б.И. 2004. № 3.
6. Патент РФ № 2591873. Способ испытаний труб на долговечность / Студенов Е.П., Скородумов С.В., Соловьев В.А. // Оpubл. в Б.И. 2016. № 20.
7. Патент на полезную модель РФ № 184640. Стенд для создания в трубном образце сложнапряженного состояния / Наумкин Е.А., Мингажев А.Д., Кузеев И.Р. и др. // Оpubл. в Б.И. 2018. № 31.
8. Стенд для проведения ресурсных испытаний при циклическом нагружении внутренним давлением стальных труб большого диаметра / Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Батурин А.А., Бухаров И.В. // В сборнике: Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы-2016). Труды XXII

Международной научно-практической конференции. Под ред. И.Ю. Пышминцева. Челябинск: ОАО «РосНИТИ». 2016. С. 115-118.

9. Патент РФ № 2691271. Стенд для испытаний труб внутренним давлением и на изгиб / Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Батурин А.А., Талалушкин Е.В. // Оpubл. в Б.И. 2019. № 17.

10. Батурин А.А., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Гойдо М.Е., Талалушкин Е.В. Выбор рациональных параметров работы гидросистемы испытательного стенда перед проведением натурных испытаний трубы на долговечность // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции, 1 июля 2022 г. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 311-325.

11. Патент РФ № 2759190. Электрогидравлический привод с машинно-дрессельным управлением, чувствительный к нагрузке / Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. // Оpubл. в Б.И. 2021. № 31.

12. Патент РФ № 2759191. Способ управления электрогидравлическим следящим приводом / Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. // Оpubл. в Б.И. 2021. № 31.

Baturin A.A., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M., Goydo M.E., Talalushkin E.V.

ELECTROHYDRAULIC CONTROL SYSTEM OF THE BENCH FOR FULL-SCALE TESTING OF LARGE DIAMETER PIPES

Information is given about the composition and operation of the hydraulic system of the bench of the original design, consigned to test pipes of large diameter (up to 1220 mm), used in the oil and gas industry for transporting oil and gas, for durability at internal pressure and bending moment. The stand was designed and manufactured in LLC "Ural Engineering Center" (Chelyabinsk). Algorithms for controlling the work of the bench are considered for cases when the tests of the pipe with loading it at internal pressure and bending moment are performed separately and jointly.

Key words: bench for testing pipes for durability; hydraulic system; control algorithms.

Батурин Александр Алексеевич, к.т.н., доцент, главный инженер ООО «Уральский инжиниринговый центр», Россия, г. Челябинск.
E-mail: baturin@cheltec.ru

Baturin Aleksandr Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Engineer LLC "Ural Engineering Center", Russia, Chelyabinsk.

Бодров Валерий Владимирович, к.т.н., президент группы компаний CHELTEC, ООО «Уральский инжиниринговый центр», Россия, г. Челябинск.
E-mail: vbodrov@cheltec.ru

Bodrov Valery Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, President of the CHELTEC group of companies, LLC "Ural Engineering Center", Russia, Chelyabinsk.

Багаутдинов Рамиль Мерсентович, генеральный директор ООО «Уральский инжиниринговый центр», Россия, г. Челябинск.
E-mail: бага@cheltec.ru

Bagautdinov Ramil Merseitovich, General Director of LLC “Ural Engineering Center”, Russia, Chelyabinsk.

Гойдо Максим Ефимович, к.т.н., доцент, главный инженер проектов ООО «Уральский инжиниринговый центр», Россия, г. Челябинск.

E-mail: goido@cheltec.ru

Goydo Maxim Efimovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Project Engineer LLC “Ural Engineering Center”, Russia, Chelyabinsk.

Талалушкин Евгений Вячеславович, ведущий конструктор ООО «Уральский инжиниринговый центр», Россия, г. Челябинск.

E-mail: talalushkin@mail.ru

Talalushkin Evgeny Vyacheslavovich, Lead constructor LLC “Ural Engineering Center”, Russia, Chelyabinsk

Рецензент: Выдрин Александр Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением» Южно-Уральского государственного университета, Россия, г. Челябинск.

Статья подана 15.11.2023 г.

УДК 621.01: 62-883

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАДИАЛЬНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ШПИНДЕЛЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Брешев В. Е.

COMPUTATIONAL COMPUTER EXPERIMENTS IN RESEARCH OF RADIAL GAS-STATIC SUPPORTS OF A GRINDING MACHINE SPINDLE

Breshev V. E.

Показаны методика и результаты вычислительных компьютерных экспериментов на основе трёхмерной модели газостатической опорной системы шпинделя станка шлифования. Вычислительные эксперименты позволяют исследовать методом конечных элементов (МКЭ) газодинамические процессы в опорах с газовой смазкой и определить их интегральные характеристики – жёсткость, силу реакции, расход воздушной смазки и др. Газодинамические процессы течения смазки в зазоре опор характеризуются сложностью распределения параметров, поэтому аналитическое решение задачи определения жёсткости и силы реакции имеет множество модельных упрощений, является приближенным и не учитывает конструктивные особенности опор. Газодинамический анализ МКЭ лишён этих недостатков и позволяет получать более точный результат. Представлен разработанный алгоритм вычисленных компьютерных экспериментов МКЭ и результаты определения сил реакции, жёсткости и расхода воздушной смазки радиальных газостатических опор шпинделя при варьировании внешнего воздействия через величину возникающего в опорах эксцентриситета.

Ключевые слова: газостатические опоры, шпиндель, вычислительный эксперимент, интегральные характеристики.

Введение. Применение газостатических опор в шпинделях станков для механической обработки позволяет получить ряд технических и технико-экономических преимуществ [1, 2]. За счёт исключения твердотельного контакта в опорах с газовой смазкой такие шпиндели функционируют на максимальных частотах вращения, имеют минимальные потери на трение, фактическое отсутствие износа опор, обеспечивают высокий уровень надёжности и долговечности технологического оборудования. Если прецизионные шпиндели на высокоскоростных шарикоподшипниках обеспечивают сохранение параметров точности механической обработки в среднем до 10 тыс. часов работы и в дальнейшем требуют своей замены, то наработка

газостатических опор по параметрам достигаемой точности обработки не ограничена в течение всего периода эксплуатации шпинделя или станка [1].

Шпиндели на газостатических опорах являются наиболее высокоскоростными и, как правило, прецизионными, работают в самом широком диапазоне температур. В отличие от шарикоподшипников газостатические опорные системы не требуют внешнего охлаждения на высоких частотах вращения при любой продолжительности функционирования и не нуждаются в дополнительном времени холостого вращения для выхода на рабочий температурный режим [2]. Демпфирующие свойства воздушной смазки обеспечивают виброгашение.

Перечисленные преимущества, наряду с возможностями достижения высоких уровней жёсткости и точности позиционирования валов шпинделя на газостатических опорах, создают все условия эффективного применения их для высокоскоростной обработки (ВСО). Обработка ведётся на частотах вращения от 15000 до 100000 об/мин. Высоких значений достигают не только частоты вращения, но и скорости подачи и резания. Например, при фрезеровании алюминия используются следующие диапазоны скоростей резания, м/мин:

- высокопроизводительный режим – 500...2500;
- высокоскоростной режим – 2500...7500;
- сверхвысокоскоростной – более 7500.

Это позволяет значительно (в 1,5 – 3 раза) поднять производительность оборудования при одновременном повышении качества обработки [3, 4]. Использование же шарикоподшипниковых опор на частотах вращения свыше 40000...60000 об/мин является энергозатратным и технически проблематичным, так как в сравнении с газостатическими опорами они имеют в 10...15 раз большие потери на трение и требуют интенсивного охлаждения масляным туманом.

Постановка задачи. При проектировании

шпинделей с валами (роторами) на газостатических опорах наиболее сложной задачей является синтез конструкции опорной системы в соответствии с заданными выходными характеристиками – жёсткостью, несущей способностью (реакцией на максимальную допустимую нагрузку), расходом технологического воздуха. Данные характеристики являются статическими и интегральными, так как зависят от пространственного распределения газодинамических параметров (прежде всего давления) газовой смазки при её течении в зазорах опор. К динамическим характеристикам относятся собственные частоты колебаний и достигаемые скоростные режимы вращения, которые, в значительной степени, зависят от жёсткости опорной системы и величины среднего зазора в газостатических опорах [5].

Ввиду сложности газодинамических процессов, происходящих при течении воздушной смазки в опорах, наиболее распространённым методом получения информации у разработчиков и производителей шпинделей является проведение натурных испытаний с измерением параметров и характеристик газостатических опор.

Для снижения производственных затрат и времени проектирования на начальной стадии разработки необходимо:

1. Выполнить предварительный (прикидочный) расчёт характеристик газостатических опор аналитическим методом – на основе приближённого решения стационарного уравнения Рейнольдса. Известный метод возмущений (МВ) даёт такое решение в линейной постановке задачи определения жёсткости [5, 6].

2. Выполнить уточняющий расчёт в программах CAD/CAE и CFD, таких как *FlowVision*, *FloWorks* методом конечных элементов (МКЭ). Данный расчёт принято называть компьютерным вычислительным экспериментом на основе трёхмерной модели шпинделя и его газостатических опор [7, 8].

В настоящей работе рассматривается разработка алгоритма и выполнение компьютерных вычислительных экспериментов для исследования характеристик радиальных газостатических опор шпинделя шлифовального станка. Разработанный алгоритм позволит быстро и без дополнительных материальных затрат получать расчётную информацию при проектировании, конструктивных модификациях опорной системы шпинделя, а также для создания модельного ряда шпинделей.

Целями работы являются:

- разработка требований к компьютерным вычислительным экспериментам в среде CAD/CAE и алгоритма исследования параметров и характеристик радиальных газостатических опор шпинделя;

- получение результатов вычислительных экспериментов, их интерпретирование и сравнение с результатами расчётов аналитическим методом.

Изложение основного материала. Прежде всего были определены основные требования к алгоритму компьютерного вычислительного эксперимента по численному определению параметров и характеристик радиальных газостатических опор шпинделя:

- расхождение между результатами расчётов правой и левой опор, которые имеют одинаковую конструкцию не должно превышать 1 %;

- отклонение результатов компьютерного расчёта МКЭ от результатов, полученных аналитически МВ, не должно превышать 15 %;

- уровень чувствительности результатов по варьированию давления воздушной смазки должен быть не ниже 0,05 атм.;

- уровень чувствительности на изменение эксцентриситета e вала (шпила) относительно подшипника – не ниже 1 мкм;

- уровень чувствительности на изменение величины среднего зазора C между шипом и подшипником в газостатической опоре – не ниже 1 мкм;

- уровень сходимости результатов в серии одинаковых вычислений по величинам интегральных характеристик – не менее 99%.

Для верификации результатов и корректировки настроек программы CFD используем аналитический метод, основанный на приближённом решении стационарного уравнения Рейнольдса методом возмущений [5, 6].

В вычислительных компьютерных экспериментах расчёт характеристик выполняется для правой и левой радиальных газостатических опор отдельно и при одинаковых начальных, граничных условиях, настройках программы газодинамического анализа. После определения наиболее рациональных настроек программы CFD методом пробных прогонов, они фиксируются для всех расчётных вариантов. Последние определяются варьированием внешней нагрузки на радиальную опору, которая направлена радиально и вниз (вдоль оси OY), не вызывает перекоса, а приводит лишь к изменению радиального эксцентриситета e . Расчётные варианты:

1. Отсутствие внешней нагрузки, $e = 0$ мкм.
2. Внешняя нагрузка около 30 %, $e = 4$ мкм.
3. Внешняя нагрузка около 60 %, $e = 8$ мкм.
4. Внешняя нагрузка около 90 %, $e = 12$ мкм.

Компьютерный расчёт выполняется на основе построенной 3D-модели газостатической опорной системы шпинделя (рис. 1).

Опорная система шпинделя включает двойной (двухсторонний) подпятник и две радиальные – одинаковые по конструкции – газостатические опоры. Твёрдотельная модель определяет проточную часть (питатели и зазор) опорной системы, позволяет изменять её настройку по величинам зазоров между пятой и подпятниками, эксцентриситету в радиальных опорах e в соответствии с внешней нагрузкой.

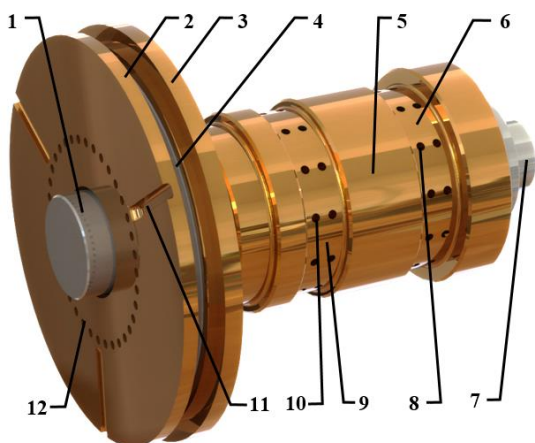


Рис. 1. Трёхмерная модель газостатической опорной системы шпинделя:

1 – вал (роотор) шпинделя; 2 – левый подпятник с системой каналов и питателей; 3 – правый подпятник с системой каналов и питателей; 4 – пята вала; 5 – подшипниковый блок радиальных газостатических опор; 6 – правая радиальная опора; 7 – хвостовая часть вала, идущая к электродвигателю; 8 – ограничители расхода воздушной смазки (питатели) правой опоры; 9 – левая радиальная опора; 10 – питатели левой радиальной опоры; 11 – каналы подвода воздушной смазки к питателям левого подпятника; 12 – питатели левого подпятника

Для вычислительных компьютерных экспериментов были установлены термодинамические параметры воздушной смазки (вязкость, температура, скорость или давление) на входе и давление на выходе из расчётной области. Параметры расчётной сетки определены многократными вычислениями. Установлено, что рациональной, с точки зрения использования ресурсов вычислительной машины и получаемой точности расчёта, является установка точности сетки в диапазоне от 70 % до 85 % от максимального разбиения по количеству элементов.

Начальные и граничные условия:

- среда – воздушная смазка;
- температура воздушной смазки – $+20^{\circ}\text{C}$;
- давление воздушной смазки на выходе из зазора составляет 1 атм.;
- давление воздушной смазки на входе в ограничитель расхода (питатели) – 6 атм.;
- интенсивность турбулентности – 2% (поток воздушной смазки в целом ламинарный, но имеет некоторые турбулентные области в местах резкого изменения направления потока и геометрии проходного сечения;
- рабочим поверхностям радиальных опор, контактирующим с воздушной смазкой присвоена шероховатость 0,4 мкм;
- воздушная смазка входит в зазор через питатели и выходит из него по торцам опор.

Результаты исследований. Для каждого расчётного варианта правой и левой опор выполнена серия из 3 вычислительных экспериментов. Результаты вычислений параметров и характеристик

правой и левой опор показали полную идентичность, поэтому далее представим результаты расчётов только для правой радиальной опоры.

На рис. 2 и рис. 3. показано, как изменяется картина распределения давления воздушной смазки в правой газостатической опоре шпинделя под ступенчато изменяющейся нагрузкой, соответствующей эксцентриситетам опоры $e = 0, 4, 8, 12$ мкм. Показаны только цилиндры зазоров с воздушной смазкой, а изображение 3D-модели опорной системы (см. рис.1.) погашено. С ростом вертикальной нагрузки и эксцентриситета давление в сужающейся части зазора возрастает и падает в его расширяющейся части. Градиент изменения давления возрастает пропорционально эксцентриситету e , а его интегрирование по рабочей поверхности опоры, принадлежащей валу, даёт величину реакции опоры при данном эксцентриситете опорных поверхностей.

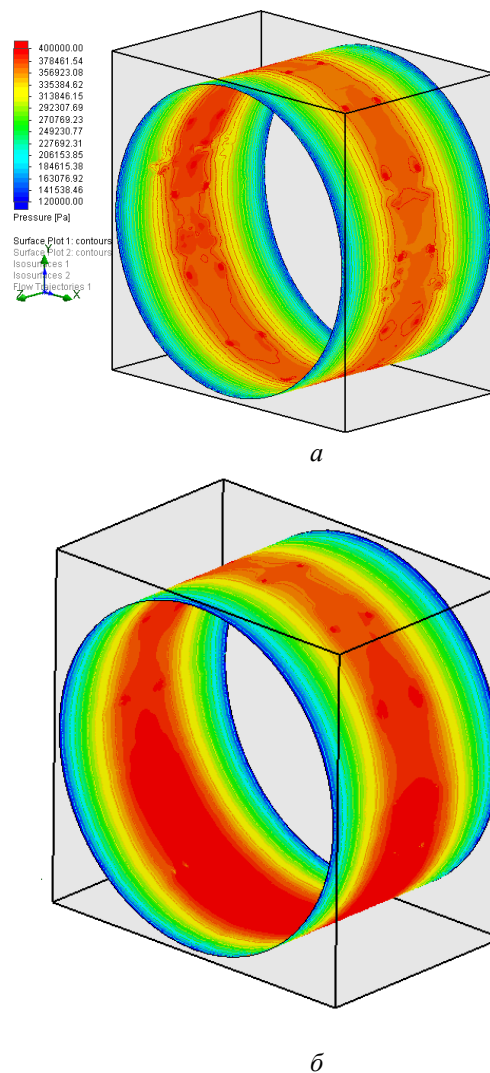


Рис. 2. Распределения давления воздушной смазки в зазоре правой газостатической опоры при эксцентриситетах $e = 0$ мкм (а) и $e = 4$ мкм (б)

При этом средний зазор в опоре $C=15$ мкм, а давление подачи воздушной смазки 6 атм. При отсутствии эксцентриситета реакция опоры близка к нулю, а при увеличении e до 4 мкм реакция опоры возрастает до 131,8 Н. Хорошо видны локальные точечные места повышения давления под питателями, рост давления по мере сужения зазора, а также постепенное снижение давление смазки в осевом направлении, где на торцах опоры она дренажируется в окружающую среду с атмосферным давлением. Выделенные цветом параллелепипеды показывают расчётный объём решаемой задачи.

На рис. 3 показано, как меняется картина распределения давления воздушной смазки в правой опоре при эксцентриситетах 8 мкм и 12 мкм.

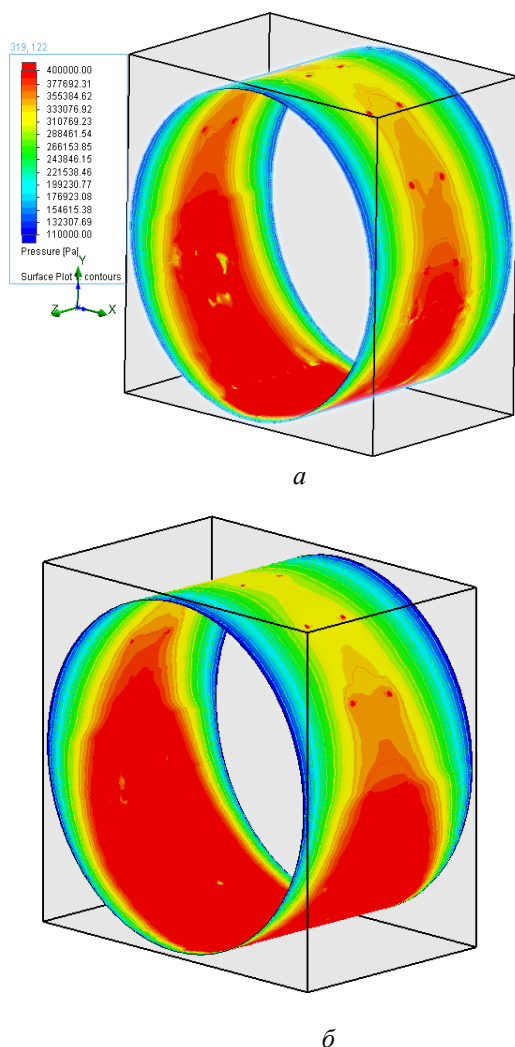


Рис. 3. Распределения давления воздушной смазки в зазоре правой опоры при эксцентриситетах $e = 8$ мкм (а) и $e = 12$ мкм (б)

При увеличении эксцентриситета до 8 мкм реакция газостатической опоры составила 371,7 Н, а при его увеличении до 12 мкм – 541,8 Н.

На рис. 4 показан фрагмент расчётной сетки,

созданной в *CFD* программе, которая включает 116500 элементов.

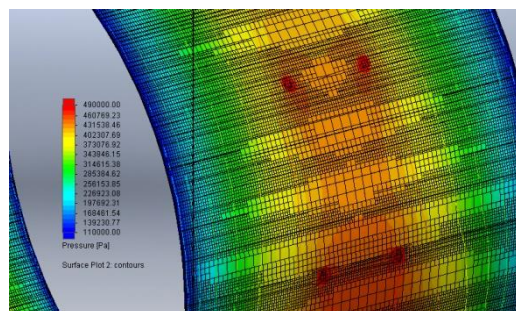


Рис. 4. Расчётная сетка

Полученные в вычислительном компьютерном эксперименте МКЭ данные по реакциям опоры W_Y (Н), расходу технологического воздуха Q (м³/ч) и жёсткости K_Y (Н/мкм) не существенно расходятся со значениями, рассчитанными аналитическим методом (МВ) в сторону уменьшения. Поэтому при проектировании шпинделя необходимо ориентироваться на значения W_Y и K_Y , полученные МКЭ, что обеспечит достаточный запас по жёсткости и несущей способности шпинделя. Для расхода воздушной смазки наоборот, приоритетными при проектировании следует считать большие значения, полученные МВ, с целью надёжного обеспечения шпинделя воздушной смазкой. Сравнение результатов, полученных двумя методами, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Метод расчёта		Значения характеристик		
		K_Y , Н/мкм	W_Y , Н	Q , м ³ /ч
МКЭ	$e=4$ мкм	33,1	131,8	1,15
	$e=8$ мкм	60,0	371,7	1,35
	$e=12$ мкм	42,6	541,8	1,34
МВ	$e=4$ мкм	51,5	206,2	1,94
	$e=8$ мкм	51,5	412,3	1,93
	$e=12$ мкм	51,9	618,5	1,92
Отклонение Δ_{cp} средних величин характеристик, %		12,1	15,6	34,2

Уровни чувствительности результатов по приращению эксцентриситета и величины зазора не превысили 1 мкм, по давлению подачи – 0,001 атм., повторяемость полученных результатов в серии одинаковых экспериментов не менее 99%.

Выводы. Вычислительные компьютерные эксперименты являются эффективным источником количественной и качественной информации о газодинамических процессах, происходящих в газостатических опорах исследуемого шпинделя.

Предложенный алгоритм вычислительного эксперимента позволяет численно определять интегральные характеристики (силы реакции, жёсткость, расход технологического воздуха)

отдельных опор и всего шпинделя. Полученные результаты характеризуются высокими уровнями достоверности, повторяемости и чувствительности к варьируемым факторам, устанавливаемым начальным и граничным условиям.

Компьютерные вычислительные эксперименты, являются наиболее прогрессивным и гибким методом расчёта параметров и характеристик газостатических опорных систем. Они позволяют выполнять уточняющие расчёты, исследовать конструктивные особенности (проточки, шероховатости, изменения формы и размеров проходных сечений и др.), которые не могут быть описаны в аналитическом решении задачи распределения параметров воздушной смазки в зазоре газостатических опор.

Л и т е р а т у р а

1. Брешев, В. Е. Анализ технических преимуществ применения аэростатических опор в шпинделях технологических машин [Текст] / В. Е. Брешев // Вестник Луганского государственного университета им. В. Даля. – Луганск: Изд-во ЛГУ, 2023. – № 7(73) – С. 141–145.

2. Космынин, А. В. Шпиндели на газовых опорах – перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов / А. В. Космынин, М. Р. Петров // Современные проблемы науки и образования. – 2006. – №6. – С. 47–48.

3. Преимущества и недостатки высокоскоростной обработки: [сайт StankoffRu]. – М., 2023. – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/981> (дата обращения: 29.10.2023).

4. Серебrenицкий, П. П. Высокоскоростная механическая обработка / П. П. Серебrenицкий: [сайт МирПром]. – URL: <https://mirprom.com/public/vysokoskorostnaya-mehanicheskaya-obrabotka.html> (дата обращения: 29.10.2023).

5. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. – М.: Наука, 1982. – 265 с.

6. Рябичев, В. Д. Аналитический метод исследования энергосберегающих опор с газовой смазкой для оборудования механической обработки [Текст] / В. Д. Рябичев, В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2021. – № 2(35). – С. 29–36.

7. Брешев, В. Е. Разработка шпинделей на регулируемых конических аэростатических опорах для технологических машин [Текст] / В. Е. Брешев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. науч. тр. XXVIII МНТК Машиностроение и техносфера XXI века, г. Севастополь, 13–19 сентября 2021 г.: тезисы докл. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2021. – Вып. 4(75) – С. 10–18.

8. Брешев, В. Е. Приводы машин на регулируемых конических аэростатических опорах: Монография / В. Е. Брешев, А. В. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 204 с.

Breshev V.E.

COMPUTATIONAL COMPUTER EXPERIMENTS IN RESEARCH OF RADIAL GAS-STATIC SUPPORTS OF A GRINDING MACHINE SPINDLE

The methodology and results of computational computer experiments based on a three-dimensional model of the gas-static support system of a grinding machine spindle are shown. Computational experiments make it possible to study gas-dynamic processes in gas-lubricated supports using the finite element method (FEM) and determine their integral characteristics - rigidity, reaction force, air lubricant consumption, etc. Gas-dynamic processes of lubricant flow in the support gap are characterized by the complexity of the distribution of parameters, therefore the analytical solution to the problem of determining rigidity and reaction force has many model simplifications, is approximate and does not take into account the design features of the supports. FEM gas-dynamic analysis is free of these disadvantages and allows one to obtain a more accurate result. The developed algorithm of calculated computer experiments of FEM and the results of determining the reaction forces, rigidity and air lubrication consumption of radial gas-static spindle supports when varying the external influence through the magnitude of the eccentricity arising in the supports are presented.

Key words: gas-static supports, spindle, computational experiment, integral characteristics.

Брешев Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: veb_lug@mail.ru

Breshev Vladimir Evgen'evich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Machines, Tools and Engineering Graphics" Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State University named after Vladimir Dahl».

Рецензент: Утутов Николай Лазаревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 31.10.2023

УДК 621.437

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ С КАСКАДНЫМ СЖАТИЕМ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Брянцев М. А., Данилейченко А. А., Ковтун А. С., Доценко Д. М.

DEFINING THE PARAMETERS OF A MOTOR WITH CASCADE FLUID COMPRESSION

Bryantsev M. A., Danileychenko A. A., Kovtun A. S., Dotsenko D. M.

Работа посвящена исследованию использования каскадного обменника давления (КОД) в качестве основного агрегата сжатия двигателя внутреннего сгорания. Изложена методика определения расхода воздуха через двигатель с каскадным сжатием (ДКС) рабочей среды и его основных геометрических характеристик при заданных параметрах сжимающей среды. На первом шаге определяется давление сжатия воздуха в ячейках в конце процесса каскадного массообмена, на втором - размеры окон отвода и подвода сжимаемой и сжимающей сред и параметры рабочих сред в сечениях этих окон.

Ключевые слова: каскадный обменник давления, каскадное сжатие, двигатель.

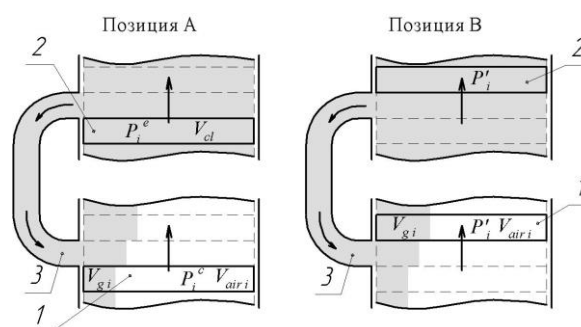
Введение. С помощью принципа каскадного обмена давлением возможно улучшить показатели тепловых машин различного назначения путем реализации сжатия газозвудушных сред в рабочем цикле установки [1-3]. В двигателе каскадного сжатия (ДКС) математическое описание рабочего процесса с приемлемой точностью может быть осуществлено с помощью объединения математических моделей процессов сгорания в тепловых двигателях и газодинамических процессов в волновых обменниках давления с математической моделью расчета каскадного обменника давления КОД. Основные положения такой модели, представленные в работе [2], описывают неустановившееся движение сжимаемых сред законами сохранения энергии, импульсов и масс с использованием численного решения уточненным методом «распад произвольного разрыва».

Для поиска первичных данных для уточненного расчета рекомендуется использовать упрощенный метод расчета, в определенной мере отражающий основные закономерности рабочего процесса ДКС. Рассмотрим основные положения расчета.

Постановка задачи. При заданных параметрах сжимающего газа и требуемом давлении сгорания определить основные геометрические размеры и расход воздуха через ДКС.

Методы решения. Расчет проводится в два этапа. На первом шаге определяется давление сжатия воздуха в ячейках ДКС в конце процесса каскадного массообмена. При этом принимается гипотеза полного баланса давления в двух сообщенных напорообменным каналом ячейках за период их коммутации в массообменный каскад. Объем массообменного канала, сообщающего смежные ячейки, представляется сосредоточенным с однородными параметрами состояния рабочего тела. Влиянием трения в потоке газа, а также теплообменом со стенками канала в рамках данной гипотезы можно пренебречь. Также предполагается отсутствие колебаний давления в напорообменных каналах на установившемся режиме работы ДКС.

Для составления математической модели каскадного массообмена рассмотрим произвольную пару ячеек сообщаемых каналом обмена давления 3 (рис.1). Когда ячейка 1 участка сжатия еще не сообщена с каналом 3 (поз. «А») ее объем V_{gi} заполнен сжимающей средой, а объем V_{airi} – воздухом сжимаемым с давлением P_i^c .



1 – ячейка участка сжатия; 2 – ячейка участка расширения; 3 – массообменный канал в статоре

Рис. 1. Схема процесса массообмена (одноступенчатого каскадного сжатия) между ячейками участка сжатия и расширения

В ячейке 2 участка расширения объемом V_{ci} до сообщения с каналом 3 находится сжимающая среда под давлением P_i^e .

После сообщения ячеек 2 и 1 каналом 3 в ячейках 1 и 2 устанавливается общее давление P_i' (поз. «В»). При этом работа расширения

сжимающей среды ячейки 2 затрачивается на увеличение давления сжимаемой среды в ячейке 1, т.е. $L_e = L_c$.

С учетом известного выражения работы идеального газа в адиабатическом процессе получим:

$$\frac{k_g}{k_g - 1} \cdot P_i^e \cdot V_{ci} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^e} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] = P_i^c \cdot \left\{ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot V_{gi} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] + \frac{k_{air}}{k_{air} - 1} \cdot V_{airi} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_{air} - 1}{k_{air}}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где k_{air} – показатель адиабаты сжимаемой среды; k_g – показатель адиабаты сжимающей среды.

После составления аналогичных уравнений для всех пар смежных ячеек в процессе каскадного массопереноса получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot P_1^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_1'}{P_1^e} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] = \frac{k_c}{k_c - 1} \cdot P_1^c \cdot \left[\left(\frac{P_1'}{P_1^c} \right)^{\frac{k_{air} - 1}{k_{air}}} - 1 \right] \\ \dots \\ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot P_i^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^e} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] = P_i^c \cdot \left\{ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_i^c} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right] \cdot \left[\left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} - 1 \right] + \frac{k_{air}}{k_{air} - 1} \cdot \left(\frac{P_a}{P_i^c} \right)^{\frac{1}{k_c}} \cdot \left[\left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_{air} - 1}{k_{air}}} - 1 \right] \right\} \\ \dots \\ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot P_{Zk}^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{Zk}'}{P_{Zk}^e} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] = P_{Zk}^c \cdot \left\{ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right] \cdot \left[\left(\frac{P_{Zk}'}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} - 1 \right] + \frac{k_c}{k_c - 1} \cdot \left(\frac{P_a}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{1}{k_c}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{Zk}'}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{k_{air} - 1}{k_{air}}} \right] \right\} \end{cases}, \quad (2)$$

где $P_1^c = P_a$ – давление конца наполнения в ячейке ДКС; $P_1' = P_r$ – остаточное давление сжимающей среды в ячейке, в момент предшествующий сообщению с окном отвода сжимающей среды; $i = 1 \dots Z_k$ – номер массообменного канала; $P_{Zk}^e = P_k$ – давление в ячейке после разобщения ее с окном отвода сжимаемой среды; $P_{Zk}^c = P_c$ – давление конца сжатия ДКС.

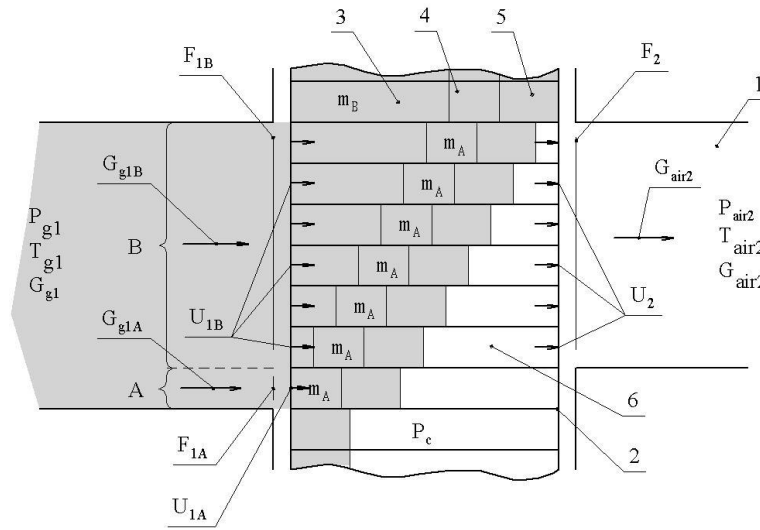
Численное значение давление конца сжатия ДКС определяется из решения системы уравнений (2).

На втором расчетном шаге определяются размеры окон высокого давления и параметры рабочих сред в сечениях окон высокого давления.

Размеры окна подвода сжимающей среды вычисляются из условия получения заданного расхода сжимающей среды. В начальный момент сообщения окна подвода сжимающей среды с ячейкой часть активной среды расходуеться на сжатие рабочей среды в ячейке до давления, установившегося в окне отвода сжимаемой среды. Контур окна подвода сжимаемой среды можно условно разделить на два участка, один из которых «А» на рис.1 охватывает участок досжатия рабочего тела в ячейке, и второй В – замещения воздуха через окно отвода сжимаемой среды (рис. 2).

В процессе предварительного подсжатия в одну ячейку поступает масса активной среды m_A :

$$m_A = \frac{V_{cl}}{R_g \cdot T_{g1}} \left[\frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_{g1}} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{air2}} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right) - \frac{P_c}{\left(\frac{P_c}{P_{air2}} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_c} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right) \right] \quad (3)$$



А – участок окна подвода сжимающей среды, охватывающий ячейку в период досжатия в ней рабочей среды; В - участок окна подвода сжимающей среды, охватывающий ячейки сосредоточенные в секторе выхода сжимаемой среды в окно отвода сжимаемой среды; 1 – окно отвода сжимаемой среды; 2 – ротор с ячейками; 3 – сжимающая среда, входящая в ячейку в процессе замещения; 4 - сжимающая среда, вошедшая в ячейку в период досжатия; 5 - сжимающая среда, вошедшая в ячейку в процессе каскадного массообмена; 6 – сжимаемая среда

Рис. 2. Схема процесса досжатия воздуха в ячейке и выхода сжатого воздуха в окно отвода сжимаемой среды.

Масса m_B активной среды, поступающей в ячейку в процессе замещения сжимаемой среды сжатого воздуха в окно отвода сжимаемой среды зависит от последовательности разобращения ячейки с окнами высокого давления.

В случае первичного разобращения ячейки с окном подвода сжимающей среды в ячейке устанавливается давление близкое к значению P_{air2} , если первично разобщи́лась ячейка с окном отвода сжимаемой среды в ячейке устанавливается давление, близкое значению P_{g1} . Тогда для первого случая масса m_B при рассмотрении идеального цикла ДКС может быть записана в виде:

$$m_B = \frac{V_{cl}}{R_g \cdot T_{g1}} \cdot \frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_{g1}}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_{air2}}\right)^{\frac{1}{k_{air}}} \quad (4)$$

Учитывая, что $\frac{G_{g1A}}{G_{g1B}} = \frac{m_A}{m_B}$, а также (3) и (4),

получим выражение для определения расхода G_{g1A} активной среды на досжатие и G_{g1B} на замещение:

$$\frac{G_{g1A}}{G_{g1B}} = \frac{\frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{air2}}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}\right) - \frac{P_c}{\left(\frac{P_c}{P_{g1}}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}\right)}{\frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_{g1}}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}} - \frac{\frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}}{\frac{P_{air2}}{\left(\frac{P_{air2}}{P_{g1}}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}}, \quad (5)$$

откуда, учитывая, что $G_{g1} = G_{g1A} + G_{g1B}$, получим расходы сжимающей среды в первом и втором участках окна подвода сжимающей среды.

Средняя скорость потока на участке «А» может быть определена по уравнению докритического стационарного истечения:

$$U_{1A} = \sqrt{2 \cdot R_g \cdot T_{g1} \cdot \frac{k_{g1}}{k_{g1}-1} \left[1 - \left(\frac{P_m}{P_{g1}}\right)^{\frac{k_g}{k_{g1}-1}} \right]}, \quad (6)$$

где $P_m = (P_{air2} + P_c)/2$ – среднее давление в ячейке в процессе «досжатия».

Площадь участка «А» окна подвода сжимающей среды определяется из уравнения неразрывности:

$$F_{1A} = \frac{G_{g1A}}{U_{1A}} \cdot \frac{R_g \cdot T_{air2} \left(\frac{P_m}{P_{g1}} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}}{P_m}. \quad (7)$$

Учитывая допущение об одномерности течения рабочих тел в окне отвода сжимаемой среды и на участке «В» окна подвода сжимающего газа при определении их расходов в граничных сечениях ячейки ротора, движение неоднородных потоков на участке стационарного течения рассматривается как однородное. При этом используются уравнения, описывающие установившееся движение газа в канале с трением при заданном отношении давлений $\frac{P_{g1}}{P_{air2}}$ на входе и выходе в граничных сечениях.

С помощью известных газодинамических функций $q(\lambda)$, $y(\lambda)$ уравнения неразрывности и движения примут вид:

$$\frac{P_{01} \cdot f_1 \cdot q(\lambda_1)}{\sqrt{T_{01}}} = \frac{P_2 \cdot f_2 \cdot y(\lambda_2)}{\sqrt{T_{02}}}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + 2 \cdot \ln(\lambda_1) \right) - \left(\frac{1}{\lambda_2^2} + 2 \cdot \ln(\lambda_2) \right) = \chi, \quad (9)$$

здесь λ_1 и λ_2 , $P_{01} = P_{g1}$ и $P_2 = P_{air2}$, – коэффициенты скорости соответственно в граничных сечениях ячейки и полное давление; f_1 и f_2 – площадь входного и выходного сечений ячейки; L_R – длина ячейки ротора, $\chi = \frac{2 \cdot k_g}{k_g + 1} \cdot \xi \frac{L_R}{d_r}$ – приведенная длина канала, где ξ – коэффициент трения; d_r – приведенный диаметр ячейки.

При адиабатическом течении однородного газа в канале постоянного сечения $T_{01} = T_{02}$ и $f_1 = f_2$ уравнение (4) примет вид:

$$y(\lambda_2) = \frac{P_{01}}{P_2} \cdot q(\lambda_1). \quad (10)$$

Коэффициенты скорости λ_1 и λ_2 в граничных сечениях ячейки определяются из решения системы уравнений (9) и (10). По существу принятое выше допущение об одномерности течений на участке «В» окна подвода сжимаемой среды и в окне отвода

сжимаемой среды, отражает условие стационарности и идентичности параметров течения во всех ячейках на участке замещения сжатого воздуха к окну отвода сжимаемой среды. При этом потери, связанные с возможными отрывными явлениями при повороте вектора абсолютной скорости потока во входных участках ячеек в процессе вращения ротора и потери при расширении живого сечения потока ввиду наличия на пути к окну отвода сжимаемой среды радиальных перемычек ячеек не учитываются.

Выражения для абсолютных скоростей рабочих сред на участке «В» окна подвода сжимающей среды и в окне отвода сжимаемой среды примут вид:

$$U_{1B} = \frac{\lambda_1}{1 + \Theta} \sqrt{\frac{k_g}{k_g - 1} R_g T_{g1}} \quad \text{и} \quad U_2 = \frac{\lambda_2}{1 + \Theta} \sqrt{\frac{k_g}{k_g - 1} R_g T_{g1}}, \quad (11)$$

где Θ – относительная степень загромождения окна радиальными перемычками между ячейками.

Площадь проходного сечения участка «В» окна подвода сжимающей среды:

$$F_{1B} = \frac{G_{g1B} \cdot R_g \cdot T_{g1}}{U_{1B} \cdot P_{g1}}. \quad (12)$$

С целью минимизации зоны перемешивания сжимаемой и сжимающей сред минимальный угловой размер участка «В» окна подвода сжимающей среды выполняется с условием размещения в секторе окна не меньше 3...4 ячеек ротора.

Для исключения обратных течений рабочей среды в выходных сечениях ячеек в зоне их сообщения с окнами высокого давления угол раскрытия окна отвода сжимаемой среды φ_2 примерно соответствует значению φ_{1B} . Поэтому:

$$F_2 \approx F_{1B}. \quad (13)$$

Расход воздуха через ДКС может быть найден по формуле:

$$G_{air2} = U_2 \cdot \frac{P_{air2}}{R_{air} \cdot T_{air2}} \cdot F_2. \quad (14)$$

Геометрические размеры ротора определяются из условия соответствия массовой пропускной способности ротора расходу сжатого воздуха в окне ВВД

$$k \cdot f_{\Sigma} \cdot L_R \cdot \frac{P_{air2}}{R_{air} \cdot T_{air2}} \cdot \frac{n_R}{60} = G_{air2} \quad (15)$$

где L_R – длина ротора; f_{Σ} – суммарная площадь сечений ячеек ротора; $k = 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент полноты замещения сжатого воздуха из ячеек ротора; n_R – количество оборотов ротора ДКС;

Из соотношения между угловым размером φ_2 окна отвода сжимаемой среды, длиной ротора L_R , частотой вращения ротора n_R , учитывая, что $f_{\Sigma} = 360 \cdot F_2 / \varphi_2$, длина ротора вычисляется по формуле:

$$L_R = \varphi_2 \cdot \frac{G_{air2} \cdot R_{air} \cdot T_a}{6 \cdot n_R \cdot P_a \cdot F_2} \quad (16)$$

Выводы. Для поиска первичных данных для уточненного расчета рекомендуется использовать упрощенный метод расчета, в определенной мере отражающий основные закономерности рабочего процесса ДКС. В методике определения расхода воздуха через ДКС и его основные геометрические размеры при заданных параметрах сжимающей среды на первом шаге определяется давление сжатия воздуха в ячейках в конце процесса каскадного массообмена, на втором – размеры окон высокого давления и параметры рабочих сред в сечениях этих окон.

Л и т е р а т у р а

1. Данилейченко А.А. Принципы организации рабочих процессов тепловых энергетических машин каскадного сжатия научной школы А.И. Крайнюка / А.А. Данилейченко, М.А. Брянец, А.С. Ковтун, Д.М. Доценко «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития - TMTL'19»: сборник научных работ. Материалы Симпозиума студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых в рамках 5-ой Международной научно-практической конференции г. Луганск, 24 - 25 апреля 2019 года. С. 274 -293.

2. Данилейченко А.А. Исследование физической сущности процессов трансформации энергии в агрегатах непосредственного взаимодействия газоздушных сред на транспорте: Монография./ Данилейченко А.А., Брянец М.А. // - Луганск: из-во ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В.Даля», 2023. 216 с.

3. Патент 105594 UA, F03G 7/06. Дисковый двигатель каскадного обмена давлением/ Ю.В. Сторчеус, О.А. Данилейченко, А.С. Ковтун, М.А. Брянец, заявл.01.10.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.

Bryantsev M.A., Danileychenko A.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M.

DEFINING THE PARAMETERS OF A MOTOR WITH CASCADE FLUID COMPRESSION

The work is devoted to the study of the use of a cascade pressure exchanger as a basic unit of an internal combustion engine. A method for determining the performance and basic geometric dimensions of a motor with cascade compression (MCC) of the working medium at given parameters of compression gas is described. At the stage of preliminary search for the initial data of the updated calculation, it is advisable to use a less laborious engineering method of calculation, which acceptably reflects the main regularities of the MCC workflow. In the first step, the pressure of pre-compression of air in the cells in the process of cascade mass transfer is determined. The second one shows the dimensions of the high-pressure windows and the parameters of the working media in the cross-sections of these windows.

Key words: cascade pressure exchanger, cascade compression, motor.

Брянец Максим Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: 280376@rambler.ru

Данилейченко Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: 280376@rambler.ru

Ковтун Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: 280376@rambler.ru

Доценко Данил Михайлович, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: 280376@rambler.ru

Bryantsev Maksim Anatolievich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» «LSU named after V. Dahl».

Danileychenko Alexander Anatolievich, candidate of sciences, a dosent of the chair « Internal combustion engines», «LSU named after V. Dahl».

Kovtun Alexander Sergeevich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» «LSU named after V. Dahl».

Dotsenko Danil Mikhailovich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Нечаев Григорий Иванович, док-р. техн. наук, профессор кафедры «Транспортные технологии» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 08.11.2023

УДК 621.22

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

Бугаенко В. В., Гусенцова Я. А., Красногрудов А. В., Кочнева О. В.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF METHODS FOR REGULATING THE SPEED OF THE OUTPUT LINK OF A VOLUMETRIC HYDRAULIC DRIVE

Bugaenko V., Gusentsova Ya., Krasnogradov A., Kochneva O.

Рассматриваются различные способы регулирования скорости выходного звена объемного гидравлического привода.

Показано, что потери энергии в системе регулирования гидропривода с нерегулируемыми гидромашинами и регулятором, установленным параллельно двигателю, зависят от характера нагрузки, и, например, для привода вентилятора не превышают 17 % от номинальной мощности насоса (мощности при расчетном режиме).

Приведены основные расчетные зависимости для расчета эффективности систем регулирования. Проанализированы на основе экспериментальных данных потери мощности при различных схемах подключения регулятора.

Ключевые слова: гидравлический привод, нерегулируемые гидравлические машины, скорость, исполнительный регулирующий орган, эффективность

Введение. Объемный гидравлический привод используется в различных областях промышленности. Гидроприводы обладают рядом преимуществ, основные из них: возможность получения больших сил и мощностей при ограниченных размерах гидродвигателей; высокое быстродействие с обеспечением требуемого качества переходных процессов; широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости при условии хорошей плавности движения; возможность защиты гидросистемы от перегрузки, точного контроля действующих сил и ряд других. Гидроприводы имеют достаточно высокий КПД, повышенные жесткость и долговечность. Обширная номенклатура механизмов управления позволяет оптимальным образом использовать гидроприводы для автоматизации производственных процессов в различных отраслях техники [1, 2, 5]. При этом, регулирование скорости выходного звена может быть осуществлено с использованием различного сочетания регулируемых и нерегулируемых машин. Понятно, что наиболее дешевым является привод с нерегулируемыми насосом и мотором, поэтому **актуальным** является вопрос об экономичности каждой схемы.

Изложение основного материала. Для идеального привода (отсутствие утечек, потерь давления, несжимаемая жидкость, КПД машин одинаковы и равны):

$$Q_{но} = Q_{мо}; \quad q_n n_n = q_m n_m; \\ \bar{n} = \frac{n_m}{n_n}; \quad \varphi = \frac{q_n}{q_m}; \quad \bar{n} = \varphi. \quad (1)$$

Приводная мощность насоса и мощность на валу гидромотора:

$$N_{но} = q_n n_n p_n; \quad N_{мо} = q_m n_m p_m; \\ p_n = p_m = p_o; \quad N_n = N_m. \quad (2)$$

В этих выражениях: q_n, q_m – рабочие объемы насоса и мотора; n_n, n_m – частота вращения валов насоса и мотора; p_o – давление жидкости на выходе насоса и входе в мотор; $\bar{n}$ – относительная частота вращения вала мотора; φ – параметр регулирования.

Отсюда приходим к естественному выводу, что при объемном способе регулирования скорости, для идеального привода, потери связанные с процессом регулирования, отсутствуют, т.е. этот способ является наиболее экономичным. Учитывая это обстоятельство, рассмотрим характеристики реального гидравлического привода.

Уравнение неразрывности для нагнетательной линии привода:

$$Q_{но} = Q_{мо}; \quad q_n n_n \eta_{он} = q_m n_m / \eta_{ом}. \quad (3)$$

Из уравнения неразрывности получаем:

$$n_m = \frac{q_n}{q_m} \eta_{он} \eta_{ом} n_n. \quad (4)$$

Теоретические исследования и результаты опытов с машинами различных типов показывают,

что утечки рабочей жидкости в объемных гидромашинах (насосах и моторах) практически линейно зависят от перепада давления. Это объясняется малой величиной зазоров между движущимися частями, достаточно высокой вязкостью рабочей жидкости, что обеспечивает ламинарный режим течения в них. Поэтому

$$\eta_{ом} = \frac{n_n q_n - k_n p_n}{n_n q_n} \quad \eta_{ом} = \frac{n_m q_m}{n_m q_m + k_m p_m} \quad (5)$$

Коэффициенты k_n и k_m характеризуют степень совершенства конструкции гидромашин и могут быть найдены для каждой конкретной машины.

Объёмный КПД системы гидропривода, состоящей из двух одностипных машин (насоса и гидромотора), можно представить следующим образом:

$$\eta_{о зп} = \frac{q_n n_n - k_n p_n - k_m p_m}{q_n n_n}, \quad (6)$$

где $\eta_{о зп}$ - объёмный КПД гидропривода.

В объемных гидравлических приводах охлаждающих устройств обычно насос и мотор – машины одного типа. Поэтому, можно принять $k_m \cong k_n = k$ и, пренебрегая гидравлическими потерями в линии нагнетания ($p_n \cong p_m = p$)

$$\eta_{о зп} = \frac{q_n n_n - 2kp}{q_n n_n} = 1 - \frac{2kp}{q_n n_n}. \quad (7)$$

Регулировочная характеристика:

$$n_m = \frac{q_n}{q_m} \eta_{о зп} n_n. \quad (8)$$

Давление p_m на входе в гидромотор:

$$p_m = \frac{2\pi M}{q_m}, \quad (9)$$

определяется характером нагрузки, т.е. зависимостью момента M от частоты вращения [3, 4]. Для охлаждающих устройств нагрузкой является осевой вентилятор, для которого

$$M = e n_m^2. \quad (10)$$

Здесь e - постоянный коэффициент.

Откуда

$$p = \frac{2\pi e n_m^2}{q_m}, \quad (11)$$

и регулировочная характеристика:

$$n_m = \frac{q_n}{q_m} \left(1 - \frac{4k\pi e n_m^2}{q_n q_m n_n} \right). \quad (12)$$

Экономичность работы привода оценим коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{N_m}{N_n}. \quad (13)$$

Приводная мощность насоса и выходная мощность гидромотора:

$$N_n = q_n n_n p_n / \eta_{он} \eta_{зп} \eta_{мн}; \\ N_m = q_m n_m p_m \eta_{ом} \eta_{зм} \eta_{мм}.$$

Отсюда

$$\eta = \frac{q_m n_m p_m}{q_n n_n p_n} (\eta_{он} \eta_{ом}) (\eta_{зп} \eta_{зм}) (\eta_{мн} \eta_{мм}),$$

или с учётом (7)

$$\eta = \frac{q_m n_m p_m}{q_n n_n p_n} (\eta_{о зп}) (\eta_{зп} \eta_{зм}) (\eta_{мн} \eta_{мм}) \quad (14)$$

В этих выражениях p_n , p_m – давления на выходе насоса и входе в гидромотор. Связь между ними может быть выражена на основании уравнения Бернулли:

$$p_n = p_m + \Delta p_{пот} \cong p_m + \zeta Q_n^2 \cong p_m + \zeta (q_n n_n)^2. \quad (15)$$

где ζ – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление нагнетательного трубопровода, зависящий от местных и путевых потерь. Если насос и мотор – машины одного типа, то их гидравлические и механические КПД можно считать одинаковыми. Кроме того, механический КПД мало зависит от частоты вращения, поэтому

$$\eta = \frac{q_m n_m p_m}{q_n n_n p_n} \eta_z^2 \eta_m^2 (\eta_{о зп}). \quad (16)$$

Учитывая зависимости (1), (3), (5), (7), определим потери энергии в системе гидропривода

$$\eta = \varphi \bar{n} \frac{2\pi e \bar{n}^2}{2\pi e \bar{n}^2 + \zeta q_m q_n^2} \left(1 - \frac{4k\pi e \bar{n} n_m}{q_n q_m} \right) \eta_z^2 \eta_m^2, \quad (17)$$

или

$$\eta = \varphi \bar{n} \frac{2\pi e \bar{n}^2}{2\pi e \bar{n}^2 + b} (1 - a \bar{n}) \eta_z^2 \eta_m^2. \quad (18)$$

В этом выражении:

$$b = \zeta q_m q_n^2; a = \frac{4k\pi en_m}{q_n q_m^2}. \quad (19)$$

Напомним еще раз, что потери энергии, связанные непосредственно с процессом регулирования при объемном способе отсутствуют, а система уравнений (3, 7, 8) определяет экономичность реального привода с учетом всех видов потерь. Наиболее типичной схемой при этом является: регулируемый насос, работающий при постоянной частоте вращения ($q_n = \text{var}$, $n_n = \text{const}$), и нерегулируемый мотор ($q_m = \text{const}$, $n_m = \text{var}$).

Рассмотрим работу системы гидропривода при дроссельном регулировании. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для исследования работы гидропривода при дроссельном регулировании.

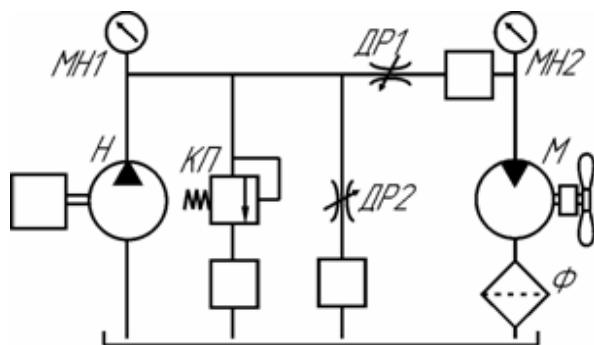


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для анализа эффективности дроссельного способа регулирования рассмотрена схема гидропривода вентилятора с использованием объемных гидромашин постоянной производительности.

Результаты исследований. Система гидравлического привода вентилятора охлаждающей системы (рис. 1) состоит из объемного насоса Н, соединенного непосредственно с валом электродвигателя, на валу гидромотора М установлен вентилятор. Предохранительный клапан КП предохраняет систему от перегрузки, а также используется в качестве переливного клапана при дроссельном регулировании с последовательно установленным дросселем (дроссель ДР1). Два регулируемых дросселя ДР1 и ДР2 установлены параллельно и последовательно с гидромотором. Эти дроссели имитируют регуляторы температуры и позволяют исследовать соответственно две схемы регулирования – с последовательной и параллельной установкой дросселя в системе охлаждения. Кроме того, на экспериментальном стенде установлены расходомеры и манометры МН1 и МН2.

Отметим, что на экспериментальном стенде имелась возможность моделировать различного

вида нагрузки, а контрольно-измерительная аппаратура позволяла с достаточной точностью определять основные параметры привода.

При сравнении эффективности различных схем предполагалось, что потери в гидравлических линиях пренебрежимо малы, а гидромотор и насос – идеальны. Кроме того, в расчетном режиме работы привода подача насоса и расход через гидромотор одинаковы.

Связь между частотой вращения вала гидромотора n и моментом на его валу M_g (моментом нагрузки):

$$M_g = M_0 + en^k \cong en^k, \quad (20)$$

где M_0 – момент трения в подшипниках, который обычно пренебрежимо мал по сравнению с полезной нагрузкой;

k – показатель, характеризующий тип нагрузки (для вентилятора $k = 2$).

Относительная мощность, на валу гидромотора (отнесенная к мощности на расчетном режиме):

$$\bar{N}_g = \frac{N_g}{N_0} = \frac{nM_g}{n_0M_{g0}} = \bar{n}^{(k+1)}, \quad (21)$$

где $\bar{n} = n/n_0$ – относительная частота вращения вала гидромотора.

Для схемы с регулятором, установленным последовательно с гидродвигателем (дроссель ДР1, рис. 1), давление перед предохранительным клапаном можно принять постоянным и оно определяется его настройкой. Поэтому мощность, потребляемая приводом, также постоянна. В этом случае относительные потери мощности:

$$\bar{N}_n = 1 - \bar{n}^{(k+1)}. \quad (22)$$

Когда регулятор установлен параллельно гидродвигателю (дроссель ДР2, рис. 1), давление в линии нагнетания является величиной переменной и определяется моментом нагрузки. В соответствии с принятым выше условием, при расчетном режиме давление на выходе насоса имеет максимальную величину.

$$\bar{p} = \bar{n}^k.$$

Относительный расход через гидромотор пропорционален частоте вращения его вала

$$\bar{Q}_m = \bar{n}$$

и потери энергии в системе гидропривода:

$$\bar{N}_n = (1 - \bar{n})\bar{n}^k. \quad (23)$$

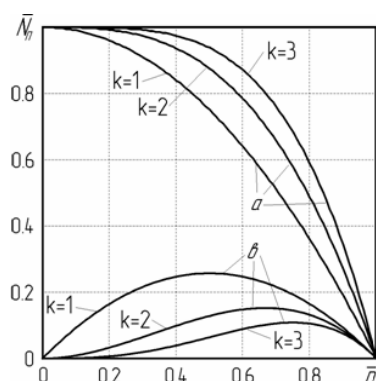


Рис. 2. Потери мощности при различных схемах подключения регулятора.
 а – для схемы с ДР1 и б – для схемы с ДР2

Выводы. Сравнение уравнений (22) и (23) показывает, что потери в схеме с дросселем, установленным параллельно, всегда меньше, чем в схеме с дросселем, установленным последовательно (рис. 2). Максимальное значение разность потерь механической энергии для двух способов включения дросселя достигает при $\bar{n} = 0$. С увеличением значения относительной частоты вращения эта разность убывает и стремится к нулю при приближении относительной частоты вращения вала гидромотора к значению $\bar{n} = 1$.

Этот вывод подтвержден экспериментально. Результаты экспериментов выполненных в лаборатории кафедры гидрогазодинамики Луганского государственного университета имени Владимира Даля приведены на рис. 2 (предварительная проверка адекватности подтвердила адекватность приведённых выше зависимостей). Сравнение различных схем показывает, что потери в схеме с дросселем, установленным параллельно, всегда меньше, чем в схеме с дросселем, установленным последовательно и для привода вентилятора ($k = 2$) не превышают 17 % от номинальной мощности насоса (мощности при расчетном режиме) (рис. 2).

Результаты проведенных исследований также показывают, что эффективность работы гидропривода при дроссельном регулировании может достигать достаточно высокого уровня, что согласуется с результатами других исследований [6].

Л и т е р а т у р а

1. Гидравлика, гидравлические, пневматические машины и системы приводов / А.А. Коваленко, Я.А. Гусенцова, Н.Д. Андрийчук и [др.]. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 582 с.
2. Гидравлика и гидропневмоприводы / Андрийчук Н.Д., А.В. Вялых, А.А. Коваленко и [др.]. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2008. – 320 с.
3. Определение гидродинамической силы, действующей на золотник в статике / Я. А. Гусенцова, В. В. Бугаенко, А. Т. Павленко, И. К. Максют // Вестник Луганского государственного университета имени

Владимира Даля. – 2021. – № 11(53). – С. 40-43. – EDN ROXOZN.

4. Alim A. Kovalenko, Vladimir A. Gogaisel. Static and Dynamic Characteristics of a Hydraulic Actuator for the Automobile's Cooling Fan – Vietnam, Journal of Polytechnic University. – Hanoi, 2008.

5. Wilson, W.E., Positive-Displacement Pumps and Fluid Motors, Pitman Publishing Corporation, 1960.

6. Бугаенко В.В. Дроссельный способ регулирования. Сравнительные характеристики. /В.В. Бугаенко, Е.В. Брюховецкая. - Научный журнал «Вестник Луганского национального университета имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ». – № 11 (17), 2018. – С. 17 – 26.

Bugaenko V., Gusentsova Ya., Krasnogradov A., Kochneva O.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF METHODS FOR REGULATING THE SPEED OF THE OUTPUT LINK OF A VOLUMETRIC HYDRAULIC DRIVE

Various ways of regulating the speed of the output link of a volumetric hydraulic drive are considered.

It is shown that the energy losses in the hydraulic drive control system with unregulated hydraulic machines and a regulator installed parallel to the motor depend on the nature of the load, and, for example, for the fan drive do not exceed 17% of the nominal pump power (power in the design mode). The main calculation dependencies for calculating the efficiency of control systems are given. Power losses under various controller connection schemes are analyzed on the basis of experimental data.

Keywords: hydraulic drive, unregulated hydraulic machines, speed, executive regulatory body, efficiency.

Бугаенко Виктор Васильевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Гидрогазодинамика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

E-mail: victorvas49@gmail.com

Гусенцова Яна Алимовна, д.т.н., профессор, профессор кафедры пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: gusentsova@gmail.com

Красногрудов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: krasnogradov@mail.ru

Кочнева Ольга Владимировна, к.т.н., доцент высшей школы автоматизации и робототехники института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: kochneva_ov@spbstu.ru

Bugaenko Viktor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Hidrogazodinamika «LSU named after V. Dahl».

Gusentsova Yana, Doctor of Technical Sciences, professor, Professor of the Department of Fire Safety of «LSU named after V. Dahl».

Krasnogradov Alexander, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fire Safety of the Institute of Civil Protection of the «LSU named after V. Dahl»

Kochneva Olga, Candidate of Science, associate

Professor, Higher school of automation and robotics, Institute of mechanical engineering, materials and transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University.

Рецензент: Семин Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрогазодинамики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 31.10.2023

УДК 67.02/ 67.08

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Капустин Д. А., Кущенко А. В., Швыров В. В., Сентяй Р. Н.

NUMERICAL METHODS FOR DETERMINING PRESSURE LOSS DURING THE FLOW OF NON-NEWTONIAN FLUIDS

Kapustin D. A., Kushchenko A. V., Shvyrov V. V., Sentyay R. N.

В статье представлен обзор различных численных методов, применяемых для определения потерь давления при течении неньютоновских жидкостей в трубопроводах. Исследование включает в себя анализ методов конечных элементов, конечных объемов, гидродинамического сглаживания, конечных разностей, сеточных методов и методов кинетической теории. Каждый метод рассматривается в контексте особенностей и преимуществ его использования для решения задачи определения потерь давления при течении неньютоновских жидкостей. Результаты анализа могут быть важными для оптимизации проектирования трубопроводных систем с учетом реологических характеристик неньютоновских жидкостей, в частности, характеристик водоугольного топлива. Для рассматриваемых методов изучены возможности использования библиотек Python для их реализации.

Ключевые слова: модель течения, неньютоновская жидкость, водоугольное топливо, потери давления, скорость сдвига, численные методы, Python.

Введение. Задача определения потерь давления при течении неньютоновских жидкостей в трубопроводах естественным образом возникает в самых различных областях промышленности. Многие жидкости, такие как полимеры, буровые растворы, краски, масла, водоугольное топливо (ВУТ) – обладают нелинейными реологическими свойствами. Для описания течения неньютоновских жидкостей используются сложные математические модели. Понимание характеристик потерь давления в процессе течения таких жидкостей помогает инженерам и проектировщикам разрабатывать более эффективные и энергосберегающие системы передачи и распределения жидкостей. В частности, угледобывающая отрасль требует эффективных технологических решений для максимизации производства и одновременного снижения негативных воздействий на окружающую среду. Оптимизация систем транспортировки угольных суспензий и других неньютоновских жидкостей становится критическим аспектом для обеспечения

надежности и эффективности процессов. Важнейшим фактором при проектировании трубопроводных систем транспортирования водоугольного топлива является получение исходных параметров для расчетов гидравлических потерь и, следовательно, мощности перекачивающих агрегатов. Исходные данные, характеризующие диссипативные свойства суспензий, основываются на реометрических испытаниях образцов водоугольных суспензий.

Несмотря на многочисленные исследования [1, 2, 3], вопрос корректного определения реологических характеристик угольных суспензий остается открытым до сих пор. Это приводит к необходимости развития методов расчета характеристик течения неньютоновских жидкостей, с целью повышения эффективности работы гидротранспортных систем. В связи с чем, задача совершенствования теоретических основ движения неньютоновских жидкостей является актуальной.

Математические формулировки задач, связанных с неизоэнтальпическими течениями неньютоновских сред, настолько сложны, что аналитическое решение удается получить только в исключительных сценариях. В связи с этим важную роль играет выбор численных методов решения, а также определение конкретных программных инструментов для реализации вычислений.

Целью исследования является анализ численных методов определения потерь давления при течении неньютоновских жидкостей, включая методы конечных элементов, конечных объемов, гидродинамического сглаживания, и определение актуальных программных средств для их реализации.

Изложение основных материалов. Рассмотрим течение неньютоновской жидкости в канале круглого сечения радиуса R (рис. 1). Выполним вывод основных уравнений, используя аналогичные изложения для ньютоновской жидкости.

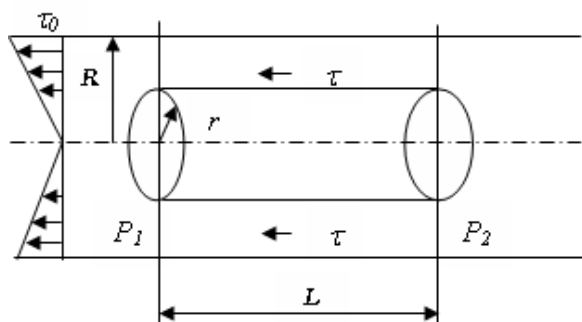


Рис. 1. Течение неньютоновской жидкости

В рассмотрение введем гипотезу о постоянстве давлений в пределах сечения канала (отсутствие влияния весовых давлений).

Выделим два сечения 1-1 и 2-2 в которых давления равны p_1 и p_2 . Диаметр трубопровода вдоль потока не меняется, следовательно, средняя скорость жидкости будет постоянной, а коэффициент кинетической энергии α вдоль потока будет неизменен.

Запишем уравнение Бернулли для выбранных сечений

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_{mp},$$

где h_{mp} - потери напора на трение по длине трубопровода, м.

Из последнего уравнения имеем

$$h_{mp} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}.$$

В потоке жидкости выделим цилиндрический объем радиусом r , соосный с трубой. Запишем уравнение равномерного движения выделенного объема

$$\Delta p \cdot \pi r^2 = 2\pi r L \cdot \tau.$$

Получаем выражение для касательных напряжений

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot r}{2L}.$$

Если реологические свойства жидкости не зависят от времени, то реологическое уравнение, связывающее касательное напряжение и скорость сдвига записывается в виде $\gamma' = f(\tau)$. При течении жидкости в круглых трубах имеем

$$\frac{du}{dr} = -f(\tau).$$

Соотношения между средней скоростью течения и перепадом давления для различных

неньютоновских жидкостей зависят от вида функции $f(\tau)$. Эта функция может являться аппроксимацией экспериментальных данных, полученных на вискозиметрах.

Определение потерь давления при течении неньютоновских жидкостей является сложной задачей, и для её решения применяются различные численные методы, а также используются различные модели описывающие течение неньютоновских жидкостей. В целом, эффективным инструментом исследования течений таких жидкостей является численное моделирование. Теоретические основы численного моделирования течений неньютоновских жидкостей можно найти в монографии [4], а также в работах [5, 6, 7]. Процесс решения можно условно разбить на следующие этапы: разделение области решения на дискретные элементы, аппроксимация дифференциальных уравнений, и реализация алгоритма решения системы алгебраических уравнений на компьютере.

Одной из основных трудностей при численном моделировании потока в вязкопластической среде является наличие сингулярности в реологических соотношениях и невозможность расчета напряжений в областях, где скорость деформации равна нулю. Для преодоления этой проблемы широко применяются методы регуляризации. Типичной особенностью течения жидкостей с ненулевым пределом текучести является требование построения решения в области с неизвестной границей. Неопределенность тензора напряжений при превышении предела текучести и наличие в потоке квазитвердых ядер вносят дополнительные сложности в численное моделирование.

Рассмотрим наиболее распространенные методы и подходы решения данной задачи.

1. Метод конечных элементов. Значительный вклад в развитие использования данного метода для решения задачи о течении жидкости был сделан Зенкевичем и Чунгом в работе [8]. Данный метод широко используется для моделирования течения неньютоновских жидкостей в различных условиях [9-12]. Он разбивает сложные геометрии на более простые элементы для аппроксимации уравнений движения.

Распространенным инструментом для реализации вычислений с использованием метода конечных элементов является вычислительная платформа FEniCS [13], которая предоставляет мощные инструменты для численного решения уравнений в частных производных. Также, вычисления могут быть выполнены с использованием библиотеки SfePy [14]. Для языка C++ возможно использование библиотеки deal.II (Differential Equations Analysis Library) [15].

2. Метод конечных объемов. В 1970-х годах был достигнут значительный прогресс в решении задач моделирования течения в областях с сложной геометрией. Метод конечных объемов стал широко используемым инструментом для дискретизации

уравнений гидродинамики. Основой данного метода является интегральная формулировка законов сохранения массы, импульса, энергии. Поскольку использование интегральной формулировки законов сохранения не налагает ограничений на форму контрольного объема, метод конечных объемов остается пригодным для дискретизации уравнений гидрогазодинамики как на структурированных, так и на неструктурированных сетках с разнообразной формой ячеек. Это, в принципе, полностью решает проблему сложной геометрии расчетной области [16].

Метод конечных объемов поддерживается вычислительной платформой OpenFOAM [17], а также SU2 (Stanford University Unstructured) [18].

Общая схема решения задачи определения расхода и гидравлических потерь в каналах и трубах с учетом реологических особенностей течения неньютоновских жидкостей с использованием метода конечных объемов (МКО), имеет вид:

1. Задание геометрии изучаемой системы, включая форму каналов и труб, размеры и структуру сетки.

2. Формулирование уравнений. В частности, выражение уравнений сохранения массы и импульса для нестационарного течения неньютоновской жидкости с учетом реологических свойств среды, таких как вязкость и потенциально нелинейные зависимости течения от напряжения.

3. Дискретизация полученных уравнений. Данный этап включает в себя разбиение на конечные объемы и применение интегральной формы уравнений для каждого объема, используя метод конечных объемов.

4. Нахождение численного решения системы дискретизированных уравнений. Обычно используются явные или неявные методы временной дискретизации и методы решения системы линейных или нелинейных уравнений для каждого временного шага.

5. Учет граничных условий для каналов и труб, например, задавая давление или расход входящей или выходящей жидкости.

6. Расчет расхода и гидравлических потерь.

7. Анализ результатов расчетов, включая расход, распределение давления, и гидравлические потери. На этом этапе также выполняется оценка

влияния различных параметров, таких как вязкость или концентрация, на характеристики потока.

8. Проверка результатов, включая сравнение с экспериментальными данными, если таковые имеются, чтобы убедиться в корректности вашего численного подхода.

Одним из наиболее распространенных методов нахождения численного решения уравнений характеризующих течение неньютоновских жидкостей является алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [19], который представляет собой итерационный метод для решения уравнений Навье-Стокса в контексте численного моделирования нестационарных течений жидкости. Разработанный для применения в вычислительной гидродинамике (CFD), этот алгоритм включает в себя следующие ключевые этапы:

1. Итерационный процесс. Начальные значения полей скорости и давления выбираются для начала итерационного процесса. Производится последовательная коррекция полей скорости и давления в рамках итерационного цикла. Задаем поле давления $\{p_{ij}^*\}$.

2. Разделение уравнений. Уравнения Навье-Стокса разделяются на два блока - предсказатель скорости и давления. Блок для оценки скорости решает уравнения для предварительного приближения поля скорости.

Блок для оценки давления используется для коррекции поля давления и уточнения поля скорости.

3. Решаются уравнения для предварительного приближения скорости, учитывая нелинейные и конвективные члены.

$$\begin{cases} aP_{i+1j}(v_x^*)_{i+1j} = \sum_{nb} a_{nb}(v_x^*)_{nb} + d_{i+1j}(p_{ij}^* - p_{i+1j}^*), \\ bP_{ij+1}(v_x^*)_{ij+1} = \sum_{nb} b_{nb}(v_y^*)_{nb} + l_{ij+1}(p_{ij}^* - p_{ij+1}^*). \end{cases}$$

4. Коррекция давления. Применяется уравнение для коррекции давления, которое обеспечивает коррекцию поля давления с учетом выполнения уравнения непрерывности $p = p^* + \omega p' (0 < \omega < 1)$

Решаем систему уравнений

$$\begin{aligned} & [(v_x^*)_{i+1j} - (v_x^*)_{ij}]h_y + [(v_y^*)_{ij+1} - (v_y^*)_{ij}]h_x + \left[\frac{d_{i+1j}}{aP_{i+1j}}(p_{ij}' - p_{i+1j}') - \right. \\ & \left. - \frac{d_{ij}}{aP_{ij}}(p_{i-1j}' - p_{ij}')h_y + \left[\frac{l_{ij+1}}{bP_{ij+1}}(p_{ij}' - p_{ij+1}') - \frac{l_{ij}}{bP_{ij}}(p_{ij-1}' - p_{ij}')h_x \right] \right] h_x = 0 \end{aligned}$$

и находим поправку для давления $\{p_{ij}'\}$.

5. Коррекция скорости. Поле скорости корректируется с использованием скорректированного поля давления.

6. Итеративное обновление. Шаги 3-5 повторяются до достижения сходимости итерационного процесса.

Алгоритм SIMPLE обладает способностью учета вязкости и переноса массы в течениях

жидкости, что делает его эффективным инструментом для численного моделирования течений в трубопроводах и каналах в инженерной практике.

3. *Метод гидродинамического сглаживания.* Метод гидродинамического сглаживания (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [20] представляет собой численный метод решения уравнений гидродинамики, особенно эффективный для моделирования динамики жидких сред и их взаимодействия с твердыми телами. SPH основан на представлении физических величин в виде сглаженных ядер, которые распределены по всему пространству. В этом методе жидкость моделируется как ансамбль частиц, каждая из которых представляет собой небольшой объем жидкости.

В методе гидродинамического сглаживания используются различные уравнения для моделирования различных физических характеристик частиц. Основные уравнения в SPH включают уравнение плотности, уравнение состояния, уравнение движения и уравнение энергии. Данный метод активно развивается, но показывает более точные результаты при моделировании течения жидкостей со свободной поверхностью.

Для использования данного метода можно использовать библиотеку PySPH [21].

Рассмотрим более детально процесс моделирования течения неньютоновской жидкости в трубопроводе для оценки потерь давления с использованием библиотеки FEniCS. FEniCS поддерживает создание более сложных сеток с использованием техники, называемой «конструктивная твердотельная геометрия» (CSG), которая позволяет определить геометрию в терминах простых форм (примитивов) и операций над множествами: объединение, пересечение и разность множеств. Операции с множествами кодируются в FEniCS с использованием операторов + (объединение), * (пересечение) и - (разность множеств). Для доступа к функциональности CSG в FEniCS необходимо импортировать модуль FEniCS mshr, который предоставляет расширенную функциональность построения сеток в FEniCS. Геометрию для задачи тестирования потока в цилиндре легко определить, сначала определив прямоугольный канал, а затем вычитая круг:

```
channel = Rectangle(Point(0, 0), Point(2.2, 0.41))
cylinder = Circle(Point(0.2, 0.2), 0.05)
domain = channel - cylinder
```

Для создания сетки, необходимо вызвать функцию `generate_mesh`:

```
mesh = generate_mesh(domain, 64)
```

Параметр 64 указывает, на то, что будут созданы 64 ячейки вдоль длины канала. Для реализации моделирования течения в трубопроводе необходимо задание граничных условий:

```
inflow = 'near(x[0], 0)'
outflow = 'near(x[0], 2.2)'
walls = 'near(x[1], 0) || near(x[1], 0.41)'
cylinder = 'on_boundary && x[0]>0.1 && x[0]<0.3 && x[1]>0.1 && x[1]<0.3'
```

В данном коде мы выбираем все точки, которые лежат в пределах $[0.1, 0.3] \times [0.1, 0.3]$, комбинирование условий дает возможность выбрать только точки лежащие на границе (рис. 2.)

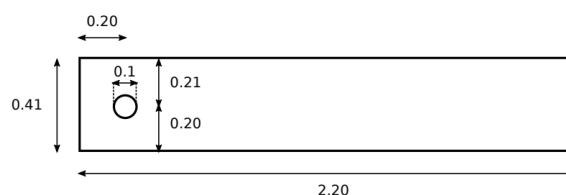


Рис. 2. Схематическое описание геометрии течения в FEniCS

Далее, необходимо добавить индикатор выполнения решения и задать шаг решения

```
progress = Progress('Time-stepping')
set_log_level(PROGRESS)
# Time-stepping
t = 0.0
for n in range(num_steps):
    # Update current time
    t += dt
    # Place computation here
    # Update progress bar
    progress.update(t / T)
```

Эффективное решение линейных систем, возникающих из дискретизации уравнений с частными производными, требует выбора хорошего итерационного метода. Для этой задачи можно использовать стабилизированный метод бисопряженных градиентов (BiCGSTAB) и метод сопряженных градиентов. Это можно сделать, добавив ключевые слова `bicgstab` или `cg` при вызове функции `solve`.

```
solve(A1, u1.vector(), b1, 'bicgstab',
'hypre_amg')
solve(A2, p1.vector(), b2, 'bicgstab',
'hypre_amg')
solve(A3, u1.vector(), b3, 'cg', 'sor')
```

Для последующей обработки данных, будем сохранять полученные результаты в файл на каждом шаге.

Для визуализации скорости возможно использование фильтра `Glyph` для отображения

векторного поля скорости. Для визуализации давления фильтра Warp By Scalar (рис. 3 и рис. 4, соответственно)

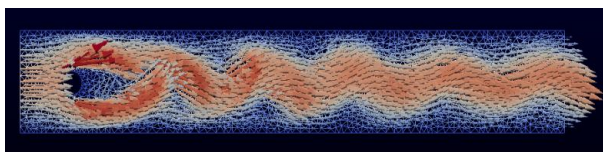


Рис. 3. Визуализация скорости для тестовой задачи с течением по цилиндру в конечный момент времени

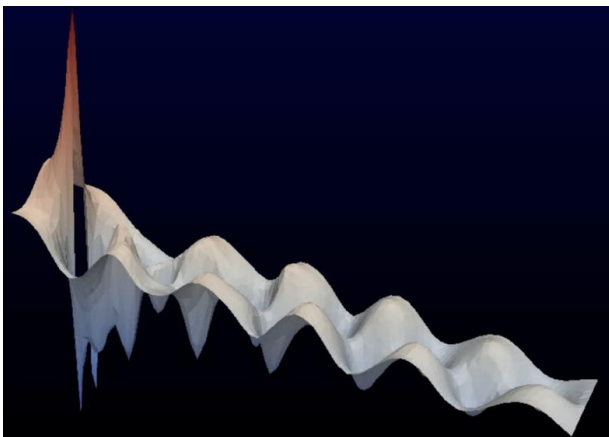


Рис. 4. Визуализация поля давления для тестовой задачи с течением по цилиндру в конечный момент времени

Следует отметить, что использование для расчета потерь давления при течении водоугольного топлива приведенных выше численных методов, не целесообразно, в связи с высокими значениями вязкостных характеристик ВУТ и ламинарным режимом его движения. При этом в инженерной практике более ценным является именно суммарное значение потерь гидравлической энергии в трубопроводной системе, что связано с подбором насосного оборудования. С целью упрощения расчета перепада давления, перспективным является внедрение графического метода его вычисления и адаптации данного подхода для использования в виртуальной среде, что позволит сократить время на определения гидравлических показателей и минимизировать затрачиваемые ресурсы при сохранении достаточной точности вычислений.

Выводы:

1. В работе представлен обзор численных методов для решения задачи определения потерь давления при течении неньютоновских жидкостей. Установлено, что основным подходом к решению данной задачи является моделирование течения таких жидкостей и вычисление полей скорости и давления. Наиболее распространенным методом моделирования в данном контексте является метод конечных объемов и алгоритм SIMPLE.

2. Определены наиболее распространенные программные средства для решения задач оценки потерь давления при течении неньютоновских жидкостей. Установлено, что наиболее

распространены такие средства как FEniCS, OpenFoam, deal.II, SU2.

3. Приведена общая схема выполнения моделирования течения неньютоновской жидкости в трубопроводе с заданной геометрией в среде FEniCS.

4. Целесообразно использовать графический метод определения потерь давления, адаптированный для реализации в программной среде персонального компьютера.

Л и т е р а т у р а

1. Кондратьев А.С. Транспортирование водоугольных суспензий: гидродинамика и температурный режим / А.С. Кондратьев, В.М. Овсянников, Е.П. Олофинский и др. – М.: Недра, 1988. – 218 с.
2. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации: дис. доктора техн. наук/ Круть Александр Анатольевич. – Днепропетровск, 2011. – 279 с.
3. Андрийчук, Н.Д. Гидравлические системы для ВУТ: моделирование, оптимизация: монография / Н.Д. Андрийчук, М.В. Пилавов, А.А. Коваленко, А.М. Шворникова, Г.С. Калужный, Д.А. Капустин. – Луганск: ВНУ им. В.Даля, 2013. – 239 с.
4. Борзенко Е.И. Течения неньютоновской жидкости со свободной поверхностью / Е.И. Борзенко, Г.Р. Шрагер. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 2022. – 208 с.
5. Warsi Z.U.A. Fluid dynamics / Z.U.A. Warsi // Theoretical and Computational Approaches. - FL: Taylor & Francis, CRC Press, 2005. – P. 215-223.
6. Якутенок В.А., Борзенко Е.И. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью на основе метода SIMPLE / В.А. Якутенок, Е.И. Борзенко // Математическое моделирование. – М., 2007. - Т.19, № 3. - С. 52–58.
7. Борзенко Е.И. Течение неньютоновской жидкости со свободной поверхностью / Е.И. Борзенко, Г.Р. Шрагер // Инженерно-физический журнал. – Томск, 2016. - Т. 89, № 4. - С. 901–909.
8. Zienkiewicz O.C. Finite elements in the solution of field problems / O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung // The Engineer. – London, 1965. Vol. 220. - pp. 507-510.
9. Oden J.T. The finite element method in fluid mechanics / J.T. Oden // Finite element methods in continuum mechanics, - Cambridge, 1973. - pp. 151-186.
10. Lewis R.W. Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow / R.W. Lewis, P. Nithiarasu, K.N.Seetharamu. – New York: John Wiley & Sons, 2004. – 341 p.
11. Mu Y. Modeling and simulation of three-dimensional planar contraction flow of viscoelastic fluids with PTT, Giesekus and FENE-P constitutive models / Y. Mu, G.Q. Zhao, X.H. Wu, J.Q. Zhai // Applied Mathematics and Computation. – London: ScienceDirect, 2012. Vol. 218. - pp. 8429-8443.
12. Reddy J.N., Gartling D.K. The finite element method in heat transfer and fluid dynamics / J.N. Reddy, D.K. Gartling. – Florida: CRC Press, 2010. – 489 p.
13. The FEniCS computing platform : official site. – URL: <https://fenicsproject.org/> (дата обращения: 05.12.2023).

14. Cimrman R. Multiscale finite element calculations in Python using SfePy / R. Cimrman, V. Lukeš, E. Rohan // *Advances in Computational Mathematics*. – New York: Springer Publishing, 2019. Vol.45. – pp. 1897-1921.

15. Deal.II : an open source finite element library. – URL: <https://dealii.org/> (дата обращения: 05.12.2023).

16. Смирнов Е. М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – Санкт-Петербург, 2004. – №2(36). – С.70-81

17. OpenFOAM : official home of The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. – URL: <https://www.openfoam.com/> (дата обращения: 05.12.2023)

18. SU2 v8.0.0 Harrier : an open source finite element library. – URL: <https://su2code.github.io/> (дата обращения: 05.12.2023).

19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.

20. Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics / J.J. Monaghan // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. – San Mateo: Annual Reviews, 1992. Vol. 30. Iss. 1. – pp. 543–574.

21. PySPH: A Python-Based Framework for Smoothed Particle Hydrodynamics / P. Ramachandran, A. Bhosale, K. Puri and other // *ACM Transactions on Mathematical Software*. – New York: Association for Computing Machinery, 2021. – №4 (47) (31 December 2021). – pp. 1-38. DOI: <https://doi.org/10.1145/3460773>.

Kapustin D.A., Kushchenko A.V., Shvyrov V.V., Sentyay R.N.

NUMERICAL METHODS FOR DETERMINING PRESSURE LOSS DURING THE FLOW OF NON-NEWTONIAN FLUIDS.

The article provides a review of various numerical methods applied to determine pressure losses in the flow of non-Newtonian fluids in pipelines. The study includes an analysis of finite element methods, finite volume methods, hydrodynamic smoothing methods, finite difference methods, mesh methods, and lattice Boltzmann methods. Each method is considered in the context of its features and advantages for solving the problem of determining pressure losses in the flow of non-Newtonian fluids. The analysis results can be crucial for optimizing the design of pipeline systems, taking into account the rheological characteristics of non-Newtonian fluids, particularly those of coal-water slurry. The possibilities of implementing these methods using Python libraries are explored.

Key words: flow model, non-Newtonian fluid, water-coal fuel, pressure losses, shear rate, numerical methods, Python.

Капустин Денис Алексеевич, к.т.н., заведующий кафедрой «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.

E-mail: kap-kapchik@mail.ru

Кущенко Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Транспортные технологии» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: akm48848@gmail.com

Швыров Вячеслав Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.

E-mail: slavik_asas@mail.ru

Сентяй Роман Николаевич, старший преподаватель кафедры «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.

E-mail: sentyayroman@yandex.ru

Kapustin Denis Alekseevich, Candidate of Sciences, a head of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Kushchenko Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Sciences, a dosent of the Chair «Transport technologies», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk Vladimir Dahl State University».

Shvyrov Vyacheslav Vladimirovich, Candidate of Sciences, a docent of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Sentyay Roman Nikolaevich, Senior Lecturer of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Рецензент: Семин Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор кафедры «Гидрогазодинамика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 25.12.2023

УДК 621.694

УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУЙНОГО НАСОСА-СМЕСИТЕЛЯ

Квенцель А. Л., Ремень В. И.

REFINED MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS AND CHARACTERISTICS OF THE JET MIXING PUMP

Kventsel A. L., Remen V. I.

Разработана одномерная математическая модель течения капельной жидкости в струйном насосе-смесителе с учетом неравномерности поля скоростей в контрольных живых сечениях. Рассчитаны и проанализированы безразмерные рабочие характеристики, выражающие зависимость относительного напора от коэффициента эжекции и относительной площади сопла, при различной относительной плотности жидкости потоков. Получены экстремальные характеристики струйного аппарата при режимах работы с малыми коэффициентами эжекции, что характерно для рабочего процесса струйного насоса-смесителя.

Ключевые слова: математическая модель, струйный насос-смеситель, безразмерные рабочие характеристики, относительный напор, коэффициент эжекции, относительная площадь сопла и относительная плотность потоков.

Введение. Во многих производствах требуется получение двух- или многокомпонентных смесей, в которых доля одного компонента существенно меньше доли другого. Например, создание водомазутной смеси в качестве топлива для теплоэнергетики с целью снижения вредных выбросов,

Добавление легирующих элементов в масло для получения качественных смазочно-охлаждающих жидкостей, парафиновых паст в бетонную смесь с целью получения водостойкого бетона в строительной отрасли, растительного масла в воду с целью получения гидрофильной смеси, смесь воды и малого количества органических масел широко применяется в фармакологии и медицине и др. Во всех вышеперечисленных технологических процессах предъявляются жесткие требования к получению смеси, а именно строго дозированное количество добавок, вносимых в несущую среду, и их тщательное гомогенизирование. Для получения таких смесей целесообразно использовать струйный насос-смеситель, в котором активный поток (высоконапорный) является несущей средой (например, жидкость), а пассивный поток (эжектируемая среда) – необходимые добавки для

получения смеси. При этом работа струйного насоса-смесителя осуществляется, как правило, в режиме малых относительных расходов пассивного потока. Связано это с тем, что в качестве эжектируемой среды используются компоненты, объемный расход которых, по сравнению с расходом активного потока, мал.

Струйные насосы широко применяются в различных отраслях промышленности: энергетике, металлургии, машиностроении, нефтяной, химической и др. Как правило, струйные аппараты выполняют технологические процессы продолжительное время и непрерывно. Поэтому, сравнительно малое увеличение их эффективности приводит к существенной экономии энергии и снижению затрат.

Известные методы расчета струйных насосов ориентированы, главным образом, на разработку аппарата с высокой производительностью (подачей) по эжектируемой среде. Для производств, где требуется получение смеси с малыми расходами эжектируемой среды по сравнению с расходом активной среды, предложенные методы расчета не точны. При таком режиме работы значительное влияние на характеристики оказывает неравномерность распределения скорости потоков в живых сечениях аппарата. Экспериментальные исследования влияния степени неравномерности потока на режим работы струйного насоса представлены в публикациях [1, 3]. В работе [3, 4] приводят уточненное выражение характеристики струйного насоса, неравномерность поля скорости потока смеси в цилиндрической камере смешения. При этом авторы исследований [1, 3] учитывали неравномерность распределения скоростей только в сечениях на выходе из камеры смешения, а неравномерность скорости на срезе сопла и входе в камеру смешения струйного насоса не рассматривалась. Проведенный обзор литературы, посвященной струйным аппаратам, позволяет сделать нижеследующие выводы:

I. Струйный насос представляет собой комплексную машину, а именно дозатор-смеситель-

насос. Рабочий процесс струйного насоса-смесителя включает следующие этапы: 1) подготовка состава смеси, т.е. дозирование компонентов. Это достигается тем, что соотношение расходов пассивного и активного потоков в аппарате определяется размерами проточной части и полными давлениями на входных и выходном патрубках; 2) приготовление смеси – перемешивание компонентов происходит благодаря интенсивному обмену количеством движения между потоками в рабочей камере; 3) транспорт продукта – на выходе аппарата образуется поток готовой смеси с заданным расходом и напором, необходимым для транспорта потребителю.

II. Известные методы расчета струйного насоса ориентированы, главным образом, на разработку аппаратов с высокими коэффициентами эжекции. Методов расчета эжекторов с малыми коэффициентами эжекции и кавитационными явлениями в проточной части обнаружить не удалось.

Целью настоящей работы является исследование и совершенствование рабочего процесса струйного насоса-смесителя на малых коэффициентах эжекции с целью повышения

эффективности его работы. Для достижения цели необходимо следующие решить задачи:

1. Выполнить анализ исследований рабочего процесса эжектора.

2. Исследованием течения жидкости в проточной части струйного насоса-смесителя выявить степень неравномерности распределения скорости в контрольных сечениях и области с локальным снижением давления.

3. Разработать математическую модель рабочего процесса струйного насоса-смесителя и апробировать ее численными исследованиями.

4. Определить экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя, выражающие предельно достижимые возможности рабочего процесса на бескавитационных режимах.

Изложение основных материалов. Уточненная одномерная физико-математическая модель расчета струйного насоса - смесителя.

Расчетная схема насоса-смесителя показана на рис. 1, там же представлена геометрия проточной части аппарата и указаны характерные живые сечения ($i=0,1...5$) – границы отдельных его элементов.

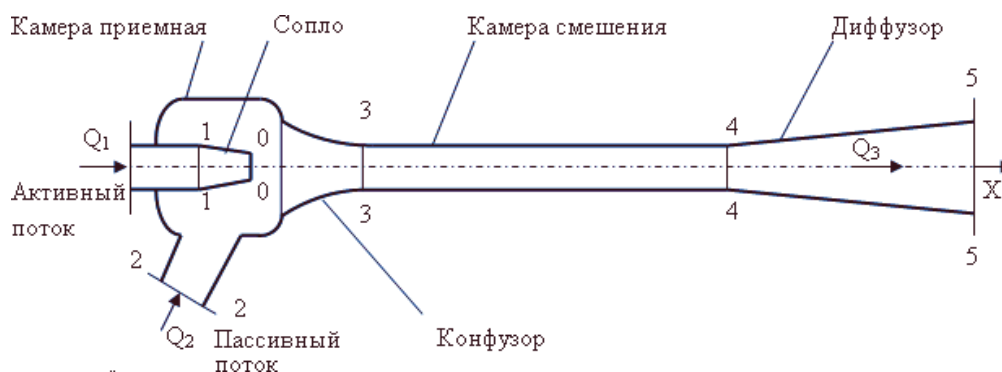


Рис. 1. Расчетная схема струйного насоса-смесителя

Рассмотрим установившийся режим работы струйного насоса-смесителя, сопло которого отодвинуто от камеры смешения и срез сопла располагается в приемной камере. В последующем полагаем, что давление в контрольных живых сечениях насоса-смесителя распределены равномерно, жидкости являются несжимаемыми и однородными. Математическая модель рабочего процесса гидроструйного насоса основывается на

уравнениях баланса расходов, количества движения, энергии активного, пассивного и потока смеси с использованием экспериментальных коэффициентов. Составим уравнение Д. Бернулли для пассивного потока на участке между живыми сечениями входа в приемную 2-2 и смесительную камеру 3-3.

Запишем равнение в более компактной форме:

$$H_2 = \frac{P_3}{\rho_{\Pi} \cdot g} + (\alpha_{3\Pi} + \zeta_{ex}) \cdot \frac{v_{3\Pi}^2}{2g},$$

$$\frac{P_2}{\rho_{\Pi} \cdot g} + \alpha_{2\Pi} \cdot \frac{v_{2\Pi}^2}{2 \cdot g} = \frac{P_3}{\rho_{\Pi} \cdot g} + \alpha_{3\Pi} \cdot \frac{v_{3\Pi}^2}{2 \cdot g} + \zeta_{ex} \cdot \frac{v_{3\Pi}^2}{2 \cdot g},$$
(1)

где P_i – статическое давление потока в i -м сечении струйного насоса: $i=0,1...5$ – номер живого сечения аппарата; ρ_k – плотность k -го потока; $k= a, n, см.$ –

индекс соответствующий активному (a), пассивному (n) или потоку смеси ($см.$); $P/\rho_k g$ – статический напор k -го потока в i -м сечении; v_{ik} – средняя по

сечению скорость потока; $v_{ik}^2/2g$ - динамический напор k -го потока в i -м сечении; α_{ik} -коэффициент кинетической энергии в i -м сечении k -го потока (коэффициент Кариолиса);

$\zeta_{вх}$ - коэффициент гидравлического сопротивления входного участка в смесительную камеру

$$P_3 \cdot A_3 - P_4 \cdot A_4 - F_{TP} = \beta_{4см} \cdot \rho_{см} \cdot Q_4 \cdot v_{4см} - \beta_{0а} \cdot \rho_a \cdot Q_1 \cdot v_{0а} - \beta_{3П} \cdot \rho_{П} \cdot Q_2 \cdot v_{3П}. \quad (2)$$

Здесь A_i - площадь i -ого сечения струйного насоса, F_{TP} - сила трения по длине смесительной камеры:

$$F_{TP} = \tau \cdot \pi \cdot d_{ск} \cdot l_{ск};$$

τ - осредненные по длине камеры пристенные касательные напряжения; $d_{ск} \cdot l_{ск}$ - диаметр и длина смесительной камеры насоса; β_{ik} - коэффициенты количества движения в i -м сечении k -го потока; Q_i - объемный расход жидкости в i -м живом сечении струйного насоса.

Пристенные касательные напряжения выражаются формулой [3, 5]:

$$\tau = \lambda \cdot \rho_{см} \cdot \frac{v_{4см}^2}{8}, \quad (3)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения.

Учитывая, что коэффициент сопротивления смесительной камеры $\zeta_T = \lambda \cdot l_{ск} / d_{ск}$, сила трения может быть выражена в следующем виде:

$$F_{TP} = \zeta_{TP} \cdot A_{ск} \cdot \rho_{см} \frac{v_{4см}^2}{2},$$

где $A_{ск}$ - поперечная площадь рабочей камеры.

Принимая во внимание, что $Q_i = v_i \cdot A_i$ при равенстве площадей живых сечений камеры смешения $A_i = A_4 = A_{см}$, преобразуем следующим образом выражение (2):

$$P_3 - P_4 = \zeta_T \cdot \rho_{см} \frac{v_{4см}^2}{2} + \beta_{4см} \cdot \rho_{см} \cdot v_{4см}^2 - \beta_{0а} \cdot \rho_a \cdot \frac{A_0}{A_3} \cdot v_{0а}^2 - \beta_{3П} \cdot \rho_{П} \cdot \frac{A_3 - A_0}{A_3} \cdot v_{3П}^2. \quad (4)$$

Запишем уравнение Д. Бернулли для потока смеси в диффузоре:

$$H_5 = \frac{P_4}{\rho_{см} \cdot g} + \alpha_{4см} \cdot \frac{v_{4см}^2}{2g} - \zeta_D \cdot \frac{v_{4см}^2}{2g}, \quad (5)$$

где ζ_D - коэффициент сопротивления диффузора.

Совместное решение уравнений (1), (4) и (5) позволяет получить выражение для повышения напора у пассивного потока в струйном насосе-смесителе.

$$H_5 - H_2 = (\alpha_{4см} - 2\beta_{см} - \zeta_T - \zeta_D) \cdot \frac{v_{4см}^2}{2g} + \beta_{0а} \cdot \frac{A_0}{A_3} \cdot \frac{v_{0а}^2}{g} + \beta_{3П} \cdot \frac{A_3 - A_0}{A_3} \cdot \frac{v_{3П}^2}{g} - (\alpha_{3П} + \zeta_{вх}) \cdot \frac{v_{3П}^2}{2g}. \quad (6)$$

Запишем уравнение Д. Бернулли для потока активной жидкости в сопловом устройстве между сечениями 1-1 и 0-0:

$$\frac{P_1}{\rho_a \cdot g} + \alpha_{1а} \cdot \frac{v_{1а}^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_a \cdot g} + \alpha_{0а} \cdot \frac{v_{0а}^2}{2g} + \zeta_c \cdot \frac{v_{0а}^2}{2g}. \quad (7)$$

Упростим выражение (7):

$$H_1 = \frac{P_2}{\rho_a \cdot g} + (\alpha_{0a} + \zeta_c) \cdot \frac{v_{0a}^2}{2g}, \quad (8)$$

где ζ_c - коэффициент сопротивления сопла.

$$H_1 - H_2 = (\alpha_{0a} + \zeta_c) \cdot \frac{v_{0a}^2}{2g}. \quad (9)$$

Примем допущение – $H_2 = P_2/\rho_a \cdot g$. В результате получим выражение разности напоров активного и пассивного потоков на входе в струйный насос:

Запишем уравнение баланса объемных расходов:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

Выразим объемный расход через среднюю скорость и площадь: поперечного сечения потока:

$$\rho_{см} \cdot v_{4см} \cdot A_3 = \rho_a \cdot v_{0a} \cdot A_0 + \rho_{II} \cdot v_{3II} \cdot (A_3 - A_0),$$

из которого получим выражение для плотности потока смеси:

$$\rho_{см} = \rho_a \cdot \left[\frac{v_{0a}}{v_{4см}} \cdot \frac{A_0}{A_3} + \frac{\rho_{II}}{\rho_a} \cdot \frac{v_{3II}}{v_{4см}} \cdot \frac{(A_3 - A_0)}{A_3} \right]. \quad (13)$$

Работа механического насоса характеризуется тремя параметрами: напорами потока на входе и выходе и его подачей. Работа струйного насоса характеризуется шестью параметрами: напорами и расходами активного, пассивного и суммарного

$$v_{4см} \cdot A_3 = v_{0a} \cdot A_0 + v_{3II} (A_3 - A_0) \quad (11)$$

$$v_{4см} = v_{0a} \cdot \left[\frac{A_0}{A_3} + \frac{v_{3II}}{v_{0a}} \cdot \frac{(A_3 - A_0)}{A_3} \right].$$

Уравнение баланса массовых расходов струйного насоса выявляет зависимость плотностей активного, пассивного и суммарного потоков:

$$m_3 = m_1 + m_2 \quad (12)$$

m_i - объемный расход жидкости в i -м живом сечении струйного насоса.

Представим массовый расход как произведение плотности среды, средней скорости, площади поперечного сечения. Тогда уравнение баланса массовых расходов примет следующий вид:

потоков. Для простоты анализа характеристик струйных аппаратов принято исследовать ирассчитывать устройство в безразмерных (относительных) параметрах [3, 4]: относительное повышение напора: $h = (H_5 - H_2) / (H_1 - H)$.

$$h = \frac{\left[2 \cdot \Omega \left(\beta_{0a} + \beta_{3II} \cdot \frac{\Omega}{(1-\Omega)} \cdot \delta \cdot q^2 \right) + (\alpha_{4см} - 2 \cdot \beta_{4см}) \cdot (1 + \delta \cdot q) \cdot \Omega^2 \cdot (1 + q)^2 \right]}{(\alpha_{0a} + \zeta_c)} - \frac{\alpha_{3II} \cdot \delta \cdot \left(\frac{q \cdot \Omega}{1-\Omega} \right)^2 - (\zeta_I + \zeta_D) \cdot (1 + \delta \cdot q) \cdot \Omega^2 \cdot (1 + q)^2 - \zeta_{ex} \cdot \delta \cdot \left(\frac{q \cdot \Omega}{1-\Omega} \right)^2}{(\alpha_{0a} + \zeta_c)}. \quad (14)$$

Работа на входе в смесительную камеру (коэффициент скольжения) $W = v_{3II} / v_{0a}$; относительный расход (коэффициент эжекции) $q = Q_2 / Q_1$; относительная плотность $\delta = \rho_{II} / \rho_a$. Вместе с тем безразмерные параметры изменяются в следующих пределах: относительный напор $0 \leq h \leq 1$ и относительный расход $0 \leq q \leq (1 - \Omega) / \Omega$, где $\Omega = A_0 / A_3$ относительная площадь сопла, изменяется в пределах $0 \leq \Omega < 1$. Взаимосвязь

безразмерных параметров определяется выражением: $q = W(1 - \Omega) / \Omega$.

Результат совместного решения уравнений (6), (9), (11), (13) с применением выражений относительных параметров представлен аналитическим выражением основной характеристики струйного насоса-смесителя, представляющим зависимость относительного напора от коэффициента эжекции:

Если принять в формуле (14) коэффициенты $\alpha_{\text{кк}}$ и $\beta_{\text{кк}}$, учитывающие неравномерность распределения скоростей в контрольных живых сечениях, равными единице, получим известное выражение напорной характеристики [4].

Уравнение (14) представляет относительное повышение напора пассивного потока в струйном насосе. Первые три слагаемых в квадратных скобках при равномерном распределении скорости в живых сечениях выражают повышение напора в идеальном (без сопротивлений) аппарате, а остальные – потери напора в камере смешения и диффузоре.

Характеристики струйного насоса-смесителя. Уравнение (14) позволяет по известным параметрам активного и пассивного потоков на входе в насос-смеситель найти параметры потока смеси на его выходе и рассчитать характеристики аппарата. Численное решение уравнения (14) представлено на рис. 2 семейством безразмерных напорных характеристик идеального струйного насоса-смесителя (сопротивления проточной части отсутствуют, распределение скорости – равномерное) с однородными средами ($\delta=1$) при различной геометрии проточной части – относительном размере сопла $0 < \Omega < 1$.

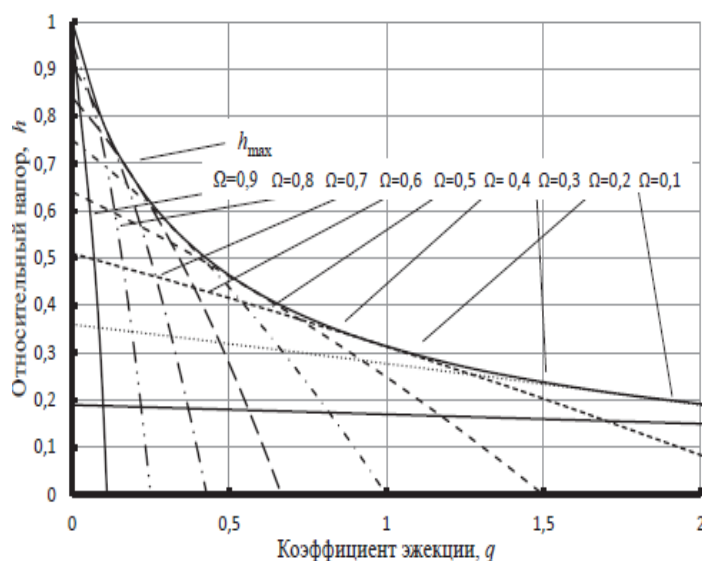


Рис. 2. Напорные характеристики струйного насоса-смесителя

Анализируя графики на рис. 2, видно, что с уменьшением относительного расхода пассивного потока растет относительный напор, принимая максимальное значение при $q=0$ (режим холостой работы струйного насоса-смесителя). При этом относительный напор тем выше, чем больше относительная площадь сопла. Множество безразмерных напорных характеристик определяют область возможных режимов работы струйного насоса-смесителя. Эта область ограничена полуосьми абсцисс и ординат, и границей предельных значений относительного напора – огибающей семейства напорных характеристик. Последняя устанавливает предельно – достижимые значения параметров рабочего процесса струйного насоса.

Каждому числовому значению относительного расхода соответствует предельное значение относительного напора, которое может обеспечить гидроструйный насос-смеситель с оптимальной относительной площадью сопла. Анализируя выражение (14) на экстремум, можно определить предельно – достижимый относительный напор и оптимальное значение относительной площади

сопла при всем множестве значений относительного расхода [4].

Запишем условие нахождения экстремума в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \Omega} h = 0. \quad (15)$$

При различных значениях коэффициента эжекции q , коэффициентах сопротивления проточной части, относительной плотности δ определялись значения оптимальной относительной площади сопла $\Omega_{\text{опт}}$ и соответствующие максимальные значения относительного напора h_{max} .

Некоторые результаты численного решения системы уравнений (14) – (15) представлены на рис. 3-9 семейством экстремальных характеристик, включающих зависимости относительного напора (вогнутые линии) и оптимальной относительной площади сопла (выпуклые линии) от коэффициента эжекции.

При этом распределение скоростей активного, пассивного и потока смеси в контрольных живых сечениях принималось равномерным, т.е. $\alpha_{\text{ик}} = \beta_{\text{ик}} = 1$.

На рис. 3 показано влияние гидравлического сопротивления сопла ζ_c , а на рис. 4...8 влияние относительной плотности δ , сопротивления камеры

смешения и диффузора $\zeta_t + \zeta_d$ на экстремальные характеристики.

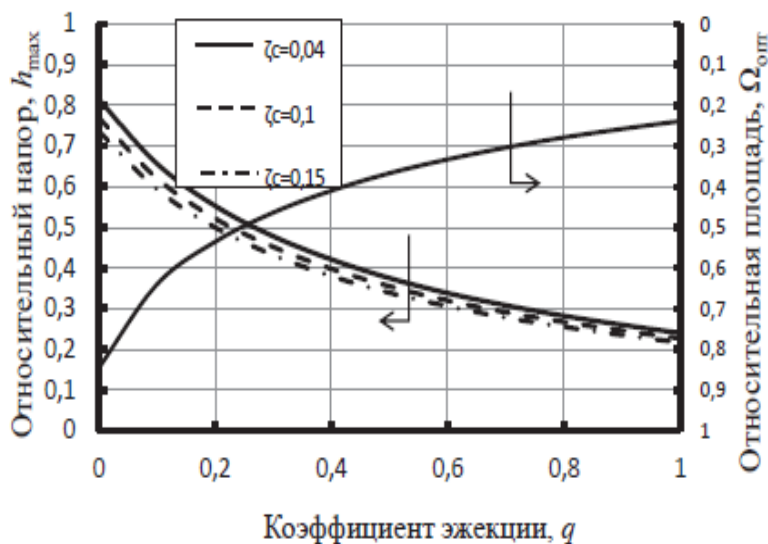


Рис. 3. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях сопла

Потоки приняты однородными $\delta=1$, сопротивление входа в смесительную камеру равно $\zeta_{вх} = 0,1$, а камеры смешения и диффузора — $\zeta_t + \zeta_d = 0,18$.

Для значений относительной плотности пассивного потока $\delta = 0,6; 1; 1,4; 2; 2,5$ на рис. 2.4 – 2.8 представлены экстремальные характеристики относительного напора h_{max} (вогнутые линии) и оптимальной относительной площади Ω_{opt} (выпуклые линии).

На каждом рисунке построено семейство характеристик для различных коэффициентов сопротивления камеры смешения и диффузора: $\zeta_t + \zeta_d = 0,1; \zeta_t + \zeta_d = 0,18; \zeta_t + \zeta_d = 0,24; \zeta_t + \zeta_d = 0,3; \zeta_t + \zeta_d = 0,35$ и неизменных коэффициентов сопротивления сопла $\zeta_c = 0,06$ и входа в смесительную камеру $\zeta_{вх} = 0,1$.

При этом распределение скорости потока в контрольных живых сечениях аппарата принято равномерным.

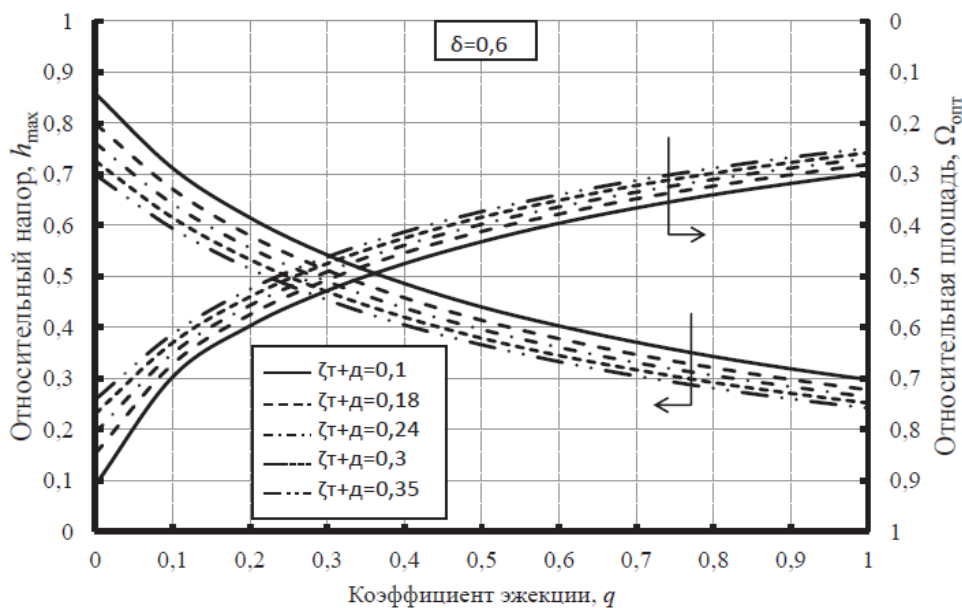


Рис. 4. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях камеры смешения, диффузора и относительной плотности $\delta=0,6$

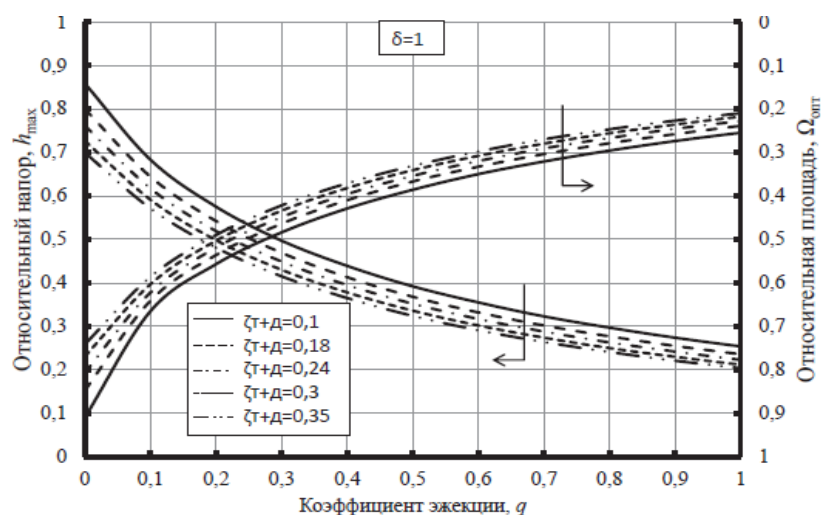


Рис. 5. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях камеры смешения, диффузора и относительной плотности потоков $\delta=1$

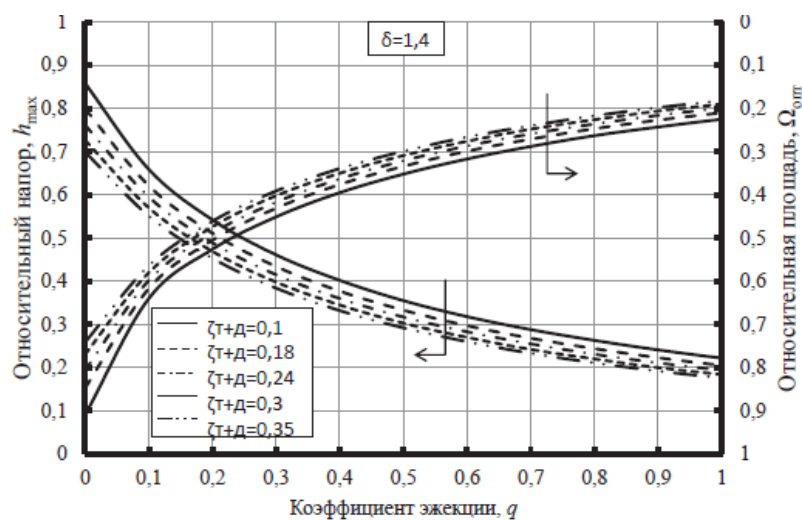


Рис. 6. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях камеры смешения и диффузора, относительной плотности потоков $\delta=1,4$

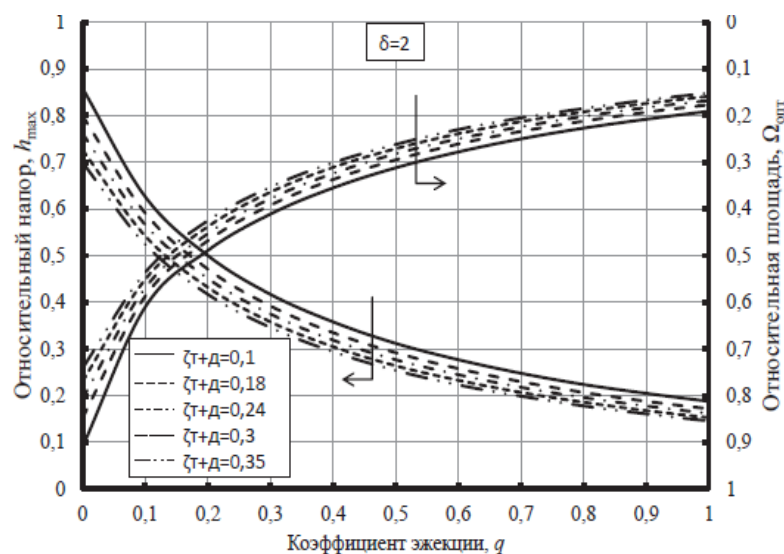


Рис. 7. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях камеры смешения, диффузора и относительной плотности потоков $\delta=2$

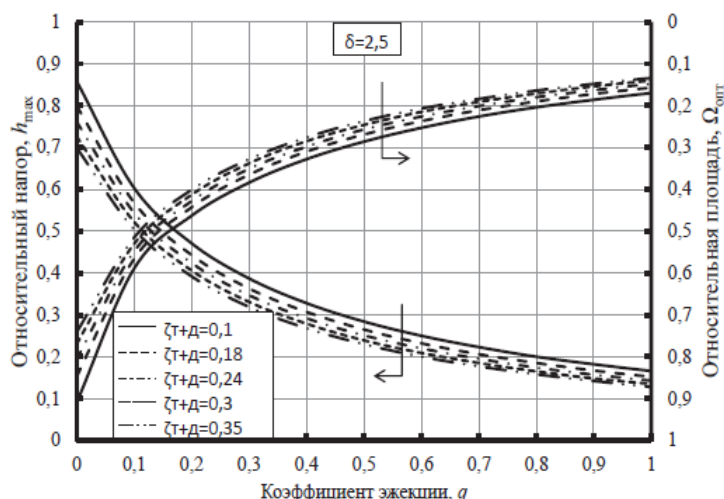


Рис. 8. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных сопротивлениях камеры смешения, диффузора и относительной плотности потоков $\delta=2,5$

Анализ экстремальных характеристик струйного насоса-смесителя на рис. 3 – 8 свидетельствует о следующем:

1. Увеличение гидравлического сопротивления сопла, смесительной камеры и диффузора при прочих равных условиях приводит к уменьшению достижимого напора и оптимальной относительной площади сопла. Причем степень снижения относительного напора с ростом гидравлического сопротивления элементов проточной части возрастает с уменьшением коэффициента эжекции q . Например, при коэффициенте эжекции $q=0,7$ достижимый относительный напор снижается на $\Delta h_{\max} = 8\%$ с увеличением гидравлического сопротивления элементов проточной части, а при $q = 0,1$ – на $\Delta h_{\max} = 12\%$.

2. С увеличением относительной плотности пассивного потока величина достижимого относительного напора снижается, и тем интенсивней, чем меньше коэффициент эжекции аппарата.

Влияние неравномерности распределения скорости течения сред в контрольных сечениях проточной части струйного насоса-смесителя на его характеристики.

Неравномерность распределения скорости в живых сечениях потока учитывают при записи уравнений количества движения и Д. Бернулли коэффициентами количества движения β_{ik} (Буссинеска) и кинетической энергии α_{ik} (Кариолиса) [6]. Коэффициент Буссинеска β_{ik} представляет собой отношение действительного количества движения потока жидкости в данном сечении к количеству движения, вычисленному по средней скорости:

$$\beta_{ik} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \left(\frac{u}{v} \right)^2 dA, \quad (16)$$

А коэффициент Кариолиса α_{ik} отношение истинной кинетической энергии потока жидкости в рассматриваемом сечении к кинетической энергии вычисленной по средней скорости.

$$\alpha_{ik} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \left(\frac{u}{v} \right)^3 dA, \quad (17)$$

где u – местная скорость по i -му сечению аппарата площадью A_i ;

v – средняя скорость в i -ом сечении аппарата.

Взаимосвязь коэффициентов определяется формулой [3, 6]:

$$\alpha_{ik} \approx 3 \cdot \beta_{ik} - 2. \quad (18)$$

Влияние степени неравномерности профиля скорости течения сред в контрольных живых сечениях на экстремальные характеристики гидроструйного насоса-смесителя изображены на рис. 9. Характеристики рассчитывались с равномерным (коэффициенты Кориолиса и Буссинеска приняты равными единице $\alpha_{ik} = \beta_{ik} = 1$) и неравномерным (коэффициенты $\alpha_{ik} > 1$; $\beta_{ik} > 1$) профилем скорости в контрольных живых сечениях. На рис. 9 сплошные линии соответствуют экстремальным, характеристикам с коэффициентами $\alpha_{ik} = \beta_{ik} = 1$; линии пунктир – $\alpha_{0a}=1,08$; $\alpha_{3II}=1,02$; $\alpha_{4cm}=1,03$; $\beta_{3II}=1,01$; $\beta_{4cm}=1,02$, а линии точка-пунктир – $\alpha_{0a}=2$; $\alpha_{3II}=1,1$; $\alpha_{4cm}=1,3$; $\beta_{0a}=1,33$; $\beta_{3II}=1,03$; $\beta_{4cm}=1,1$. Во всех случаях характеристики построены при определенных значениях коэффициентов сопротивления сопла $\zeta_c = 0,06$, входа в смесительную камеру $\zeta_{вх} = 0,1$ и суммарном коэффициенте трения камеры смешения и диффузора $\zeta_T + \zeta_d = 0,24$.

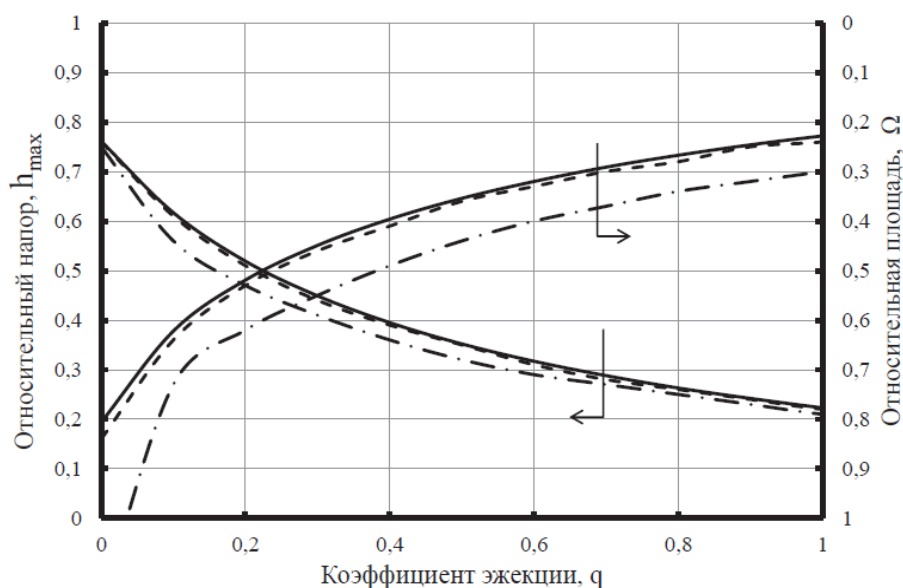


Рис. 9. Экстремальные характеристики струйного насоса-смесителя при различных коэффициентах неравномерности распределения поля скорости в поперечных сечениях

Сопоставление кривых показывает, что с увеличением коэффициентов $\alpha_{\text{к}}$ и $\beta_{\text{к}}$, т.е. с увеличением степени неравномерности распределения скорости течения сред в контрольных живых сечениях, экстремальная напорная характеристика ухудшается, а именно, предельно достижимый относительный напор снижается. Причем в области малых коэффициентов эжекции снижение относительного напора оказывается более существенным. Следовательно, с целью повышения эффективности работы струйного насоса-смесителя необходимо профилировать проточную часть аппарата с таким расчетом, чтобы распределение скорости течения сред приближалось к равномерному [7]. На основе многочисленных экспериментальных исследований [1, 3, 4, 7, и др.] разработаны рекомендации по профилированию проточной части аппарата. Сопло целесообразно выполнить коническим. Оптимальные геометрические параметры конического сопла изменяются в следующих диапазонах: длина сопла – $(3-4) d_0$; угол сужения сопла – от 15° до 20° . Входной участок камеры смешения выполняют плавным. При этом длина камеры смешения $L_{\text{к с}}$ и удаление среза сопла от начала камеры x : для высоконапорных струйных насосов – $L_{\text{к с}} = (6-7) \cdot d_3$, $x = d_0$; для средненапорных – $L_{\text{к с}} = 7 \cdot d_3$, $x = 0,5 \cdot d_0$; для низконапорных – $L_{\text{к с}} = (7-8) \cdot d_3$, $x = 0,3 \cdot d_0$. Рекомендуют камеру смешения изготавливать составной из нескольких частей, т.е. цилиндрического и диффузорного участков, для постепенной трансформации кинетической энергии в потенциальную [3,4]. При этом угол раскрытия диффузорной части камеры смешения равен 3-4. Исследования показывают, что минимальными гидравлическими потерями обладают диффузоры с углами конусности 6 – 8, так как при этом эпюра

скоростей в конце диффузора симметрична и отсутствует отрыв потока от стенок [3, 4].

Вместе с тем соотношение диаметров выхода из диффузора d_5 и входа в него d_4 составляет 2 – 2,5. Распределение скорости по сечению потока возможно определить с помощью физического эксперимента или численного. Последний позволит определить коэффициенты неравномерности с наименьшими затратами, так как является более доступным.

Выводы. Предложена уточненная модель течения капельной жидкости в струйном насосе-смесителе с учетом неравномерности поля скорости в контрольных живых сечениях. Рассчитаны и проанализированы безразмерные характеристики, выражающие зависимость относительного напора от коэффициента эжекции и относительной площади сопла.

1. Показано, что сопротивление течению жидкости в проточной части аппарата и неравномерность поля скорости в контрольных живых сечениях оказывают существенное влияние на характеристики струйного насоса-смесителя. При увеличении коэффициентов сопротивления элементов проточной части насоса-смесителя и неравномерности поля скорости происходит ухудшение напорных характеристик аппарата. Причем степень ухудшения характеристик усиливается при малых коэффициентах эжекции.

2. Получены экстремальные характеристики струйного аппарата при режимах работы с малыми коэффициентами эжекции, что характерно для рабочего процесса насоса-смесителя.

Литература

1. Квенцель А.Л., Ремень В.И. Рабочий процесс и характеристики струйного насоса эжекторного снаряда при вращательно-ударном разведочном бурении

инженерно-геологических скважин. Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – №11(41). 2020. – С. 72-77.

2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты. – 3-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

3. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1998. – 256 с.

4. Темнов В.К. Расчёт и проектирование жидкостных эжекторов: учебное пособие / В.К. Темнов, Е.К. Спиридонов. – Челябинск: ЧПИ, 1994. – 44 с.

5. Волков Э.П. [и др.] Исследование вращающейся цилиндрической гидродинамической решетки кавитаторов // Теплоэнергетика. Тепло-энергетика, 1999 г. - №5. - стр. 21-24. 6. Идельчик, И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1993. - С. 351.

7. Спиридонов, Е.К. Битюцких, С.Ю. О работе жидкостного эжектора при малых коэффициентах эжекции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016 г. - 1(2): Т. 16. - С. 538-542.

Kventsel A.L., Remen V.I.

REFINED MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS AND CHARACTERISTICS OF A JET MIXING - PUMP

A one-dimensional mathematical model of the flow of droplet liquid in a jet pump-mixer has been developed, taking into account the unevenness of the velocity field in control live sections. Dimensionless performance characteristics were calculated and analyzed, expressing the dependence of the relative pressure on the ejection coefficient and the relative area of the nozzle, at different relative densities of the liquid flows. Extreme characteristics of the jet apparatus were

obtained under operating modes with low ejection coefficients, which is typical for the operating process of a jet pump-mixer.

Key words: *mathematical model, jet mixing pump, dimensionless performance characteristics, relative pressure, ejection coefficient, relative nozzle area and relative flow density.*

Квенцель Анатолий Леонидович, к.т.н., доцент кафедры «Общеобразовательные дисциплины», «Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Ремень Валентин Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Вентиляция, теплогазо- и водоснабжение», «Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Kventsel Anatoliy Leonidovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the "General Education Disciplines", "Institute of Construction, Architecture and Housing and Communal Services" «LSU named after V. Dahl».

Remen Valentin Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Ventilation, Heat, Gas and Water Supply" "Institute of Construction, Architecture and Housing and Communal Services" «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Андрийчук Николай Данилович, доктор технических наук, профессор, директор института, «Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 25.11.2023

УДК 621.695

МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ЭРЛИФТА И ЕЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Кононенко А. П., Божко Р. И., Миронычев И. И.

THE WORKING PROCESS MODEL OF THE INJECTION AIRLIFT AND ITS NUMERICAL SOLUTION

Kononenko A. P., Bozhko R. I., Mironychev I. I.

На основе уравнений количества движения и неразрывности движения с учетом принятых допущений разработана математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта, отличающаяся от известных учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы. С помощью разработанной компьютерной программы проведено численное решение данной математической модели, что позволило получить расходные характеристики и гидродинамические параметры водовоздушного потока в подъемной трубе нагнетательного эрлифта с визуализацией получаемых результатов.

Ключевые слова: математическая модель, численное решение, нагнетательный эрлифт, избыточное давление, подача, расход воздуха, энергоэффективность.

Введение. Недостатком эрлифтных установок традиционной технологической схемы, как основного из средств гидромеханической очистки шахтных водосборных емкостей, ограничивающим область их применения, является невозможность напорного транспортирования шахтной воды к потребителю после ее выхода из воздухоотделителя.

Обеспечить напорное транспортирование шахтной воды с энергетической эффективностью работы не ниже эффективности работы установки традиционной технологической схемы возможно нагнетательной эрлифтной установкой за счет обеспечения избыточного давления в воздухоотделителе эрлифта и утилизации энергии исходящего из воздухоотделителя частично сжатого воздуха, подавая его во всасывающий тракт входящего в состав установки источника пневмоэнергии (воздухоструйного компрессора или радиального нагнетателя).

Изложение основного материала. Как известно [1, 2], при работе газожидкостного подъемника движущаяся в вертикальной подъемной трубе водовоздушная смесь может принимать различные структуры – пузырьковую, снарядную, эмульсионную, кольцевую и др. Однако из-за сложности гидродинамических процессов в водовоздушных потоках разработать универсальную

математическую модель, адекватно описывающую рабочий процесс эрлифта при каждой из указанных структур, на сегодняшний день, не представляется возможным, и методика аналитических описаний создается для каждой структуры в отдельности.

В данной работе рассматривается математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе, обеспечение которой достигается созданием соответствующих гидродинамических условий работы подъемника, которые в первую очередь характеризуются значениями относительных погружений смесителя $\alpha \geq 0,4$ и критерия Фруда $0 < Fr_{cm} \leq 30$ [2, 3].

Допустимость рассматривать при математическом моделировании рабочего процесса нагнетательного эрлифта транспортируемую смесь в подъемной трубе как водовоздушную (2-х фазную) в случае транспортирования в том числе и гидросмесей обосновывается результатами выполненных ранее исследований [2, 3]. В соответствии с этими данными при плотностях гидросмеси $\rho \leq 1200$ кг/м³ трехфазную смесь (воздух – вода – твердые частицы) возможно рассматривать как двухфазную (воздух – вода) с приемлемой точностью получаемых результатов математического моделирования.

В основу математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта положены фундаментальные законы сохранения [2, 4, 5] в виде дифференциальных уравнений количества движения и неразрывности движения сплошной среды, которые для условий газожидкостного подъемника имеют вид:

- уравнение количества движения

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} [(1-\varphi)\rho'(w)^2 + \varphi\rho''(w'')^2]; \quad (1)$$

$$-[(1-\varphi)\rho' + \varphi\rho'']g$$

- уравнение неразрывности движения

$$(1 - \varphi)\rho'w' + \varphi\rho''w'' = G = \text{const}, \quad (2)$$

где p – давление смеси; z – вертикальная координата сечения подъемной трубы; χ – периметр поперечного сечения трубы; ω – площадь поперечного сечения трубы; τ_w – касательное напряжение на стенке; φ – истинное газосодержание потока; ρ' – плотность жидкости; ρ'' – плотность газа; w' – истинная скорость жидкости в газожидкостной смеси; w'' – истинная скорость газа в газожидкостной смеси; g – ускорение свободного падения; G – массовая скорость водовоздушной смеси.

Численное решение уравнений (1) и (2) с учетом выражений, отражающих особенности математического моделирования рабочего процесса нагнетательного эрлифта, подробно изложенные в работах [4, 5], выполнено при помощи специальной разработанной программы на ЭВМ (язык программирования Delphi).

При этом получены расходные характеристики нагнетательного эрлифта $Q_z = f(Q_v)$, зависимости изменения приведенных и истинных скоростей w и плотностей фаз ρ (воды и воздуха) двухфазного потока, а также изменения давлений p и мощностей N аэрогидросмеси по высоте подъемной трубы в широком диапазоне расхода воздуха эрлифтом Q_v .

На основе разработанной математической модели выполнены расчеты в программе с построением расходных характеристик и получены количественные значения конструктивных размеров и гидродинамических параметров эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного [4, 5] эрлифтов в диапазоне глубин погружения смесителей $h_n = 6 \div 74$ м (шаг $\Delta h_n = 4$ м) с высотой подъема $H_n = H_{\text{эт}} = 7$ м, высотой переподъема $\Delta H_n = 2$ м и диаметром подъемной трубы $D = 0,15$ м. Диапазон расходов воздуха в эрлифте для обоих схем составлял $Q_v = 0 \div 15$ м³/мин с шагом $\Delta Q_v = 1$ м³/мин. Исследуемый диапазон изменения относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта составляет $\alpha_{\text{эн}} = 0,364 \div 0,911$.

В качестве примера решения математической модели приведена расходная характеристика (рис. 1), построенная при следующих исходных данных: глубина погружения смесителя $h_n = 10$ м, высота подъема $H_n = 7$ м, высота переподъема $\Delta H_n = 2$ м (относительное погружение $\alpha_{\text{эн}} = 0,533$). Приведены также энергетические характеристики эрлифтов (рис. 2–9), семейство расходных характеристик нагнетательного и традиционного эрлифтов (рис. 10) при переменном значении геометрического погружения смесителя $h = h_n$.

Для численного сравнительного анализа параметров рабочего процесса эрлифтов использованы модели « $H_n = H_{\text{эт}} - \text{const}$ » и « $p - \text{const}$ » (при неизменной высоте подъема и давлении в смесителе во всем исследуемом диапазоне изменения расхода воздуха Q_v).

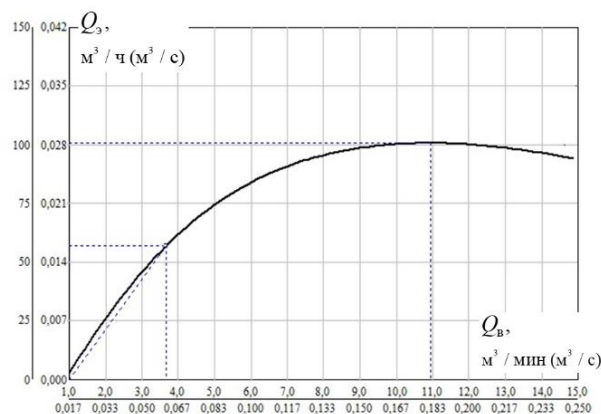


Рис. 1. Расчетная расходная характеристика нагнетательного эрлифта

Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта (Рис. 1) характеризуется расходом сжатого воздуха $Q_{v,\text{опт}} = 0,061$ м³/с (3,66 м³/мин) и подачей эрлифта $Q_{z,\text{опт}} = 0,0158$ м³/с (56,8 м³/ч), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{n,\text{опт}} = 3,86$. В режиме максимальной подачи: $Q_{v,\text{макс}} = 0,182$ м³/с (10,9 м³/мин) и $Q_{z,\text{макс}} = 0,0280$ м³/с (100,7 м³/ч), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{n,\text{макс}} = 6,51$.

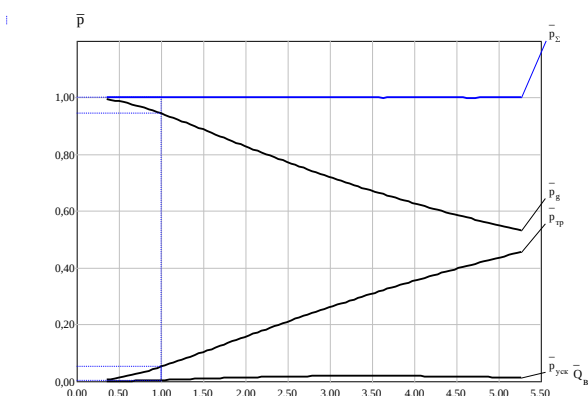


Рис. 2. Изменение относительных давлений в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы (базисные значения – $p_{\Sigma} = 98,1$ кПа, $Q_{v,\text{опт}} = 0,047$ м³/с)

В оптимальном режиме работы нагнетательного эрлифта перепад давления в подъемной трубе (избыточное давление в смесителе) составляет $p_{\Sigma} = p_{\text{см}} = 1$ кгс/см² (98,1 кПа), величина которого была принята в качестве базисной при построении кривых изменения относительных давлений водовоздушной смеси в подъемной трубе $\bar{p}_{\text{см}} = f(\bar{Q}_v)$.

Относительные давления в оптимальном режиме работы составляют: давление, обусловленное силой тяжести – $P_g \approx 0,875 \cdot P_\Sigma$, давление, обусловленное

трением – $P_{mp} \approx 0,05 \cdot P_\Sigma$, давление, обусловленное ускорением – $P_{уск} = 0,001 \cdot P_\Sigma$ (рис. 2).

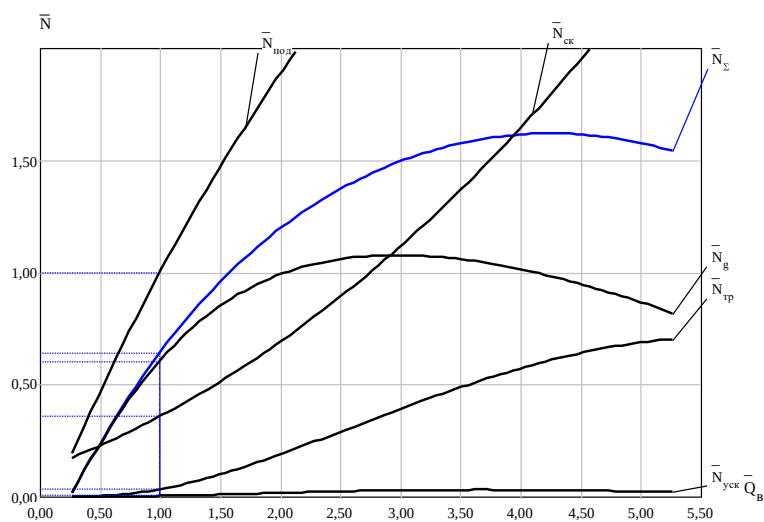


Рис. 3. Изменение относительных мощностей в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы

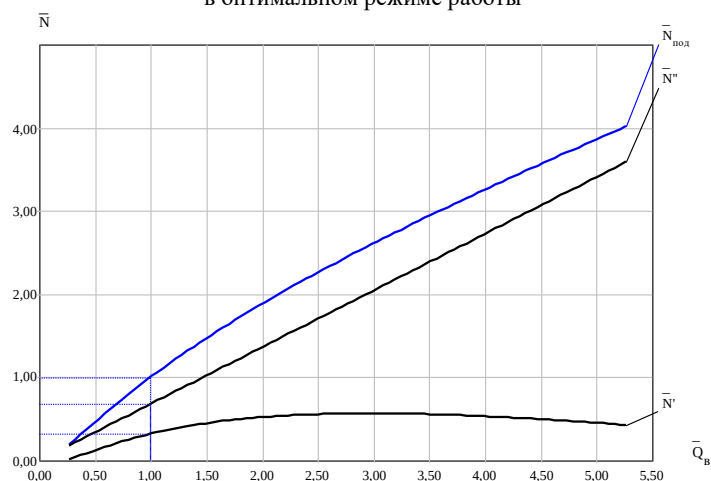


Рис. 4. Изменение относительных подведенных мощностей в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы

Мощность, подведенная к подъемной трубе, нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы составляет $N_{\text{под}} = 4,69$ кВт, она была принята в качестве базисной при построении характеристик, как и значение расхода воздуха эрлифтом в оптимальном режиме работы $Q_{\text{в,опт}} = 0,047$ м³/с

(Рис. 3, 4). Подведенная мощность складывается из мощности воздушного потока N'' и потока жидкости N' [2]. Мощность воздушного потока в данном случае составляет $N'' = 0,68 \cdot N_{\text{под}}$ (3,19 кВт), мощность потока жидкости – $N' = 0,32 \cdot N_{\text{под}}$ (1,50 кВт).

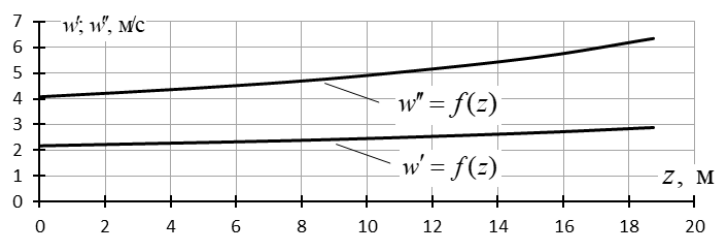


Рис. 5. Зависимости изменения истинной скорости воды $w' = f(z)$ и воздуха $w'' = f(z)$ по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы

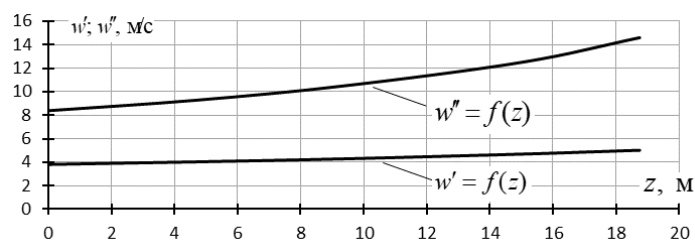


Рис. 6. Зависимости изменения истинной скорости воды и воздуха по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта в максимальном режиме работы

Зависимости изменения статических и гидродинамических параметров водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта ($z = 0 \div 18,75$ м) в оптимальном и максимальном режимах работы представлены на рис. 5 – 9. Истинная скорости воды w' принимает

значения в диапазоне $2,17 \div 2,88$ м/с в оптимальном режиме и $3,81 \div 5,02$ м/с в максимальном режиме; истинная скорость воздуха w'' принимает значения в диапазоне $4,08 \div 6,35$ м/с в оптимальном режиме и $8,39 \div 14,6$ м/с в максимальном режиме (рис. 5, 6).

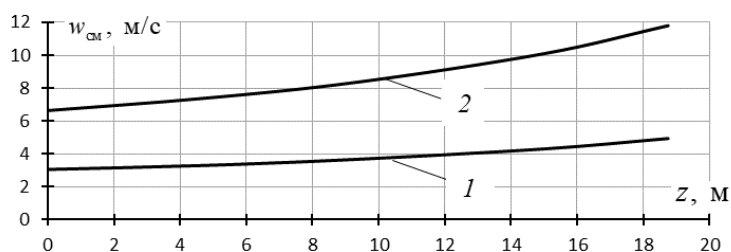


Рис. 7. Зависимости изменения приведенной скорости водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта: 1 – в оптимальном режиме работы, 2 – в максимальном режиме работы

Приведенная скорость водовоздушной смеси $w_{см}$ принимает значения в диапазоне $3,06 \div 4,94$ м/с в оптимальном режиме и $6,64 \div 11,8$ м/с в максимальном режиме (рис. 7).

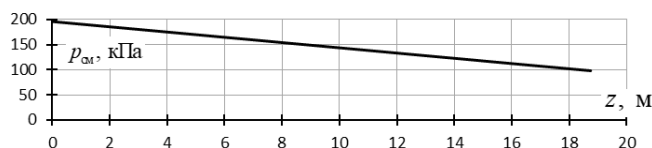


Рис. 8. Зависимость изменения абсолютного давления в подъемной трубе нагнетательного эрлифта от вертикальной координаты

Абсолютное давление водовоздушной смеси $p_{см}$ изменяется от $2,00$ до $1,00$ кгс/см² по линейному закону (рис. 8).

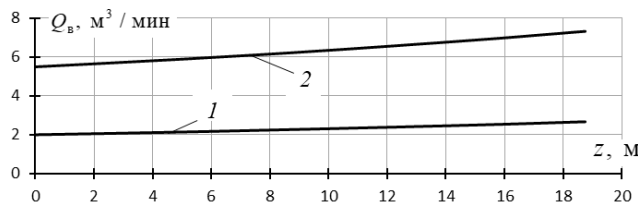


Рис. 9. Зависимости изменения объемного расхода водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта: 1 – в оптимальном режиме работы, 2 – в максимальном режиме работы

Объемный расход воздуха Q_v принимает значения в диапазоне $2,0 \div 2,67$ м³/с в оптимальном режиме и $5,50 \div 7,33$ м³/с в максимальном режиме (рис. 9).

Результаты исследований. В ходе численного решения математической модели получено

семейство расходных характеристик нагнетательных эрлифтов (рис. 10). Исследованы эрлифты с глубиной погружения смесителей $h_n = 10$ м, высотой подъема $H_n = 5$ м, диаметром подъемной трубы $D = 0,15$ м при переменном значении высоты переподъема $\Delta H_n = 0 \div 5$ м с

шагом $\delta = 1$ м. Получены значения расходов воздуха Q_v и подачи Q_z , вычислены значения удельных расходов воздуха q в оптимальном режиме и режиме максимальной подачи эрлифтов. Параметры эрлифта с высотой перепада $\Delta H_n = 0$ соответствуют традиционному эрлифту. Величина относительного погружения эрлифтов изменялась в диапазоне $\alpha_{zn} = 0,502 \div 0,667$.

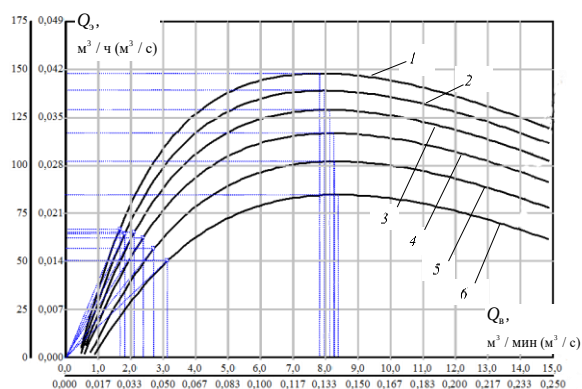


Рис. 10. Расходные характеристики нагнетательных эрлифтов с $h_n = 10$ м, $H_n = 5$ м, $D = 0,15$ м: 1 – $\Delta H_n = 0$, $\alpha_{zn} = 0,667$; 2 – $\Delta H_n = 1,0$ м, $\alpha_{zn} = 0,643$; 3 – $\Delta H_n = 2,0$ м, $\alpha_{zn} = 0,615$; 4 – $\Delta H_n = 3,0$ м, $\alpha_{zn} = 0,583$; 5 – $\Delta H_n = 4,0$ м, $\alpha_{zn} = 0,545$; 6 – $\Delta H_n = 5,0$ м, $\alpha_{zn} = 0,502$

Величина расхода воздуха эрлифтом в оптимальном режиме работы лежит в диапазоне $Q_{v,опт} = 1,65 \div 3,15$ м³/мин, в максимальном режиме работы – $Q_{v,макс} = 7,8 \div 8,4$ м³/мин. Величина подачи эрлифта в оптимальном режиме работы лежит в диапазоне $Q_{z,опт} = 50,4 \div 67,4$ м³/ч, в максимальном режиме работы – $Q_{z,макс} = 84,9 \div 148$ м³/ч (Рис. 10). Отклонения в значениях подач нагнетательного (при максимальном принятом $\Delta H_n = 5$ м) и традиционного (при $\Delta H_n = 0$) эрлифтов составляют: в оптимальном режиме работы $\delta Q_{z,опт} = 25,2\%$, в режиме максимальной подачи $\delta Q_{z,макс} = 42,6\%$ [5].

Величина удельного расхода воздуха эрлифтом (рис. 11) принимает значения $q_{опт} = 1,47 \div 3,25$ в оптимальном режиме работы и $q_{макс} = 3,16 \div 5,35$ в максимальном режиме работы в принятом диапазоне относительного погружения α_{zn} .

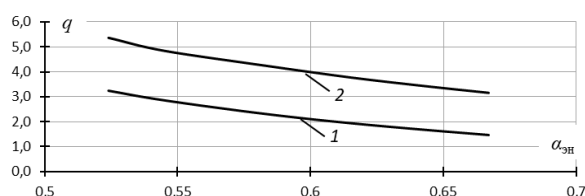


Рис. 11. Зависимости удельного расхода воздуха нагнетательным эрлифтом от относительного погружения: 1 – в оптимальном режиме, 2 – в максимальном режиме работы

Выводы. Разработана математическая модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта, в

основу которой положены уравнения неразрывности движения и количества движения вертикального снарядного потока аэрогидросмеси, с учетом принятых допущений.

Разработана компьютерная программа (язык программирования Delphi) для численного решения данной математической модели, позволяющая определять параметры восходящего газожидкостного потока в подъемной трубе и обеспечивающая, в том числе, визуализацию получаемых зависимостей.

Проведено численное решение математической модели рабочего процесса эрлифтов традиционной технологической схемы и нагнетательных эрлифтов со значениями: $H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 0 \div 5$ м ($\alpha_{zn} = 0,364 \div 0,911$), $D = 0,15$ м с построением расходных и энергетических характеристик, в том числе по высоте подъемной трубы.

Решена актуальная научно-техническая задача расширения области применения нагнетательных эрлифтных установок для очистки шахтных водосборных емкостей угольных предприятий за счет рациональных параметров их рабочих процессов.

Л и т е р а т у р а

1. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко – М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
2. Кононенко, А. П. Рабочий процесс эрлифта и его моделирование / А. П. Кононенко ; Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 171 с.
3. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. ч. I. / Р. И. Нигматулин ; – М.: Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1987. – 464 с.
4. Божко Р.И. Модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, Р.И. Божко, В.А. Панов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля № 11 (29) 2019, – С. 75-79.
5. Кононенко, А. П. Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». Донецк: ДонНТУ, 2020. Т. 3: 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2020. С. – 164-170.

Kononenko A.P., Bozhko R.I., Mironychev I.I. THE WORKING PROCESS MODEL OF THE INJECTION AIRLIFT AND ITS NUMERICAL SOLUTION

Based on the equations of the amount of motion and continuity of motion, taking into account the accepted assumptions, a mathematical model of the working process of the injection airlift has been developed, which differs from the known ones by taking into account the excess pressure in the outlet section of the lifting pipe. With the help of the developed computer program, a numerical solution of this mathematical model was carried out, which made it possible to obtain the flow characteristics and hydrodynamic parameters of the

water-air flow in the lifting tube of the injection airlift with visualization of the results obtained.

Keywords: *mathematical model, numerical solution, injection airlift, overpressure, supply, air flow, energy efficiency.*

Кононенко Анатолий Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Энергомеханические системы» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

E-mail: ap.kononenko@mail.ru

Божко Руслан Игоревич, к.т.н., доцент кафедры «Энергомеханические системы» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

E-mail: bozhko342@mail.ru

Мироньчев Илья Иванович, магистрант кафедры «Энергомеханические системы» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

E-mail: ilha.mironychev@yandex.ru

Kononenko Anatoly Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Energy Mechanical Systems", Donetsk National Technical University, Donetsk.

Bozhko Ruslan Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Energy Mechanical Systems" of the Donetsk National Technical University, Donetsk.

Ilya Ivanovich Mironychev, Master's student of the Department of "Energy Mechanical Systems", Donetsk National Technical University, Donetsk.

Рецензент: Гутаревич Виктор Олегович, доктор технических наук, профессор кафедры транспортных систем и логистики имени И.Г. Штокмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».

Статья подана 25.11.2023

УДК 621.22: 621.694

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫХОДНОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО КЛАПАНА СОЛЕНОИДНОГО ТИПА

Мальцев Я. И., Мальцева М. О., Суворова Е. Ю.

PROFILING THE FLOW PART OF THE OUTLET CHANNEL OF AN ELECTRO- PNEUMATIC VALVE OF THE SOLENOID TYPE

Maltsev Y. I., Maltseva M. O., Suvorova E. Y.

Приведены результаты математического моделирования гидродинамики в открытом электропневматическом клапане соленоидного типа с выходным каналом в форме щелевого диффузора на базе математической модели трехмерного турбулентного течения, основанной на трехмерных уравнениях Рейнольдса, уравнении неразрывности и SST - модели турбулентности Ментера, начальных и граничных условий. Проведены картины течения в профилированной проточной части выходного канала клапана в виде щелевого диффузора с учетом ограничений, налагаемых на величину запираемого отверстия.

Ключевые слова: электропневматический клапан, щелевой диффузор, геометрические параметры, математическая модель течения, уравнение Рейнольдса, SST - модель турбулентности, коэффициент расхода.

Введение. Дальнейшее экономическое развитие Российской Федерации неразрывно связано с развитием отечественной промышленности. Улучшить ситуацию в этой сфере деятельности представляется возможным существенным увеличением производства систем машин и оборудования, автоматических манипуляторов с программным управлением, позволяющих исключить применение ручного малоквалифицированного и монотонного труда, особенно в тяжелых и вредных для человека условиях.

Управление потоками жидкостей и газов является одним из основных процессов во множестве технических систем промышленности, энергетики, транспорта, сельского хозяйства и других отраслей народного хозяйства Украины, поэтому дальнейший научно-технический прогресс тесно связан с вопросами совершенствования средств и систем управления, их характеристик и разработки новых конструкций, обладающих высокими показателями надежности и долговечности.

Воздействие высоких температур, давлений, вибраций, присутствие абразивных материалов, как в окружающей среде, так и в рабочих жидкостях

приводит к быстрому износу классических механических средств управления.

В настоящее время управление потоками сплошных сред осуществляется исполнительными устройствами с регулирующими органами в основном в виде заслонок, задвижек, шиберов, клапанов, дросселей, золотников возвратно-поступательного и вращательного действия и др. представляющими собой механические дросселирующие устройства различного принципа действия. Принцип их действия основан на перекрытии проходного сечения механическим запорным органом, т.е. за счет механического взаимодействия контактирующих пар. Совершенствование таких устройств по существу сводилось к изменению геометрии проточной части, запорных органов и применению новых материалов.

Современные пневматические преобразователи являются важным элементом во многих отраслях промышленности. Они являются более практичными и простыми. Они универсальны, имеют достаточную дешевизну закупки и эксплуатации, а также долговечность и надежность, одновременно имея при этом множество функций, чем электро – и гидроприводы. Широкое применение электромеханического клапана мощности в промышленности позволит решить важные задачи, что обеспечит создание современных предприятий с высокой производительностью и культурой производства, выпускающих продукцию широкого ассортимента и отличного качества.

Таким образом совершенствование гидравлических характеристик электропневматических клапанов (ЭПК) является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить надежность и эффективность основанных на них устройств и систем управления мощными потоками жидкостей и газов, функционирующих в неблагоприятных условиях.

Изложение основных материалов. Как показали исследования [2, 4] существенного увеличения пропускной способности клапана можно добиться за счет исполнения выходного канала в виде щелевого диффузора.

Наличие диффузора на выходе ЭПК приводит к невозможности применения интегральных и полуэмпирических моделей, а также моделей, основанных на интегральных соотношениях Кармана для пограничного слоя ввиду наличия режимов работы ЭПК, характеризующихся отрывом потока в диффузоре. Использование моделей для осесимметричного течения также невозможно, ибо, отрыв носит асимметричный трехмерный характер. Пространственное течение в щелевом диффузоре только с определенной степенью условности можно рассматривать как течение в плоском диффузоре с эквивалентным углом раскрытия. Однако, если имеется отрывное течение, то такая схема становится не эквивалентной. Течение в ЭПК происходит при числах Рейнольдса 10^5 - 10^6 , что говорит о сильно развитой турбулентной структуре. Наличие проблемы такого рода приводит к необходимости использования трехмерных уравнений Рейнольдса. Поскольку зачастую рабочие давления и скорости (для газообразной рабочей жидкости) невысоки, то можно ограничиться уравнениями для

несжимаемой жидкости, которые в декартовой системе координат имеют вид [3,6]:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right],$$

где v_i - проекции осредненной составляющей вектора скорости на оси координат;

F_i - проекции вектора массовых сил на оси координат;

ρ - плотность среды;

p - статическое давление.

Для замыкания математической модели к уравнениям движения следует включить уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

и адекватную модель турбулентности.

Как показывает практика, наиболее оптимальной моделью турбулентности является модель переноса сдвиговых напряжений - SST предложенной Ментером [1].

Уравнения переноса кинетической энергии k турбулентности

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right].$$

Уравнения переноса удельной диссипации ω турбулентности

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

где $P = \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$; $\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$;

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad \mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)};$$

$$\emptyset = F_1 \emptyset_1 + (1 - F_1) \emptyset_2;$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4);$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} D^2} \right];$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right);$$

$$arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right);$$

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}, \quad \Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}; \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right);$$

$$\tilde{P} = \min(P, 20\beta^* \rho \omega k);$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} k^2}{\sqrt{\beta^*}}; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} k^2}{\sqrt{\beta^*}};$$

Константы, входящие в уравнения модели: $\sigma_{k1} = 0.85$; $\sigma_{\omega 1} = 0.5$; $\beta_1 = 0.075$;
 $\sigma_{k2} = 1.0$; $\sigma_{\omega 2} = 0.856$; $\beta_2 = 0.0828$;
 $\beta^* = 0.09$; $k = 0.41$; $a_1 = 0.31$.

На приведенной математической модели трехмерного турбулентного течения несжимаемой жидкости был проведен численный эксперимент по расчету течения в выходном канале электропневматического клапана со щелевым диффузором на выходе.

Для этого в первом приближении были приняты геометрические размеры щелевого диффузора на основе ранее проведенных исследований (рис. 1) [4].

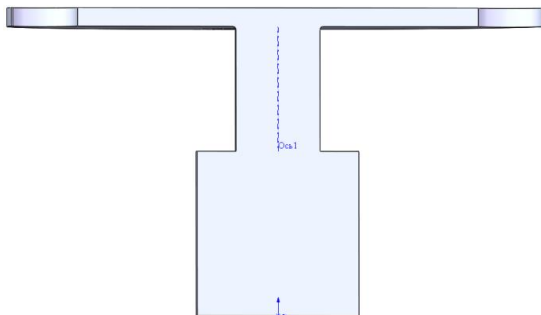


Рис. 1. Геометрия проточной части базового клапана

Расчетная сетка проточной части клапана приведена на рис. 2.

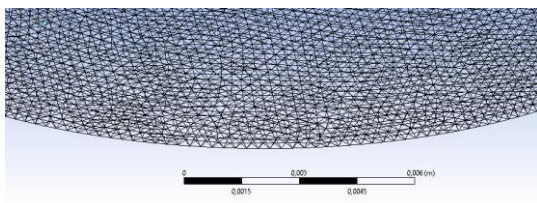


Рис. 2. Расчетная сетка

Для получения высокой точности при расчете течения в зонах пограничных слоев (у твердых стенок) применим уплотнение сетки для обеспечения оптимального y^+ (рис. 3).

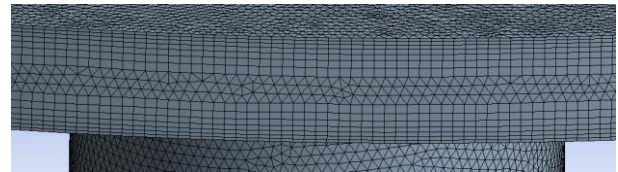


Рис. 3. Уплотнение расчетной сетки у твердых стенок

Для определения эффективности работы щелевого диффузора был произведен расчет течения в выходном канале электропневматического клапана. Результаты расчетов приведены на рис. 4, где показанные картины течения в исходном канале ЭПК в виде векторов поля скоростей.

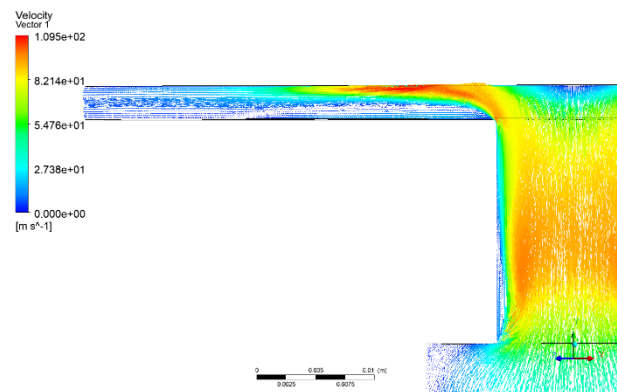


Рис. 4. Поле скоростей в плоскости симметрии клапана

Численный расчёт показал, что использование щелевого диффузора в выходном канале позволяет увеличить пропускную способность электропневматического клапана на 30%. Из расчетных картин течения видно, что рабочий поток двигается не полным сечением, а вдоль верхней стенки щелевого диффузора. Это обусловлено влиянием острых кромок седла клапана, вызывающих отрыв потока.

Результаты исследований. Поскольку скругление кромок, для предотвращения отрывного течения, невозможно, так как приводит к увеличению диаметра и соответственно запираемой площади и, как следствие, силы для закрытия отверстия. Для предотвращения отрывных течений проводилось профилирование стенок щелевого диффузора. Геометрии проточной части выходного канала ЭПК и расчетные картины течения приведены на рис. 5-13.

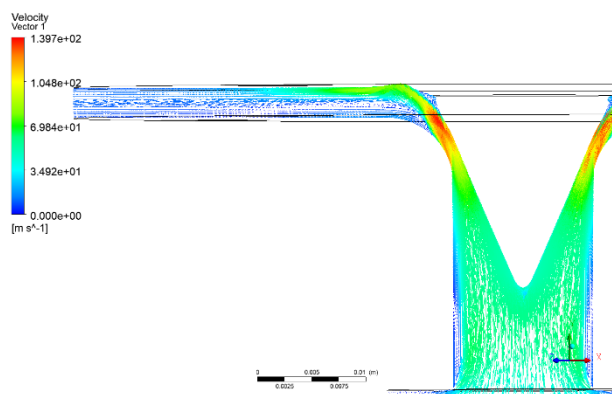


Рис. 5. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с радиусным скруглением седла (6мм) и коническим запорным элементом

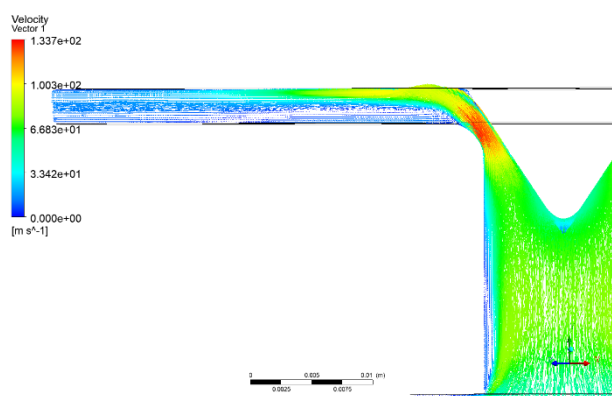


Рис. 6. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с радиусным скруглением седла (3мм) и коническим запорным элементом

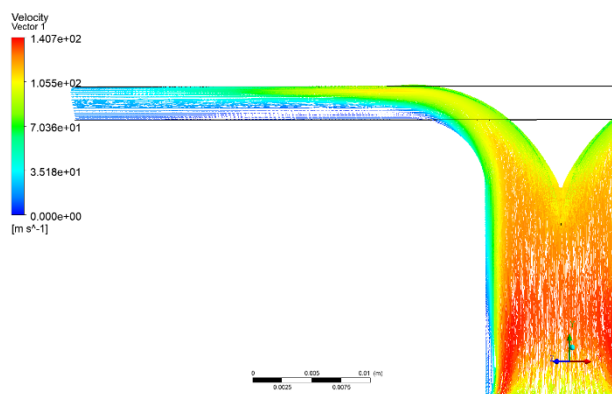


Рис. 7. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с радиусным скруглением седла (6мм) и радиусным запорным элементом

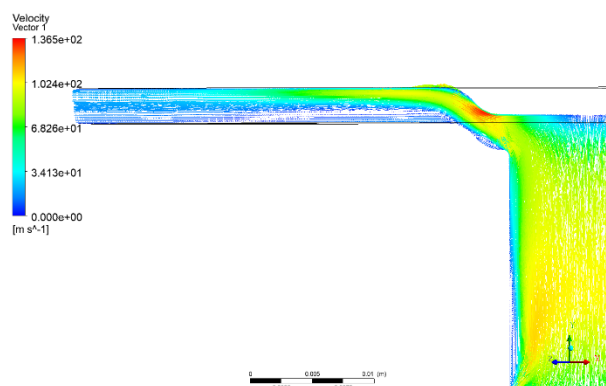


Рис. 8. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре базового с двойным радиусным скруглением седла (3мм) и двойным радиусным скруглением на верхней стенке диффузора

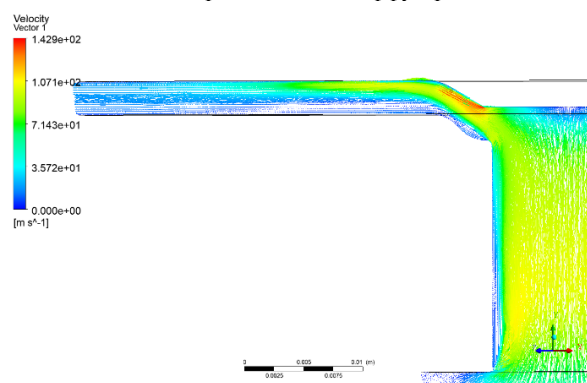


Рис. 9. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с двойным радиусным скруглением седла (3мм) и прямолинейными образующими на верхней стенке диффузора

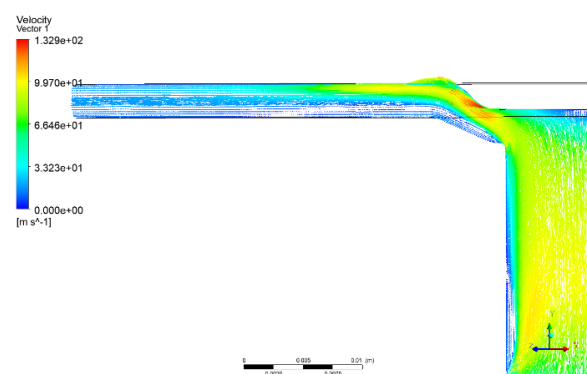


Рис. 10. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с прямолинейными образующими седла и двойным радиусным скруглением (3мм) верхней стенки диффузора

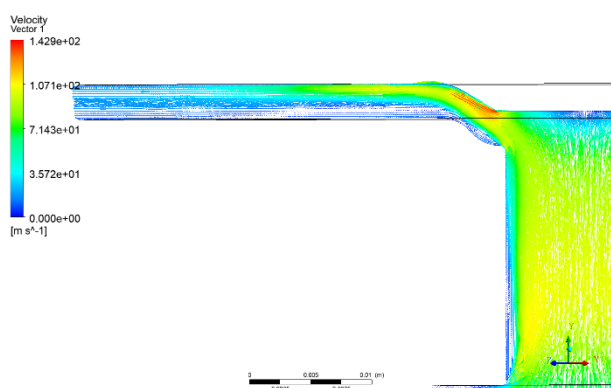


Рис. 11. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с двойным радиусным скруглением седла (6мм) и прямолинейными образующими и локальными скруглениями на верхней стенке диффузора

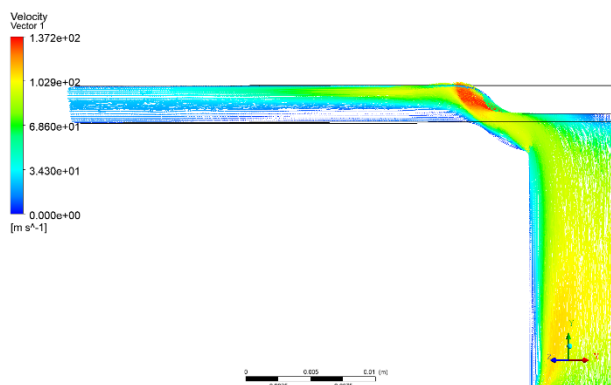


Рис. 12. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с двойным радиусным скруглением седла (6мм) и двойным радиусным скруглением на верхней стенке диффузора

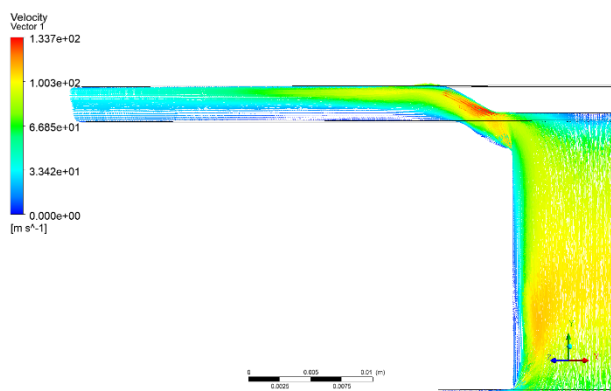


Рис. 13. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с двойным радиусным скруглением седла (6мм) и прямолинейными образующими с локальными скруглениями большого радиуса на верхней стенке диффузора

Анализ интегральных характеристик, полученных в результате проведенного численного эксперимента, показал, что наибольшей пропускной способностью обладает проточная часть ЭПК в виде щелевого диффузора с двойным радиусным скруглением седла (3мм) и двойным радиусным

скруглением на верхней стенке. Повышение пропускной способности проточной части ЭПК соответствует 11% по отношению к полученному в работе [4].

Для улучшения пропускной способности проточной части ЭПК пожертвовав величиной хода запорного органа проведен численный эксперимент для ряда форм каналов, результаты которого приведены на рис.14-16.

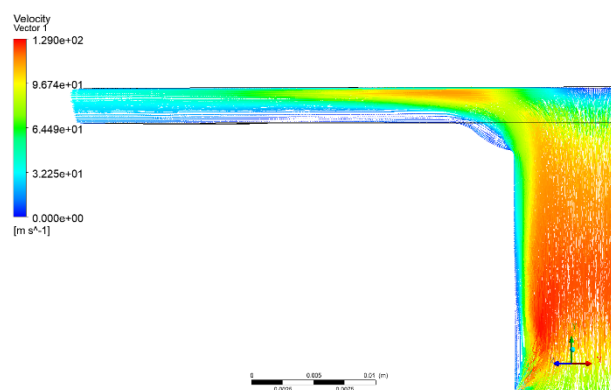


Рис. 14. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с двойным радиусным скруглением седла (6мм) и плоской верхней стенкой диффузора

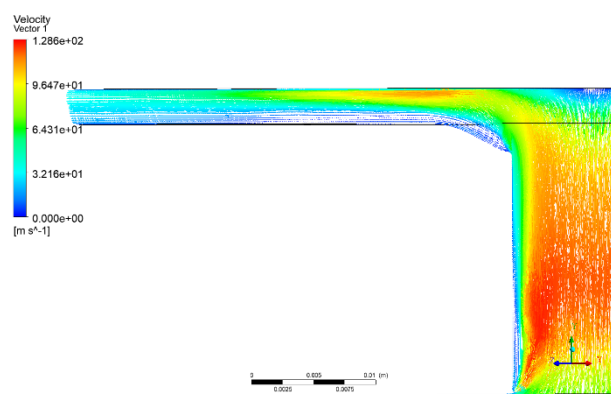


Рис. 15. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с коническим седлом и плоской верхней стенкой диффузора

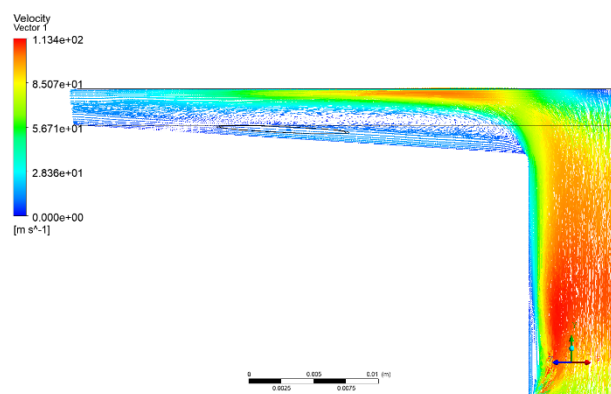


Рис. 16. Картины отрывного течения жидкости в щелевом диффузоре с непараллельными стенками диффузора

Анализ интегральных характеристик, полученных в результате проведенного численного эксперимента, показал, что наибольшей пропускной способностью обладает проточная часть ЭПК в виде щелевого диффузора с двойным радиусным скруглением седла (6мм) и плоской верхней стенкой диффузора. Повышение пропускной способности проточной части ЭПК соответствует 17,5% по отношению к полученной ранее и более чем на 29% по отношению к полученной в работе [4].

Использование проточной части с увеличенным ходом запорного элемента вызывает падение тягового усилия менее 30%, при этом происходит и падение аэродинамической силы, действующей на запорный элемент со стороны набегающего потока на 21%.

Выводы. 1. Получило дальнейшее развитие и углубление математическое моделирование гидродинамики проточной части электропневматического клапана, которое основано на уравнениях трехмерного турбулентного течения вязкой жидкости в форме Рейнольдса, уравнении неразрывности, уравнениях модели турбулентности SST и граничных условиях, позволившее рассчитать гидродинамические характеристики проточной части выходного канала электропневматического клапана.

2. Использование проточной части ЭПК в виде щелевого диффузора с двойным радиусным скруглением седла (3мм) и двойным радиусным скруглением на верхней стенке позволяет повысить пропускную способность на 11% по отношению к полученному в работе [4].

3. Использование проточной части ЭПК в виде щелевого диффузора с двойным радиусным скруглением седла (6мм), плоской верхней стенкой диффузора и увеличенным ходом запорного элемента позволяет повысить пропускную способность на 17,5% по отношению к полученной ранее и более чем на 29% по отношению к полученной в работе [4].

4. Использование проточной части с увеличенным ходом запорного элемента вызывает падение тягового усилия в крайней точке менее чем на 30%.

5. Использование проточной части с увеличенным ходом запорного элемента вызывает падение аэродинамической силы, действующей на запорный элемент со стороны набегающего потока на 21%.

Л и т е р а т у р а

1. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. "Современные подходы к моделированию турбулентности", – СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
2. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

4. Мальцева М.О. Исследование гидродинамики проточной части электропневматического клапана / М.О. Мальцева // Вісник СНУ ім. В.Даля - електронний. – №3Е. – 2009.

5. Семин Д.А., Павлюченко В.А., Мальцев Я.И. Устройства сопряжения струйной макротехники с современными системами управления.// Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. Вып.38.- Киев.- 2000. С. 216-220.

6. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. - М.: Наука, 1964. - 816 с.

Maltsev Y.I., Maltseva M.O., Suvorova E.Y.

PROFILING THE FLOW PART OF THE OUTLET CHANNEL OF AN ELECTRO-PNEUMATIC VALVE OF THE SOLENOID TYPE

The results of mathematical modeling of hydrodynamics in an open electro-pneumatic valve of the solenoid type with an output channel in the form of a slot diffuser are presented based on a mathematical model of three-dimensional turbulent flow, based on three-dimensional Reynolds equations, the continuity equation and SST - Menter's turbulence model, initial and boundary conditions. Flow patterns were drawn in the profiled flow part of the valve outlet channel in the form of a slot diffuser, taking into account the restrictions imposed on the size of the closed hole.

Key words: electro-pneumatic valve, slotted diffuser, geometric parameters, mathematical model of flow, Reynolds equation, SST - turbulence model, flow coefficient.

Мальцев Ярослав Иванович, к.т.н. заведующий кафедрой гидрогазодинамики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Мальцева Марина Олеговна, к.т.н. доцент кафедры гидрогазодинамики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Суворова Евгения Юрьевна, старший преподаватель кафедры информационных образовательных технологий и систем ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск

Maltsev Yaroslav Ivanovich, Ph.D. Head of the Department of Fluid and Gas Dynamics, «LSU named after V. Dahl».

Maltseva Marina Olegovna, Ph.D. Associate Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics, «LSU named after V. Dahl».

Suvorova Evgeniya Yurievna, Senior Lecturer of the Department of Information Educational Technologies and Systems, State Educational Institution of Higher Education of the Lugansk People's Republic Lugansk State Pedagogical University, Lugansk

Рецензент: Тарашанский Марк Танкумович, кандидат технических наук, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

УДК 621.31/ 621.3.07

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО ТЕЧЕНИИ ПО ТРУБОПРОВОДУ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Сентий Р. Н., Капустин Д. А., Гутько Ю. И., Швыров В. В.

AUTOMATION OF CONTROL OF QUALITY PARAMETERS OF COAL-WATER FUEL DURING ITS FLOW THROUGH A PIPELINE USING THE EDGE CURRENT METHOD

Sentyay R. N., Kapustin D. A., Gutko Yu. I., Shvyrov V. V.

Статья посвящена разработке детектирующего устройства для контроля параметров водоугольного топлива (ВУТ), при его течении по трубопроводу, с использованием вихрекового метода. В работе проанализированы факторы, влияющие на работу котлоагрегатов, работающих на ВУТ, с учетом существующих технологических схем приготовления водоугольного топлива, для энергогенерирующих и теплогенерирующих предприятий. Предложена структурная схема системы автоматического регулирования котлоагрегата, работающего на водоугольном топливе, а также разработана принципиальная схема детектирующего устройства. Разработаны рекомендации по организации контроля зольности ВУТ в потоке.

Ключевые слова: водоугольное топливо, вихрековый метод, автоматизация контроля параметров, проходной вихрековый преобразователь, структурная схема, принципиальная схема, детектор.

Введение. Начиная с 60-х и вплоть до 90-х годов, ВУТ рассматривалось в качестве дешевого способа энергоэффективной утилизации угольных шламов, которые образовывались в качестве побочного продукта на углеобогащительных фабриках при гидродобыче или гидротранспортировке угля [5]. На сегодняшний день водоугольные суспензии целенаправленно производятся и сжигаются в котельных агрегатах на тепловых электростанциях различных мощностей. Это стало возможным в силу экологичности ВУТ по отношению к традиционным энергоносителям, таким как мазут и уголь [8, 9], по ряду показателей:

- низкий уровень токсичных выбросов ВУТ на каждом технологическом этапе, от его производства до сжигания;
- взрыво- и пожаробезопасность ВУТ на каждом технологическом этапе, от его производства до сжигания;
- отсутствие пыли при транспортировке ВУТ;

- низкий уровень загрязнения почв и водоемов;
- снижение вредных выбросов в атмосферу;
- возможность использования трубопроводного транспорта.

Внедрение водоугольного топлива в качестве энергоносителя на тепловых электростанциях различной мощности может стать эффективной заменой используемому углю, мазуту и природному газу. Для многих электростанций такой переход не будет связан с значительными капитальными затратами, а уровень антропогенных выбросов в атмосферу при этом будет сохраняться на требуемом уровне [12].

Существенным достоинством ВУТ является то, что при его сжигании образуется зольный остаток, который может быть использован для приготовления различных строительных смесей, что в свою очередь расширяет сферу утилизации отходов тепловых электростанций [2, 12].

В ряде публикаций [2, 12] акцентируется внимание на перспективность развития технологий по газификации и сжиганию ВУТ, но при этом и выделяют ряд проблем, которые еще предстоит решить [3]. В рамках данной статьи наибольший интерес представляют проблемы, представленные ниже:

- стабилизация процессов горения ВУТ в топках котлоагрегатов различного типа;
- использование высокозольных и низко-реакционных углей при производстве ВУТ;
- повышение теплоты сгорания частицы ВУТ;
- автоматизация комплекса процессов от приготовления ВУТ до его сжигания.

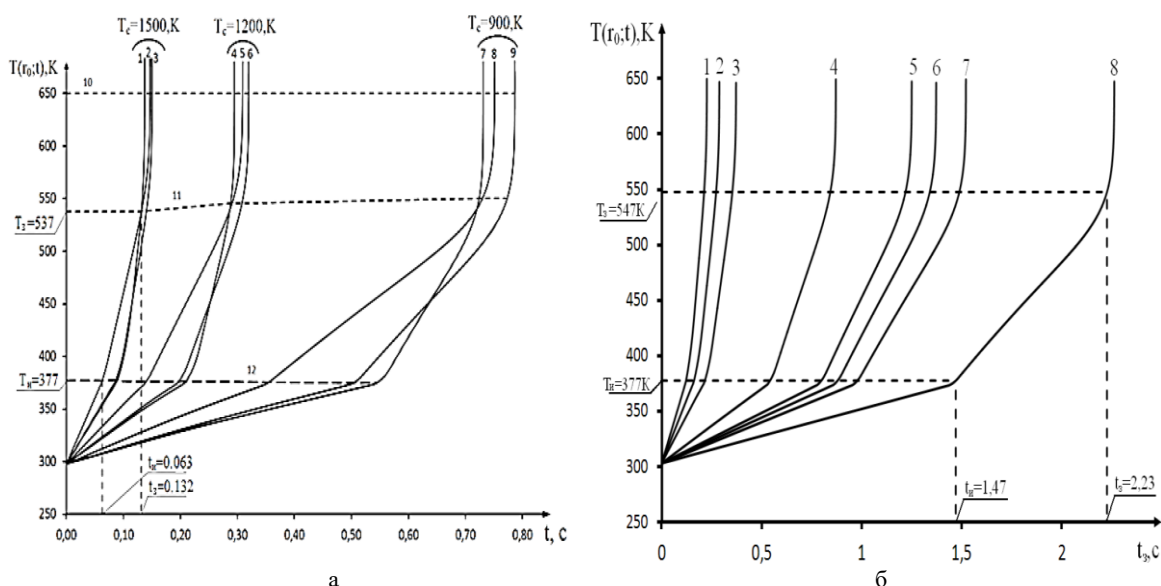
Анализ, как экспериментальных [1, 7], так и теоретических данных [11], об основных закономерностях процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива, а также данные, изложенные в статьях [4, 6, 7, 10], позволяют сделать предположение, что задачи,

изложенные выше, могут быть решены за счет использования в системах автоматизации котлоагрегатов, ряда датчиков, электрический сигнал с которых, может быть использован для поддержания оптимального рабочего режима тепло- и энергогенерирующих установок.

Целью работы является разработка структурной схемы для автоматизации контроля параметров качества водоугольного топлива при его течении по трубопроводу вихрековым методом и принципиальной схемы детектирующего устройства, а также формирование рекомендаций по организации контроля зольности водоугольного топлива в потоке вихрековым методом на

основании анализа факторов, влияющих на процесс горения ВУТ в котлоагрегатах.

Изложение основных материалов. В результате экспериментальных [1] и теоретических [11] исследований процессов зажигания частиц водоугольной суспензии установлено, что использование математической модели [11] для определения температуры горения водоугольного топлива от различных параметров (зольности, марки угля, температуры топочной камеры и др.), позволяет получить функцию изменения температуры поверхности частицы от зольности ВУТ (рис. 1 а) при различных условиях теплообмена (рис. 1,б).



а – изменение температуры частиц при различном содержании угольной компоненты в ВУТ: (1 – $\varphi=0,3$; 2 – $\varphi=0,8$; 3 – $\varphi=0,5$; 4 – $\varphi=0,3$; 5 – $\varphi=0,8$; 6 – $\varphi=0,5$; 7 – $\varphi=0,3$; 8 – $\varphi=0,8$; 9 – $\varphi=0,5$); б – изменение температуры частиц различных условиях теплообмена: 1, 5 - $T_c=1500K$; 2, 6 - $T_c=1400K$; 3, 7 - $T_c=1300K$; 4, 8 - $T_c=1000K$ [6] (1÷4 – комбинированный радиационно-конвективный подвод тепла; 5÷8 – конвективный теплообмен)

Рис. 1. Зависимость температуры поверхности частицы $T(r_0, t)$ от времени для частиц диаметром $d = 0,4 \text{ мм}$ в среде с температурой T_c

В экспериментальных исследованиях [7] выявлено влияние процентного соотношения водной фазы в ВУТ, полученного из углей различной стадии метаморфизма, на параметры его горения в воздушной среде (рис. 2а). Так время горения капли топлива размером 1 мм в воздушной среде представлено на рис. 2а, где сплошными линиями указана максимальная температура капли при ее выгорании, а штриховыми указано время до воспламенения капли; верхняя сплошная линия (рис. 2а) отображает зависимость времени воспламенения ВУТ при различном содержании водной фазы для водоугольного топлива полученного из бурого угля, следующая линия отображает зависимость для водоугольное топлива полученного из длиннопламенного угля и нижняя сплошная линия отображает зависимость для

водоугольное топлива полученного из антрацита. Как можно заметить, вне зависимости от типа используемого угля оптимальные параметры горения ВУТ наблюдаются при содержании в нем водной фазы на уровне 36% от его массы. При данной концентрации основных показателей горения водоугольного топлива, такие как максимальная температура горящей капли топлива диаметром 1 мм, удельная теплота сгорания топлива, степень выгорания топлива, время до воспламенения ВУТ из антрацита, являются оптимальными (рис. 2б) при температуре в зоне горения порядка 700°C .

Для учета влияния содержания водной фазы в ВУТ возможно использование вискозиметра. Полученные показания вискозиметра позволят не только более точно рассчитывать параметры

горения топлива топке котлоагрегата, но и регулировать содержание водной фазы при его приготовлении, для достижения оптимальных параметров горения и наиболее быстрого воспламенения топлива.

Из полученных экспериментально зависимостей следует, что время горения ВУТ в топке изменяется не только от его состава, но и от размера капли топлива (рис. 3а), а также рабочей

температуры котла. В зависимости от размера капель ВУТ изменяется и время его горения. Так, для капель топлива размером до 1 мм доминирующим фактором является содержание горючей составляющей в единице массы топлива [7], а при размере капель 1,25 мм и более продолжительность горения образцов с различной зольностью практически одинакова.

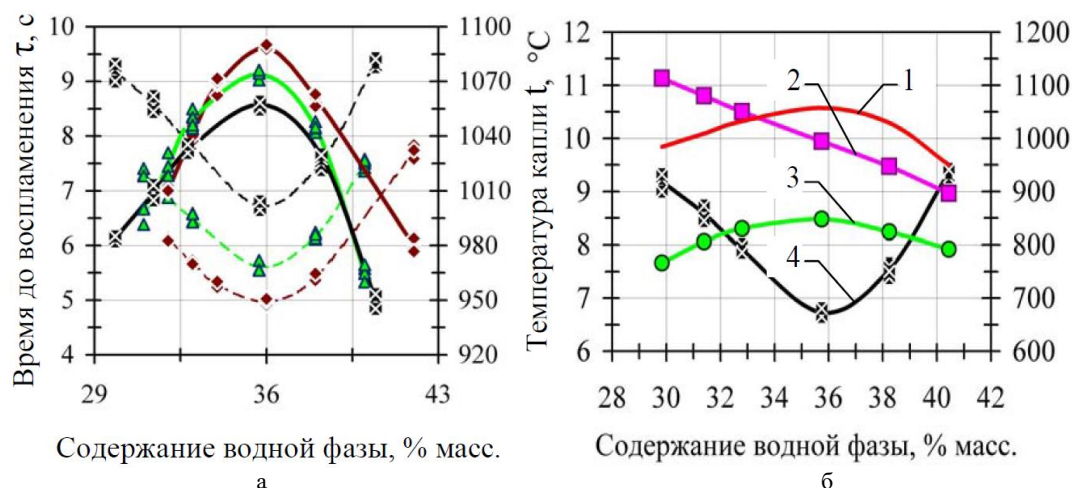


Рис. 2. Влияние содержания водной фазы на:

а – параметры горения капли водоугольного топлива в воздушной среде; б – основные показатели горения водоугольного топлива из антрацита от содержания водной фазы при температуре рабочего пространства котла 700 °С: 1 - максимальная температура горящей капли топлива диаметром 1 мм, 2 - удельная теплота сгорания топлива, 3 - степень выгорания топлива χ , 4 - время до воспламенения топлива [7]

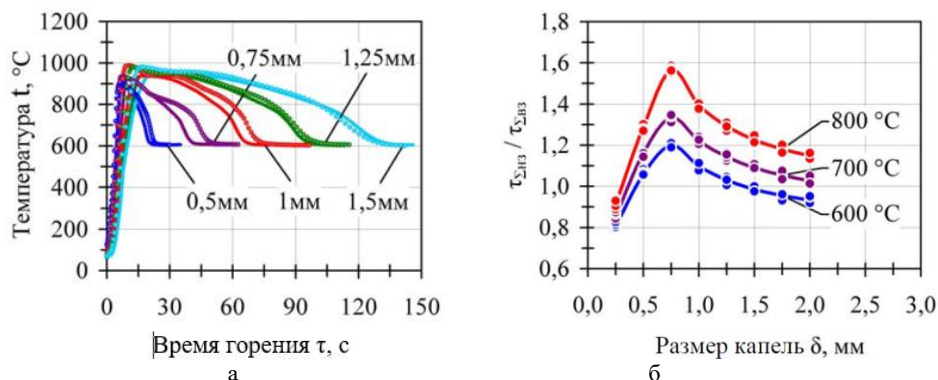


Рис. 3. Зависимость времени горения ВУТ с разной зольностью от:

а – размера капли ВУТ; б – рабочей температуры котла ($\tau_{\Sigma\text{вз}}$ - время горения низкосольного топлива, $\tau_{\Sigma\text{вз}}$ - время горения высокосольного топлива).

(- - - - топливо с зольностью 20,5 %; — топливо с зольностью 8,5 %) [7]

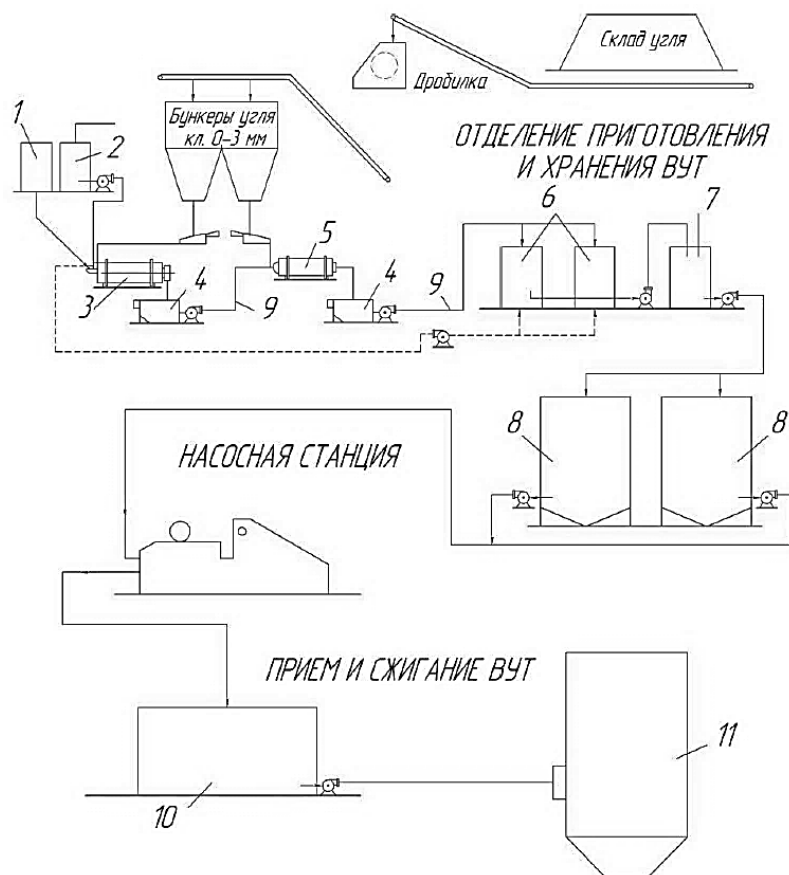
Таким образом, для разработки автоматизированной системы автоматического регулирования котлоагрегата на водоугольном топливе необходимо определять зольность ВУТ, измерять температуру в топочной камере и вести учет размера капель ВУТ в зависимости от времени наработки форсунок. Со временем, за счет абразивного износа будет увеличиваться размер капель впрыскиваемого в топочную камеру ВУТ.

При разработке автоматизированной системы управления котлоагрегатом учитывалась существующая технологическая схема процесса приготовления ВУТ [11], представленная на рис. 4. На существующих предприятиях с подобной технологической схемой приготовления ВУТ (рис. 4), целесообразно встраивать автоматизированную систему управления непосредственно перед котлоагрегатом.

На рис. 5 предложена структурная схема системы автоматического регулирования котлоагрегата на водоугольном топливе. В данной схеме ВУТ подается в котел (К) при помощи насоса (Н). Сигнал управления насосом поступает с блока обработки и управления (БОУ) и инициирует изменение скорости течения ВУТ по трубопроводу, что в свою очередь обеспечивает регулирование количества подаваемого топлива в котлоагрегат. Для поддержания оптимальных параметров горения ВУТ необходимо учитывать приведенные ранее зависимости. Так вискозиметр (В) передает блоку обработки и управления информацию о процентном соотношении водной фазы в топливе (на основе значения вязкости) для поддержания оптимальных параметров горения. Количество подаваемого ВУТ в котлоагрегат контролируется расходомером (Р), а

его качественный состав предлагается контролировать при помощи проходного вихретокового датчика (ВД), сигнал с которого будет пропорционален количеству угля в объеме трубопровода в пределах чувствительности измерительной обмотки.

Компенсационную обмотку предлагается выполнить того же диаметра, что и у измерительной обмотки, но вынести ее вместе с частью обмотки возбуждения отдельно от трубопровода, тогда сигнал, сформировавшийся на измерительной обмотке будет пропорционален количеству угля в объеме трубопровода в пределах ее чувствительности. С вихретокового датчика сигнал поступает в блок предварительной обработки сигнала (БПОС) и после дифференцирования и усиления поступает в цифровой осциллограф (ЦО).



1 – резервуар воды; 2 – резервуар раствора реагента; 3 – шаровая мельница; 4 – зумпфы ВУТ; 5 – стержневая; 6 – контрольные емкости ВУТ; 7 – расходный резервуар ВУТ; 8 – емкость для хранения ВУТ; 9 – пробоотборники; 10 – приемная ёмкость; 11 – котлоагрегат

Рис. 4. Технологическая схема процесса приготовления ВУТ

Вихретоковый датчик может быть запитан от усилителя мощности (УМ) с возможностью усиливать входной сигнал в диапазоне частот до 1 МГц с максимальным выходным током до 1 А. В качестве задающего генератора (ЗГ) целесообразно использовать сигнальный генератор с возможностью изменять амплитуду сигнала с шагом

1 мВ и частоту сигнала с шагом 0,01 Гц в диапазоне от 0,01 мГц до 30 МГц.

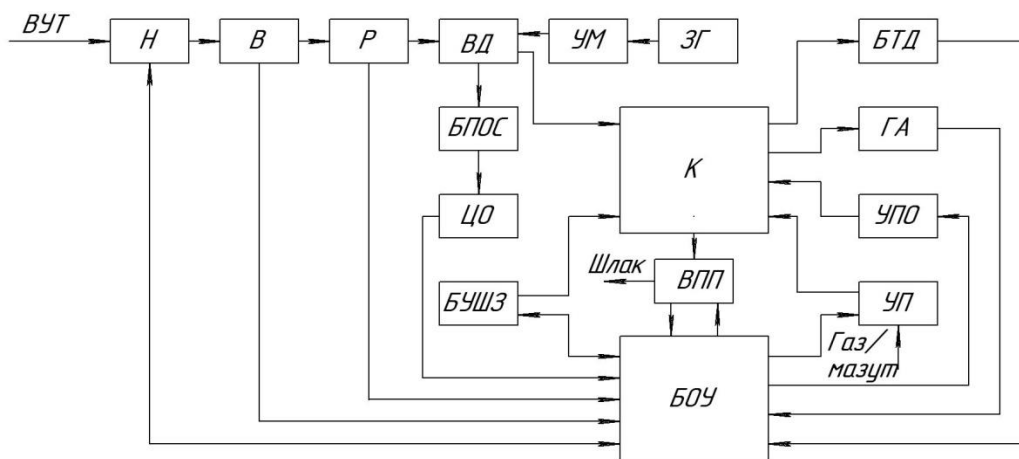
Сигнал с цифрового осциллографа поступает в блок обработки и управления, где происходит его фильтрация (быстрое преобразование Фурье) и определение уровня сигнала вносимого угольной компонентой. На основании данных поступающих с

цифрового осциллографа, а также данных поступающих с расходомера, вискозиметра, температурных датчиков, и газоанализатора (ГА) блок обработки и управления формирует сигналы управляющего воздействия, поступающие на насос, устройство подачи окислителя (УПО), и устройство подсветки (УП) для обеспечения оптимальных параметров горения топлива топке котлоагрегата. Уменьшение уровня сигнала, поступающего с цифрового осциллографа, может свидетельствовать об уменьшении процентного соотношения угля в ВУТ, вследствие возможного попадания породных масс на этапе его приготовления. Для поддержания дальнейшего устойчивого горения блок обработки и управления подает сигнал в устройство подсветки (УП) после чего в топку подается горючее вещество (мазут, газ и пр.). В разработанной структурной схеме также предусмотрено автоматическое удаление золосодержащих остатков, образующихся

в процессе работы котлоагрегата, при подаче сигнала на блок управления шиберной задвижкой происходит удаление золы и ее взвешивание на весовой поворотной платформе (ВПП). Данные о количестве золосодержащих остатков совместно с данными с газоанализатора и датчиков позволят находить оптимальные режимы работы котлоагрегата не зависимо от марки угля, который будет использован для приготовления ВУТ.

В качестве ядра блока обработки и управления может выступать современное микропроцессорное устройство способное поддерживать семейство операционных систем Windows/Linux.

При проведении экспериментов по определению параметров ВУТ вихретоковым методом был разработан и апробирован детектор зольности принципиальная схема которого приведена на рис.6.



БОУ - блок обработки и управления; БПОС - блок предварительной обработки сигнала; БТД - блок температурных датчиков; БУШЗ - блок управления шиберной задвижкой; В - вискозиметр; ВД - вихретоковый датчик; ВПП - весовая поворотная платформа; ГА - газовый анализатор; ЗГ - задающий генератор; К - котлоагрегат; Н - насос; Р - расходомер; УМ - усилитель мощности; УП - устройство подсветки; УПО - устройство подачи окислителя; ЦО - цифровой осциллограф

Рис. 5. Структурная схема системы автоматического регулирования котлоагрегата на водоугольном топливе

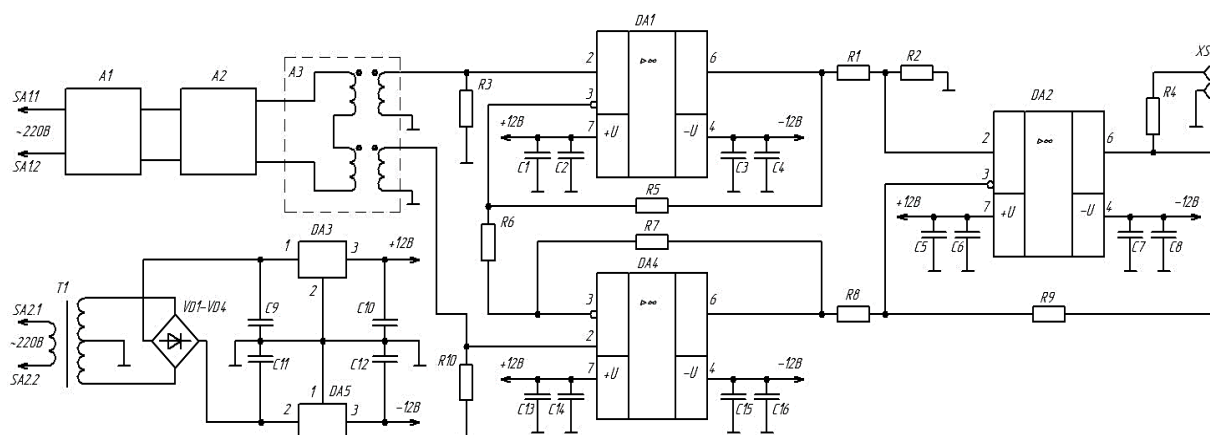


Рис. 6. Принципиальная схема детектора зольности ВУТ

В приведенной на рис. 6 принципиальной схеме в качестве задающего генератора (A1) использован сигнальный генератор JDS-2900 с возможностью изменять амплитуду сигнала с шагом 1 мВ и частоту сигнала с шагом 0,01 Гц в диапазоне от 0,01 мГц до 30 МГц. В качестве усилителя мощности (A2) использовался прибор LPA01 с возможностью усиливать входной сигнал в диапазоне частот до 1 МГц с максимальным выходным током до 1 А. Сигнал с измерительной и компенсационных обмоток вихретокового датчика (A3) на дифференциальный усилитель, который выполнен на операционных усилителях AD8065A (DA1, DA2, DA4) с коэффициентом усиления 40 dB на частоте до 1 МГц. Сигнал с выхода дифференциального усилителя подается на цифровой осциллограф VDS1022I данные с которого в дальнейшем подвергаются программной обработке.

В результате обработки сигнала с цифрового осциллографа при помещении в вихретоковый датчик образцов ВУТ получен сигнал, который изменялся в зависимости от концентрации доли угля в ВУТ. Влияния воды на изменение уровня выходного сигнала в ходе экспериментов не выявлено.

Выводы:

1. Произведен анализ факторов, влияющих на стабильность горения ВУТ в котлоагрегатах.
2. Предложена структурная схема системы автоматического регулирования котлоагрегата на водоугольном топливе обеспечивающая его оптимальные характеристики.
3. Разработана принципиальная схема детектора зольности ВУТ.
4. Параметры функциональных узлов и блоков указанные в статье могут быть рекомендованы при организации контроля зольности водоугольного топлива в потоке вихретоковым методом.

Л и т е р а т у р а

1. Бурдуков А. П. Экспериментальное исследование динамики горения капель водоугольных суспензий / А. П. Бурдуков, Е. И. Карпенко, В. И. Попов, В. Н. Разваляев, В. Д. Федосенко // Физика горения и взрыва. - Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 1996. - Т.32, № 4. - С.62-66.
2. Володкевич К. П. Основные проблемы и направления в области внедрения водоугольного топлива в систему топливообеспечения объектов жилищно-коммунального хозяйства и промышленности / К.П. Володкевич // Горный информационный бюллетень. - М.: Горная книга, 2004. - № 1. - С.233-236.
3. Делягин Г. Н. «ЭКОВУТ» - новое экологически чистое топливо XXI века / Г. Н. Делягин, С. Ф. Ерохин, А.П. Петраков // Сб. тр. межд. научн. конф. и школы семинара ЮНЕСКО «Химия на рубеже тысячелетий», Клязьма, 2000. - М.: Изд-во МГУ, 2000. - ч.1. - С. 101-105.
4. Пат. №57294 Украина, МПК D03C 7/00. Способ сухого обогащения угля : № u201007029 : заявл. 07.06.2010 : публик. 25.02.2011 / Комаров Н.В., Сентяй Р.Н. ; заявитель Комаров Н.В., Сентяй Р.Н. - 5 с.

5. Мурко В. И. Результаты эксплуатации опытно-промышленной установки по приготовлению и сжиганию водоугольного топлива из угольных шламов в котельной шахты «Тырганская»/ В.И. Мурко, Д.А. Дзюба, В.М. Коржов // Энергосбережение и энергоэффективность экономики Кузбасса. - Кемерово: Полиграф, 2005. - № 1/8. - С.91-94.

6. Определение факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива) влияющих на точность показаний измерительных устройств / Д. А. Капустин, А. В. Кущенко, В. В. Швыров, Р. Н. Сентяй // II Международная научно-техническая интернет-конференция «Актуальные вопросы механики текучих сред» : сайт. - 2018 - URL: <http://gdynamic.dahluniver.ru/node/60> (дата обращения: 05.07.2023).

7. Пинчук В. А. Влияние характеристик водоугольного топлива на закономерности процесса его горения / В.А. Пинчук // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. - Днепропетровск: Триакон, 2014. - №2-15. - С. 78 – 84.

8. Саломатов В. В. Реконструкция котлов малой теплоэнергетики на сжигание водоугольного топлива / В.В. Саломатов, У. В. Дорохова, С.В. Сыродой // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. (под ред. акад. Накорякова В.Е.). - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Вып. 18. - С. 18–33.

9. Саломатов В. В., Дорохова У.В., Сыродой С.В. Перевод котлов малой мощности на водоугольное топливо / В.В. Саломатов, У.В. Дорохова, С.В. Сыродой // Ползуновский вестник. - Барнаул: Изд-во ФГБОУ ВО «АГТУ им. И.И. Ползунова», 2013. - № 4-3. - С. 38- 46.

10. Сентяй Р.Н. Исследование и сравнительный анализ систем и способов поточного определения зольности угля на предприятиях / Р. Н. Сентяй, Д. А. Капустин, Г. В. Короп, В. В. Швыров // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5. Гуманитарные науки. Технические науки. - Луганск: Книта, 2022. - №1(79) – С. 99-107.

11. Сыродой С. В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук / Сыродой Семен Владимирович. - Томск, 2014. - 130 с.

12. Шундулиди А. И. Об экономической целесообразности использования водоугольного топлива / А.И. Шундулиди, В. И. Мурко, И. В. Хмяляйнен // Горный информационный бюллетень. - М.: Горная книга, 2003. - № 6. - С.161-163.

Sentyay R.N., Kapustin D.A., Gutko Yu. I., Shvyrov V.V.

AUTOMATION OF CONTROL OF QUALITY PARAMETERS OF COAL-WATER FUEL DURING ITS FLOW THROUGH A PIPELINE USING THE EDGE CURRENT METHOD.

The article is devoted to the development of a detection device for monitoring the parameters of coal-water fuel (CWF), as it flows through a pipeline, using the eddy current method. The work analyzes the factors influencing the operation of boilers operating on CWF, taking into account existing technological schemes for the preparation of water-coal fuel for power generating and heat generating enterprises. A block diagram of an automatic control system for a boiler unit operating on water-coal fuel has been proposed, and a schematic diagram of a detecting device has

been developed. Recommendations have been developed for organizing control of the ash content of CWF in the flow.

Key words: coal-water fuel, eddy current method, automation of parameter control, pass-through eddy current transducer, block diagram, circuit diagram, detector.

Сентяй Роман Николаевич, старший преподаватель кафедры «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.
E-mail: sentyayroman@yandex.ru

Капустин Денис Алексеевич, к.т.н., заведующий кафедрой «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.
E-mail: kap-kapchik@mail.ru

Sentyay Roman Nikolaevich, Senior Lecturer of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Гутько Юрий Иванович, д.т.н. профессор кафедры «Промышленное и художественное литье» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: iuriigutko@yandex.ru

Швыров Вячеслав Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Информационные образовательные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск.
E-mail: slavik_asas@mail.ru

Kapustin Denis Alekseevich, Candidate of Sciences, a head of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Gutko Yuri Ivanovich, Doctor of Sciences, a Professor of the Chair «Industrial and Art Casting» «LSU named after V. Dahl».

Shvyrov Vyacheslav Vladimirovich, Candidate of Sciences, a docent of the Chair «Information educational technologies and systems», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 25.11.2023

УДК 621.22: 621.694

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Сёмин Д. А., Нечаев Г. И., Левашов Я. Н., Михайличенко А. А.

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN HYDRODYNAMIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF VORTEX PIPELINE FITTINGS OF TRANSPORT SYSTEMS

Syomin D.A., Nechaev G. I., Levashov Y. N., Mikhailichenko A. A.

Производственный шум является одной из наиболее распространенных проблем, характерных для различных отраслей промышленности. Он оказывает негативное влияние на окружающую среду, здоровье человека и производительность труда, а также может привести к несчастным случаям и авариям.

Опыт внедрения в промышленные транспортно-технологические пневмосистемы принципиально новой струйной трубопроводной арматуры на основе вихревых клапанов показал, что наряду с ее неоспоримыми позитивными качествами, излучаемый устройствами высокий уровень звукового давления практически неприемлем для нормальных условий труда производственного персонала.

Экстенсивные меры по снижению шума до нормативных показателей путем шумоизоляции элементов систем и установки глушителей, обеспечили успешную промышленную эксплуатацию разработанного оборудования.

Вместе с тем, акустические свойства вихревых клапанов, практически не изучены, и представляют актуальную и важную научно-практическую проблему, сдерживающую дальнейшее развитие и совершенствование транспортно-технологических систем.

Выявление причин шума, установление закономерностей взаимосвязей акустических характеристик вихревых клапанов с особенностями их конструктивных модификаций позволит разработать интенсивные меры, снижающие уровень шума и минимизировать его.

В данной работе представлены результаты исследования взаимосвязи гидравлических и акустических свойств одной из простейших базовых модификаций вихревого клапана - с радиальным каналом питания и односторонним выходом из вихревой камеры. Рабочей средой являлся сжатый воздух низкого уровня давления.

Ключевые слова: вихревой клапан, пропускная способность, коэффициент расхода, радиальный канал питания, рабочая характеристика, акустическая характеристика.

Введение. Нестационарные явления в сплошных средах сопровождаются возмущениями, имеющими волновой характер. При этом диапазон частот волн принято разделять на звуковой (шум), который слышит ухо человека (16 Гц - 20 кГц), инфразвуковой (ниже 16 Гц) и ультразвуковой (свыше 20 кГц).

Одной из наиболее распространенных проблем, характерных для различных отраслей промышленности является производственный шум. Его источниками являются работающее оборудование и транспорт, создающие шум, создающий неблагоприятные условия на рабочих местах и загрязняющий окружающую среду.

Установлено, что шум на производстве неблагоприятно действует на организм человека: повышает расход энергии при одинаковой физической нагрузке, значительно ослабляет внимание работающих, увеличивает число ошибок в работе, замедляет скорость психических реакций, в результате чего снижается производительность труда и ухудшается качество работы. При длительном воздействии шума на организм происходят нежелательные явления: снижается острота зрения и слуха, повышается кровяное давление, снижается внимание. Шум затрудняет своевременную реакцию работающих на предупредительные сигналы внутрицехового транспорта, что способствует возникновению несчастных случаев на производстве. Шум оказывает вредное влияние на физическое состояние человека: угнетает центральную нервную систему; вызывает изменение скорости дыхания и пульса; способствует нарушению обмена веществ и возникновению сердечно-сосудистых заболеваний; приводит к профессиональным заболеваниям. Высокий уровень интенсивности звука в 120 дБ вызывает болевые ощущения, а 180 дБ смертельно опасны для человека. Негативно влияют на человека и окружающую среду инфра- и ультразвук [1-5].

Проблема борьбы с шумом на производстве направлена на создание комфортных условий на рабочих местах за счет соблюдения требований соответствия как имеющегося, так и нового оборудования и машин установленным стандартам и техническим условиям [10].

Исследования вихревых клапанов, проводимые на кафедре «Гидрогазодинамика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, позволили создать систему элементов струйной макротехники для непосредственного управления потоками текучих сред. На ее основе были осуществлены разработки устройств для легкой промышленности, приборов экологического контроля, высевających агротехнических систем.

Опыт внедрения и более чем двадцатилетней эксплуатации в транспортно-технологических операциях углеобогажительных фабрик Донбасса пневматического струйного привода отсадочных машин с использованием принципиально новой струйной трубопроводной арматуры на основе вихревых клапанов показал, что наряду с ее неоспоримыми позитивными качествами, создаваемый приводом уровень звукового давления практически неприемлем для нормальных условий функционирования производственного персонала и селитебной территории [8].

Экстенсивные меры по снижению шума до нормативных показателей путем шумоизоляции элементов систем и установки глушителей, обеспечили успешную промышленную эксплуатацию разработанного оборудования с соблюдением экологических нормативов.

Вместе с тем, акустические свойства вихревых клапанов, как основного источника шума, практически остались не изучены, и на сегодняшний день представляют актуальную и важную научно-практическую проблему, сдерживающую дальнейшее развитие и совершенствование транспортно-технологических и других систем, использующих вихревые клапаны.

Выявление причин шума, установление закономерностей взаимосвязей акустических характеристик вихревых клапанов с особенностями их конструктивных модификаций позволит разработать наряду с экстенсивными, интенсивные меры, снижающие уровень шума и минимизировать его.

Целью работы является изучение и установление взаимосвязей акустических и гидравлических свойств вихревого клапана «классической конструкции» - с радиальным каналом питания и односторонним выходным каналом.

Изложение основного материала. Как уже было отмечено во введении, причиной шума являются нестационарные явления в сплошных средах.

Особенности течения в проточной части вихревых клапанов различных модификаций и их гидравлические характеристики, установленные нами и другими исследователями, подробно изложены в работах [7-9]. Библиография последующих наших работ по вихревым клапанам наиболее полно отражена в [6]. Важно отметить, что акустические свойства вихревых клапанов при этом практически не изучались.

Как следует из анализа указанных работ, в вихревых клапанах причинами и источниками акустических волн могут являться следующие нестационарные гидродинамические явления:

- неустойчивость течения в приосевой зоне выходного канала при закрытии клапана;
- переменный по углу вращения эксцентриситет между геометрической осью вихревой камеры и гидродинамической осью приосевого вторичного течения в виде вихревого ядра;
- нутация и прецессия вихревого ядра;
- отрыв пограничного слоя на выходе из клапана и его сворачивание в вихревую пелену;
- отрывные явления при обтекании элементов проточной части клапана;
- турбулентные пульсации;
- резонанс образуемых указанными явлениями акустических волн.

Удельный вклад в аэродинамический шум каждого из указанных явлений различен и предположительно связан с особенностями конструкции каждой из модификаций клапана, его абсолютными размерами и рабочими параметрами. Установить эти пока что гипотетические связи и найти их закономерности мы ставим целью начинаемых исследований.

В данной работе производилось совместное измерение параметров гидравлических и акустических характеристик вихревого клапана указанной выше конструкции типа ВК-Р схема проточной части которого приведена на рис.1.

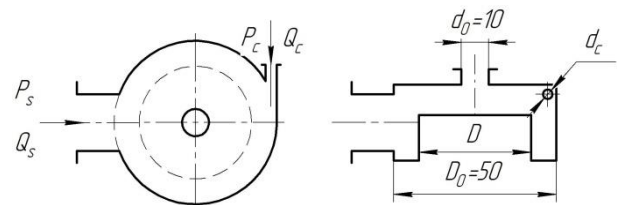


Рис. 1 Схема проточной части клапана

Экспериментальная установка (Рис. 2), на которой проводились настоящие исследования, состоит из двух центробежных нагнетателей 1 и 5, расходомерных устройств 3 и 7 чашечных микроанометров 2 и 6, пьезометров 4 и 8, вихревого клапана 9, звукоизолирующих кожухов 10, глушителей шума 11.

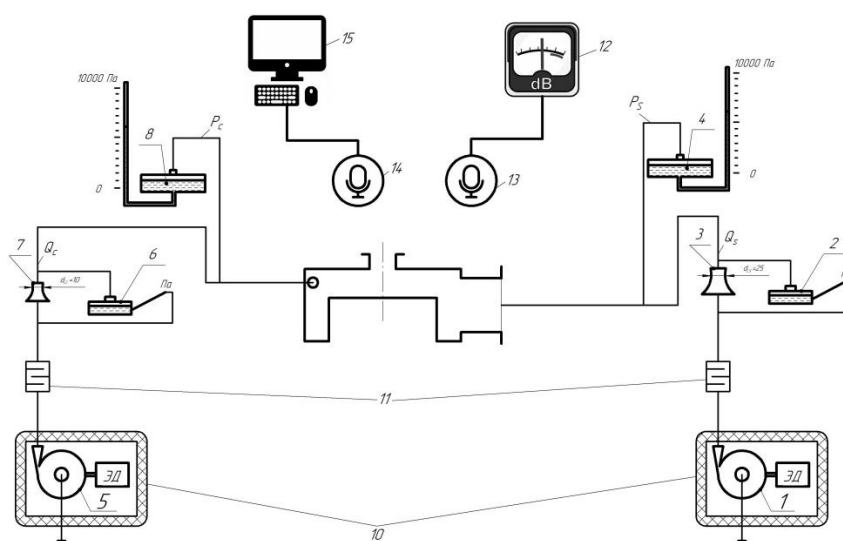


Рис. 2 Схема экспериментальной установки для исследования гидравлических и акустических свойств вихревых клапанов

Воздух от нагнетателя 1 подводился через расходомерное устройство 3 к каналу питания вихревого клапана. Поток управления подавался от нагнетателя 5, через расходомерное устройство 7, к каналу управления. Давления в каналах питания и управления измерялись пьезометрами 4 и 8. Перепады давления на расходомерах измерялись чашечными микроманометрами 2 и 6.

При трех фиксированных уровнях давления питания $P_s = [3; 4; 5] \text{ кПа} = \text{const}$, давление управления P_c увеличивалось вплоть до полного перекрытия потока питания Q_s через клапан. Каждому значению давления управления ставились в соответствие расходы воздуха через каналы питания и управления. Q_c Измерение акустических параметров в каждом из режимов осуществлялось шумомером ВШВ-003-М2 (рис. 2, поз.12), внешний вид которого представлен на рис. 3.

Прибор предназначен для измерения интенсивности I уровня звука $L = 10 \lg I/I_0$ [dB], с частотными характеристиками A, B, C в диапазоне частот от 2 Гц до 18 кГц и октавных полосах в диапазоне частот от 2 Гц до 8 кГц в свободном и диффузном полях при исследованиях машин и механизмов. Съём информации о шуме осуществлялся капсулем микрофонным конденсаторным М101 (рис.2, поз.13). По условиям эксплуатации ВШВ-003-М2 соответствует требованиям 2 группы ГОСТ 22261-82, диапазон температур от минус 10 до плюс 50 °С и относится к шумомерам I класса точности по ГОСТ 17187-81. Погрешность измерения шума $\pm 0,7$ дБ.

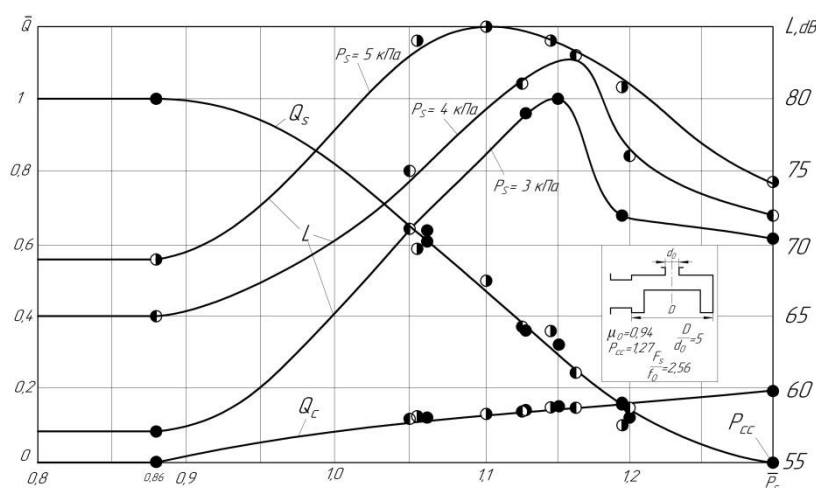
По результатам испытаний построены совмещённые гидравлическая и акустические характеристики представленные на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что шум, излучаемый вихревым клапаном типа ВК-Р, нарастает по мере увеличения давления управления и достигает своего максимального значения перед точкой заклинивания. Затем, при дальнейшем увеличении давления управления до давления заклинивания P_{cc} уровень шума снижается.



Рис. 3. Общий вид шумомера ВШВ-003-М2

Для оценки характера звуковых колебаний осуществлялась запись мгновенных значений звукового давления $A(t)$ при тех же параметрах давления управления P_c , что и при определении рабочих характеристик клапана. Запись осуществлялась с помощью микрофона (рис.2, поз.14), имеющего линейную характеристику в звуковом диапазоне частот 50 Гц -10 кГц и компьютера (рис. 2, поз. 15). Шумограммы в характерных точках, соответствующих максимальной интенсивности звука (рис. 5) и в состоянии запорного клапана (рис. 6) приведены ниже.



$$\bar{Q}_s = Q_s/Q_{s0}; \bar{Q}_c = Q_c/Q_{s0}; \bar{P}_c = P_c/P_s; \bar{P}_{cc} = P_{cc}/P_s$$

Вторые индексы о и с, соответственно, обозначают величину параметра в открытом и закрытом состоянии клапана

Рис. 4. Совмещённые акустические и рабочая характеристика вихревого клапана ВК-Р при различных уровнях давления питания

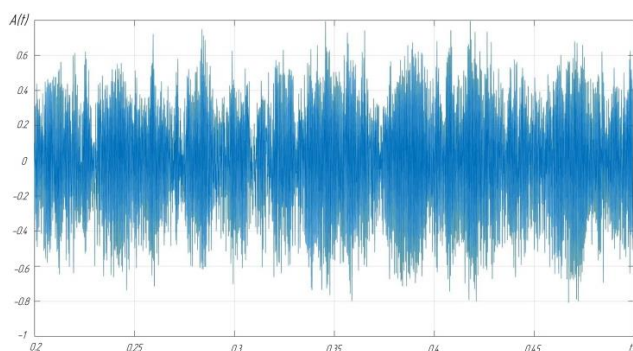


Рис. 5. Шумограмма, соответствующая максимальной интенсивности звука $L = L_{max}$ клапана при $\bar{P}_c = 1.1$

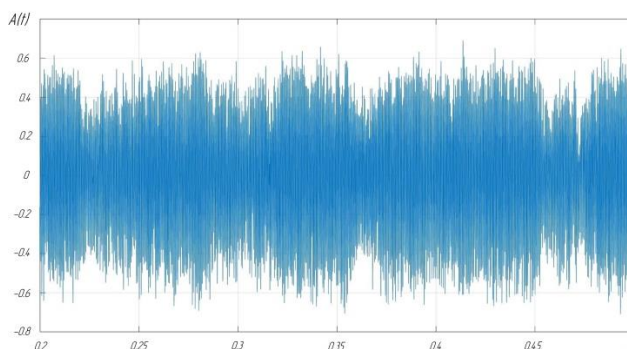


Рис. 6. Шумограмма, соответствующая интенсивности звука $L = L_{cc}$ закрытого клапана при $\bar{P}_c = \bar{P}_{cc} = 1.3$

Анализ экспериментальных шумограмм, приведенных на рис. 4 и 5, позволяет сделать вывод о том, что шум, излучаемый вихревым клапаном, представляет собой модулированные колебания.

Можно предположить, что низкие частоты колебаний порядка 20-40 Гц определяются частотой вращения вихревой зоны в выходном канале клапана, а высокие модулирующие частоты около 3000 Гц пропорциональны частоте срыва вихрей с участков поверхности проточной части клапана.

Уровни шума, измеренные в октавных полосах, представлены в таблице.

На основе результатов, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что из наибольших значений звукового давления, выделенных жирным шрифтом на каждой из частот режима работы клапана, максимальные уровни 78 dB и 79 dB соответствуют частоте 2 кГц вблизи точки записи.

Таблица
Уровни шума ВК-Р в октавных полосах, ($P_s = 4$ кПа)

	Октавные полосы L , dB						
$\bar{P}_c$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0	51	52	52	55	55	55	58
0,7	59	53	50	53	54	54	56
0,8	63	55	50	53	54	54	56
0,9	58	55	49	52	53	54	55
1	60	58	48	51	51	53	54
1,1	65	67	66	69	72	76	69
1,2	62	66	65	69	78	73	67
1,3	61	68	64	67	79	71	64

Экспериментально установленная взаимосвязь между максимальным уровнем звукового давления и давлением питания представлена на рис. 7.

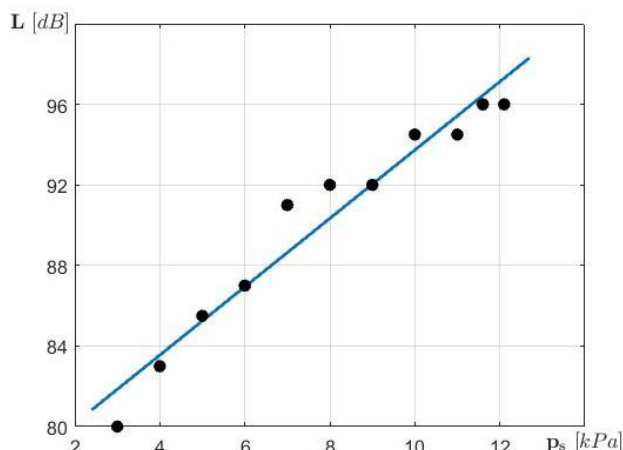


Рис. 7. Максимальная интенсивность звука, излучаемого вихревым клапаном в зависимости от давления питания

Можно считать, что в исследованном диапазоне $P_s = 2-12$ кПа, величина звукового давления клапана прямо пропорциональна уровню давления питания.

Выводы. Шум, излучаемый вихревым клапаном типа ВК-Р, нарастает по мере увеличения давления управления и достигает своего максимального значения перед точкой заклинивания. При дальнейшем увеличении давления управления до давления заклинивания $\bar{P}_{cc}$ уровень шума снижается до звукового давления закрытого вихревого клапана, которое превышает звуковое давление клапана в открытом состоянии.

Максимальный уровень шума предшествует точке заклинивания $\bar{P}_{cc} = 1.3$ на рабочей характеристике клапана и находится в диапазоне $\bar{P}_c = 1.1 - 1.15$ при разных значениях давления питания.

Величина звукового давления клапана прямо пропорциональна уровню давления питания в исследованном диапазоне $P_s = 2-12$ кПа.

Шум, излучаемый вихревым клапаном, представляет собой модулированные колебания.

Гипотеза:

низкие частоты колебаний порядка 20-40 Гц определяются характером вторичного течения в выходном канале клапана;

высокие модулирующие частоты около 3 кГц пропорциональны частоте срыва вихрей с участков поверхности проточной части клапана.

Проверка этого предположения будет осуществлена в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Блинова, Л. П. Акустические измерения: моногр. / Л.П. Блинова, А.Е. Колесников, Л.Б. Ланганс. - М.: Государственное издательство стандартов, 2022. - 272 с.
2. Гензель, Г. Основы акустики / Г. Гензель, А. Заездный. - М.: Морской транспорт, 2019. - 388 с.
3. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н.И. Иванов. - М.: Логос, 2018. - 454 с.
4. Исакович, М. А. Общая акустика / М.А. Исакович. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 2018. - 496 с.
5. Левашов Я.Н. Повышение эффективности трубопроводных транспортных систем снижением энергозатрат на управление вихревой арматурой. Дисс. канд. техн. наук. Луганск, 2022, 150 с.
6. Сёмин Д.А. Разработка и совершенствование характеристик крупномасштабных вихревых клапанов. Дисс. канд. техн. наук. Луганск, 1992, 203 с.
7. Сьомін Д.О. Вихрові виконавчі пристрої: В 2-х частинах. Ч.1. Однорідні робочі середовища: монографія. / Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Мальцев Я.І., Войцеховський С.В., Роговий А.С., Дмитрієнко Д.В., Мальцева М.О. - Луганськ: вид-во СЛУ ім. В.Даля, 2009. - 284 с.
8. Сьомін Д.О. Вихрові виконавчі пристрої: В 2-х частинах. Ч.2. Гетерогенні робочі середовища: монографія. / Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Мальцев Я.І., Войцеховський С.В., Роговий А.С., Дмитрієнко Д.В., Мальцева М.О. - Луганськ: вид-во СЛУ ім. В.Даля, 2010. - 190 с.
9. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. Справочник / Е.Я. Юдин и др. Под общ. ред. Е.Я. Юдина - М. Машиностроение, 1985. - 400 с.

Syomin D.A., Nechaev G. I., Levashov Y. N.,
Mikhailichenko A. A.

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN HYDRODYNAMIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF VORTEX PIPELINE FITTINGS OF TRANSPORT SYSTEMS

Industrial noise is one of the most common problems found in various industries. It has a negative impact on the environment, human health and labor productivity, and can also lead to accidents and accidents.

The experience of introducing fundamentally new jet pipeline fittings based on vortex valves into industrial transport and technological pneumatic systems has shown that, along with its undeniable positive qualities, the high level of sound pressure emitted by the devices is practically unacceptable for normal working conditions of production personnel.

Extensive measures to reduce noise to standard levels by soundproofing system elements and installing silencers ensured the successful industrial operation of the developed equipment.

At the same time, the acoustic properties of vortex valves have been practically unstudied and represent a pressing and important scientific and practical problem that hinders the further development and improvement of transport and technological systems.

Identification of the causes of noise, establishment of patterns of relationships between the acoustic characteristics of swirl valves and the features of their design modifications will make it possible to develop intensive measures that reduce the noise level and minimize it.

This paper presents the results of a study of the relationship between the hydraulic and acoustic properties of one of the simplest basic modifications of a vortex valve - with a radial supply channel and a one-way exit from the vortex chamber. The working medium was low pressure compressed air.

Key words: vortex valve, throughput, flow coefficient, radial supply channel, operating characteristics, acoustic characteristics.

Сёмин Дмитрий Александрович, д.т.н. профессор кафедры «Гидрогазодинамика» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Нечаев Григорий Иванович, д.т.н., профессор кафедры транспортных технологий ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Левашов Ярослав Николаевич, доцент кафедры «Гидрогазодинамика» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Михайличенко Алиса Антоновна аспирант кафедры «Транспортные технологии» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Syomin Dmitry Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics of the «LSU named after V. Dahl».
E-mail: sdaa261@yandex.ru

Нечаев Григорий Иванович, д.т.н., профессор кафедры транспортных технологий ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Nechaev Grigory Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Technologies «LSU named after V. Dahl».

Levashov Yaroslav Nikolayevich, Associate Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics of the «LSU named after V. Dahl».
E-mail: xpioneerx@mail.ru

Mikhailichenko Alisa Antonovna postgraduate student of the Department of Transport Technologies of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Тарарычкин Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой транспортных технологий ФБГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

УДК 621.22: 621.694

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ЕЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВИХРЕКАМЕРНЫМ НАГНЕТАТЕЛЕМ

Сёмин Д. А., Левашов А. Н., Ковалевский Д. С.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE BULK MEDIUM ON THE PROCESS OF ITS TRANSPORTATION BY A VORTEX CHAMBER SUPERCHARGER

Syomin D. A., Levashov A. N., Kovalevsky D. S.

На лабораторной модели системы трубопроводного пневмотранспорта с вихрекамерным питателем проведены исследования влияния гранулометрического состава сыпучей среды на процесс ее транспортирования. Определены значения производительности, потребляемой мощности и непроизводительных потерь в дренажный канал для фракций кварцевого песка.

Ключевые слова: вихрекамерный нагнетатель, трубопроводный пневмотранспорт, рабочие характеристики, твердые частицы, дисперсный состав, гранулометрический состав, производительность, энергетическая эффективность.

Введение. Во многих технологических схемах различных отраслей промышленности нагнетатели являются одним из основных элементов гидропневматических систем. Возможность снижения энергетических и материальных затрат при перекачивании различных сред является важнейшей проблемой промышленности, поскольку затраты на перекачивание в некоторых отраслях промышленности составляют более половины общих производственных затрат. Особенно остро этот вопрос стоит в угольной, химической, металлургической промышленности, транспорте, при переработке полезных ископаемых, где насосное оборудование и пневматические транспортные системы эксплуатируются в неблагоприятных условиях, а именно: резкие перепады температуры, вибрация, ударные нагрузки, повышенная влажность, запыленность, химическая и абразивная агрессивность рабочей и внешней среды. Использование трубопроводного гидро- и пневмотранспорта растет с каждым годом, что обусловлено простотой конструкции и небольшими габаритными размерами, но применение такого оборудования в указанных выше отраслях показывает достаточно низкую его надежность и влечет за собой значительные эксплуатационные расходы, достигающие половины стоимости данного оборудования. Применение струйных устройств

позволяет решить проблему надежности за счет отсутствия в их конструкции механических подвижных элементов, но при этом струйная техника имеет достаточно низкий КПД, не превышающий 30% для прямоточных насосов и 10% для вихревых эжекторов.

Дальнейший поиск более эффективных способов передачи энергии – за счет сочетания процессов обмена количеством движения в центробежном поле вихревой камеры, в исследуемых вихрекамерных нагнетателях - ВКН (рис. 1) [2, 3, 5–12], является новым и актуальным направлением исследований.

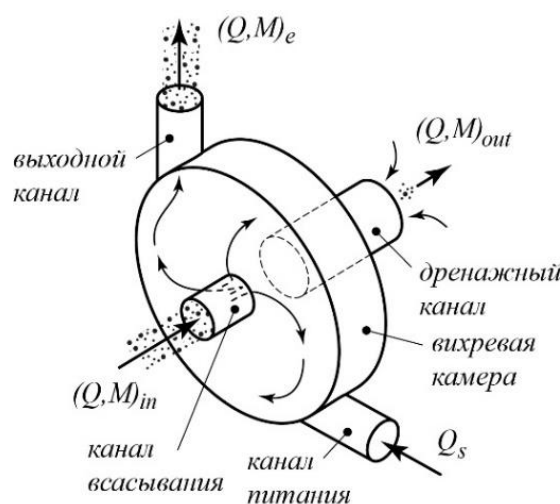


Рис. 1. Схема вихрекамерного нагнетателя (ВКН).

$Q_s, Q_e, Q_{out}, Q_{in}$ – расходы несущей среды: питания, выходной, дренажный и всасывания соответственно. M_{in}, M_e, M_{out} – массовые расходы перекачиваемой сыпучей среды: всасывания, выходной и дренажный соответственно.

В работе [4] определена работоспособность вихрекамерного нагнетателя (ВКН) – питателя

пневмотранспортной системы, установлены рабочие режимы и рабочие характеристики пневмотранспортной системы при транспортировании компонентов формовочной смеси, в частности кварцевого песка.

Как правило, транспортируемые в промышленности, сыпучие грузы представляют собой полидисперсные смеси. Одним из важных факторов, который необходимо учитывать при проектировании пневмотранспортных систем – это влияние дисперсного состава транспортируемого груза на ее рабочие характеристики. На первом этапе необходимо определить влияние размера и массы частиц монодисперсных сыпучих сред на рабочие характеристики вихрекамерного нагнетателя (ВКН) – питателя пневмотранспортной системы.

Цель работы: исследовать влияние размера частиц типичных сыпучих сред на рабочие характеристики вихрекамерного нагнетателя (ВКН).

Изложение основного материала. Рабочие характеристики вихрекамерного нагнетателя при транспортировании сыпучих грузов могут зависеть от множества факторов: давления питания p_s , давления в выходном канале p_e (или противодавления транспортной магистрали), физических свойств несущей дисперсионной среды (ее плотности, вязкости), физических свойств транспортируемой дисперсной фазы (ее дисперсного и фракционного состава, формы частицы, влажности, способности образовывать агломераты, склонности к слеживанию, адгезии частиц, диспергации частиц, пондеромоторных сил), массовой и объемной концентрации дисперсной фазы [1, 13, 14].

В работе [4] приведены результаты испытаний ВКН для полидисперсных проб кварцевого песка. В настоящем исследовании с помощью стандартных сит выделены узкие фракции кварцевого песка.

Значение размеров частиц в пробах, которые участвовали в эксперименте, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рассев частиц кварцевого песка в мм			
Размеры частиц в мм			
0,1	0,2	0,3	0,4

Лабораторная модель пневмотранспортной системы с вихрекамерным нагнетателем (рис. 2), схема которой представлена на рис. 3, использовалась для исследования влияния размера частиц кварцевого песка на характеристики его пневмотранспортирования.

Основные геометрические соотношения модели ВКН представлены в табл. 2 (рис. 3).

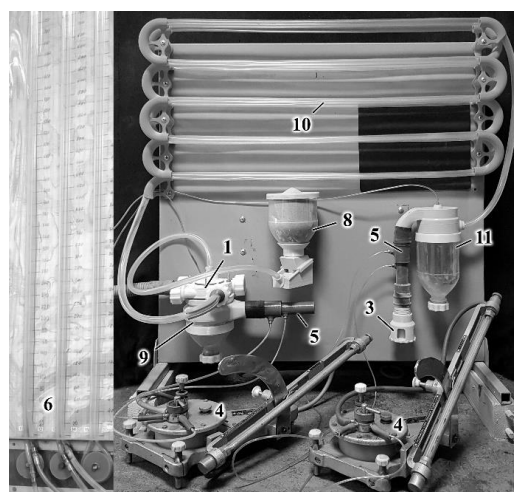


Рис. 2. Лабораторная модель пневмотранспортной системы (обозначения элементов соответствуют схеме на рис. 3)

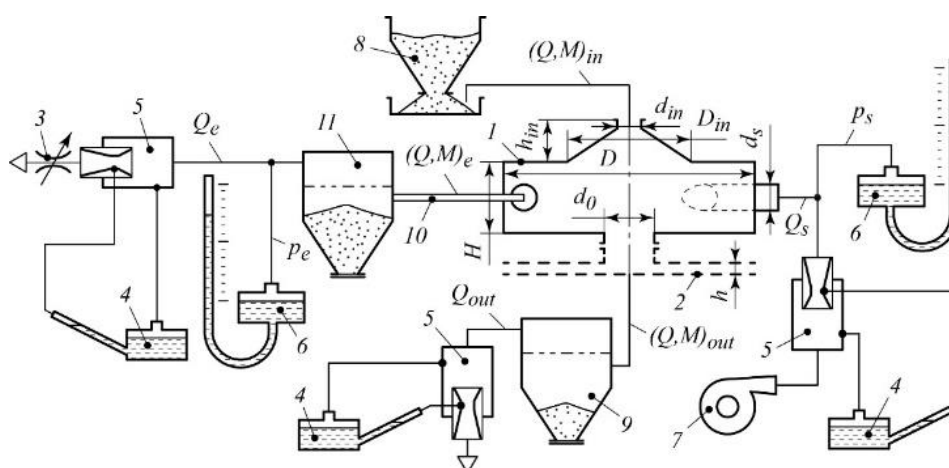


Рис. 3. Схема пневмотранспортной системы.

1 – вихрекамерный нагнетатель, 2 – радиальный диффузор, 3 – дроссель, 4 – микроманометр, 5 – расходомер, 6 – пьезометр, 7 – нагнетатель воздуха, 8 – загрузочный бункер, 9 – приемный бункер с фильтром, 10 – транспортная магистраль (длина – 10 м, диаметр – 10 мм), 11 – дренажный бункер. Q_s , Q_e , Q_{out} , Q_{in} – транспортирующие потоки: питания, выходной, дренажный и всасывания соответственно. M_{in} , M_e , M_{out} – транспортируемые потоки сыпучей среды: всасывания, выходной и дренажный соответственно. p_s – давление питания, p_e – давление в выходном канале. h – высота щели радиального диффузора, d_0 – диаметр дренажного отверстия, D – диаметр вихревой камеры, H – высота вихревой камеры, d_s – эквивалентный диаметр канала питания, h_{in} – высота канала всасывания, d_{in} – диаметр входной части канала всасывания, D_{in} – диаметр выходной части канала всасывания

Таблица 2
Геометрические размеры ВКН, отнесенные к диаметру дренажного канала $d_0 = 12$ мм (см. рис.2)

D	d_s	H	D_{in}	h_{in}	d_{in}	h
5	10/12	1	4	2.5	0.4	0.08

На рис. 4 представлены производительность пневмотранспортной системы с вихрекамерным нагнетателем M_e , удельная энергия N – энергия, потребляемая нагнетателем на транспортирование 1 тонны кварцевого песка, непроизводительные потери M_{out} – массовый расход частиц кварцевого песка, попадающих в дренажный канал, в процентах относительно M_e в зависимости от размера фракции кварцевого песка.

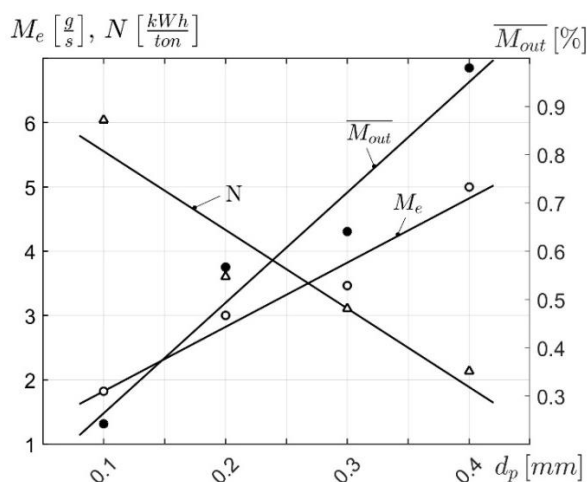


Рис. 4. Графики зависимостей массовых расходов и потребляемой мощности ВКН от размера частиц кварцевого песка

Из рис. 4 видно, что производительность системы M_e практически линейно увеличивается с ростом размера твердых частиц. При транспортировании монодисперсной пробы кварцевого песка увеличение размера частиц вдвое приводит к более чем полуторакратному увеличению производительности транспортной системы, при этом параметры потока (давление и расход) несущей дисперсионной среды – воздуха – практически не изменяются. Этот вывод можно сделать из зависимости удельной потребляемой энергии N , которая линейно снижается с ростом размера частиц кварцевого песка.

Анализ зависимости M_{out} показывает, что при увеличении размера твердых частиц вдвое приводит также практически к двукратному увеличению непроизводительных потерь в дренажный канал. Это происходит в следствие того, что поверхностные силы, действующие на твердую частицу, пропорциональны второй степени, а массовые силы, центробежная и гравитационная, пропорциональны третьей степени линейного размера твердой частицы. Поэтому более крупной

твердой частице требуется больше времени для того, чтобы она, двигаясь от периферии к центру, успела выйти за пределы радиуса дренажного канала (рис 3, размер d_0).

Выводы.

Производительность пневмотранспортной системы при постоянной потребляемой мощности возрастает более чем в 1.5 раза в сравнении с пробой вдвое более мелкой фракции. Данный результат для исследуемого гранулометрического диапазона можно объяснить тем, что частицы более крупных фракций в следствие меньшей суммарной площади их поверхностей в пробе приводят к меньшей деформации поля скоростей потока дисперсионной среды в центральной области вихревой камеры нагнетателя. Крупные частицы, обладая большей инерционной массой, требуют большего времени, чтобы покинуть приосевую область вихревой камеры нагнетателя, что приводит к пропорциональному увеличению непроизводительных потерь в дренажный канал для проб песка вдвое увеличенной фракции.

Л и т е р а т у р а

1. Разумов, И. М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности : Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии» / И. М. Разумов. – М. : Химия, 1979. – 245 с.
2. Сёмин, Д. А. Математическое моделирование движения твердой частицы в короткой вихревой камере / Д. А. Сёмин, А. С. Роговой, Д. В. Дмитриенко // Вісник СЛУ ім. В. Даля. – 2003. – № 9(67). – С. 123-126.
3. Сёмин, Д. А. Математическое моделирование рабочего процесса в струйно-вихревых насосах / Д. А. Сёмин, Я. И. Мальцев, А. С. Роговой // Вісник СЛУ ім. В. Даля. – 2005. – № 9(91). – С. 201-206.
4. Сёмин, Д. А. Моделирование работы вихрекамерного нагнетателя в системах трубопроводного пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих грузов / Д. А. Сёмин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2022. – № 4 (58). – С. 239-245.
5. Сёмин, Д. А. Особенности рабочего процесса и характеристик безроторных центробежных насосов / Д. А. Сёмин, А. С. Роговой // Теория и практика насосо- и компрессоростроения / В. А. Марцинковский и др. ред. – Сумы : Сумский государственный университет, 2011. – С. 340-346.
6. Сёмин, Д. А. Снижение потерь перекачиваемой среды в вихрекамерных нагнетателях / Д. А. Сёмин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов, Н. А. Погонина // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 4-2 (6). – С. 196-199.
7. Сёмин, Д. А. Совершенствование рабочих характеристик вихрекамерных нагнетателей / Д. А. Сёмин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. – 2016. – С. 383-388.
8. Сёмин, Д. А. Экспериментальные исследования характеристик струйно-вихревого насоса / Д. А. Сёмин, А. С. Роговой // Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2005. – № 12 (84). – С. 64-70.

9. Сьомін, Д. О. Вихорокамерні нагнітачі / Д. О. Сьомін, А. С. Роговий. – Х. : ФОП Мезіна В.В., 2017. – 204 с.

10. Сьомін, Д. О. Підвищення ефективності переміщення вантажів трубопровідним транспортом засобами струминної арматури : Дис ... д-ра техн. наук: 05.22.12 / Д. О. Сьомін. – Луганськ : Східноукраїнський національний ун-т ім. Володимира Даля, 2004. – 381 с.

11. Сьомін, Д. О. Вихрові виконавчі пристрої : Однорідні робочі середовища : в 2 т. Т. 1 / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев, и др. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2009. – 256 с.

12. Сьомін, Д. О. Вихрові виконавчі пристрої : Гетерогенні робочі середовища : в 2 т. Т. 2 / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев, и др. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. – 190 с.

13. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М. : Изд-во Акад. Наук СССР, 1955. – 352 с.

14. Шрайбер, А. А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом / А. А. Шрайбер, В. Н. Милютин, В. П. Яценко. – Киев : Наук. думка, 1980. – 249 с.

Syomin D.A., Levashov A. N., Kovalevsky D.S.
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE BULK MEDIUM ON THE PROCESS OF ITS TRANSPORTATION BY A VORTEX CHAMBER SUPERCHARGER

Laboratory studies of the influence of the granulometric composition of the bulk medium on the process of its transportation were carried out on a model of a pipeline pneumatic transport system with a vortex chamber feeder. The values of productivity, power consumption and unproductive losses in the drainage channel for narrow fractions of quartz sand are determined.

Keywords: vortex chamber supercharger, pneumatic pipeline transport, performance characteristics, solid

particles, dispersed composition, granulometric composition, productivity, energy efficiency.

Сємин Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор кафедры «Гидрогазодинамика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

E-mail: sdaa261@yandex.ru

Левашов Артем Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Гидрогазодинамика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: boschcdi@yandex.ru

Ковалевский Денис Сергеевич аспирант кафедры «Гидрогазодинамика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Syomin Dmitry Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor at the Department of Fluid and Gas Dynamics of «LSU named after V. Dahl».

Levashov Artem Nikolayevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Fluid and Gas Dynamics of the «LSU named after V. Dahl».

Kovalevsky Denis Sergeevich, Postgraduate at the Department of Fluid and Gas Dynamics of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Тарарычкин Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой транспортных технологий ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

УДК 621.22:621.694

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВИХРЕВЫХ КЛАПАНОВ С ДИФфуЗОРНЫМИ ВЫХОДНЫМИ КАНАЛАМИ

Сёмин Д. А., Левашов Я. Н., Левашов А. Н., Серых А. В.

ESTIMATION OF THE FLOW CAPACITY OF VORTEX VALVES WITH DIFFUSER OUTPUT CHANNELS

Syomin D.A., Levashov Ya.N., Levashov A.N., Serykh A.V.

Произведен гидравлический расчет устройства, состоящего из вихревого клапана и присоединенного к его выходному отверстию диффузора. Получены и проанализированы аналитические соотношения позволяющие определить эффект изменения расхода через вихревой клапан путем применения диффузоров с различными геометрическими параметрами.

Определены условия максимальной эффективности применения диффузоров в устройстве.

Произведена количественная оценка эффекта влияния параметров осевого диффузора на пропускную способность устройства.

Ключевые слова: устройство, вихревой клапан, диффузор, коэффициент расхода, эффективность.

Введение. Одним из направлений совершенствования и дальнейшего развития транспорта промышленных предприятий является повышение надежности оборудования трубопроводного гидравлического и пневматического транспорта твердых сыпучих материалов [9]. Характерной чертой трубопроводного транспорта промышленных предприятий является его непосредственная связь с технологическими процессами данных производств. К таким производствам относятся предприятия по обогащению угля, руд черных и цветных металлов, заводы строительной индустрии (изготовление цемента, облицовочной плитки и др.), на которых в составе гидро- и пневмосмесей перемещаются абразивные твердые компоненты. В угольной, горнорудной промышленности, на тепловых электростанциях, предприятиях черной и цветной металлургии, строительной индустрии и др. ежегодно трубопроводным транспортом перемещается свыше сотни миллионов тонн твердых материалов. Неблагоприятные условия эксплуатации предъявляют жесткие требования к надежности оборудования и технологии систем транспортировки.

В настоящее время управление потоками транспортируемых сред в трубопроводных транспортно-технологических системах

осуществляется трубопроводной арматурой механического действия. Резкие перепады температуры, вибрация, знакопеременные ускорения и ударные нагрузки, повышенная влажность, запыленность, химическая агрессивность рабочей и окружающей сред, а при транспортировке сыпучих грузов еще и абразивное их воздействие, снижает надежность трубопроводной арматуры, по сравнению с нормальными условиями эксплуатации, в десятки, а в некоторых случаях в сотни раз. При этом срок ее службы исчисляется одной или несколькими неделями и существенно определяет эффективность трубопроводных транспортных систем, негативно отражаясь на количественных и качественных показателях, а в конечном счете на экономических.

Эти обстоятельства определяют актуальность и практическую направленность исследований, связанных с разработкой и совершенствованием характеристик принципиально новой - струйной трубопроводной арматуры, регулирующие органы которой не содержат подвижных механических частей, поэтому не чувствительны к перечисленным экстремальным условиям эксплуатации. При этом они обладают наиболее важными качествами струйной техники – более высокой надежностью и долговечностью по сравнению с механической арматурой.

Наиболее универсальными по своим свойствам и рабочим характеристикам из числа известных струйных элементов являются вихревые клапаны. Целенаправленные научные исследования по разработке теории вихревых регулирующих органов и созданию на их основе устройств и систем для непосредственного управления силовыми потоками текучих сред начаты в 80-х годах прошлого столетия в ЛГУ им. В. Даля [6,9].

Опыт успешной промышленной эксплуатации вихревой арматуры в составе пневматических струйных приводов на углеобогащательных фабриках Донбасса в течение более чем двух десятилетий, подтвердил перспективность направления решения указанной проблемы. За

указанный период вихревые пульсаторы работали безотказно, не требуя обслуживания и ремонта.

Вместе с тем были выявлены недостатки и намечены пути совершенствования вихревых клапанов, на базе которых созданы пульсаторы отсадочных машин.

Цель работы заключается в нахождении и анализе аналитической зависимости, связывающей коэффициент расхода устройства, состоящего из вихревого клапана и присоединенного к его выходному отверстию диффузора, с параметрами его определяющими. На основе полученных результатов выработать рекомендации, направленные на достижение максимальной пропускной способности устройства.

Изложение основного материала. Одним из наиболее существенных недостатков присущих вихревым клапанам является необходимость в затратах среды и энергии на удержании его в закрытом состоянии.

Основными параметрами, характеризующими качество вихревых клапанов, являются: коэффициент расхода клапана в открытом состоянии μ_0 , параметры запирающего потока, постоянная времени и рабочая характеристика. Взаимосвязь между параметрами запирающего клапана следующая [6]:

$$\bar{p}_{cc} = \frac{p_{cc} - p_e}{p_s - p_e}, \quad \bar{Q}_{cc} = \frac{Q_{cc}}{Q_{so}} = \frac{\mu_c}{\mu_0} \bar{d}_c^2 \sqrt{\bar{p}_{cc} - 1},$$

$$\bar{N}_{cc} = \bar{p}_{cc} \bar{Q}_{cc} = \frac{\mu_c}{\mu_0} \bar{d}_c^2 \bar{p}_{cc} \sqrt{\bar{p}_{cc} - 1}.$$

Как следует из приведенных соотношений, повышение пропускной способности вихревого клапана, характеризуемой коэффициентом расхода μ_0 , позволяет не только снизить расход и мощность запирающего, но и уменьшить его абсолютные размеры за счет снижения диаметра выходного отверстия - «горла» d_0 , при сохранении расхода через открытый клапан:

$$d_0 \sim \sqrt{\frac{1}{\mu_0}}.$$

Одной из наиболее эффективных мер, повышающей μ_0 клапана, является установка диффузора в выходном патрубке [2,3,7]. При этом важно установить на этапе проектирования параметры диффузора и его влияние на коэффициент расхода клапана.

Решить поставленную задачу можно используя гидравлический подход [8], т.е. производя гидравлический расчет устройства (рис.1.) на основе уравнения Бернулли и уравнения неразрывности для несжимаемой среды.

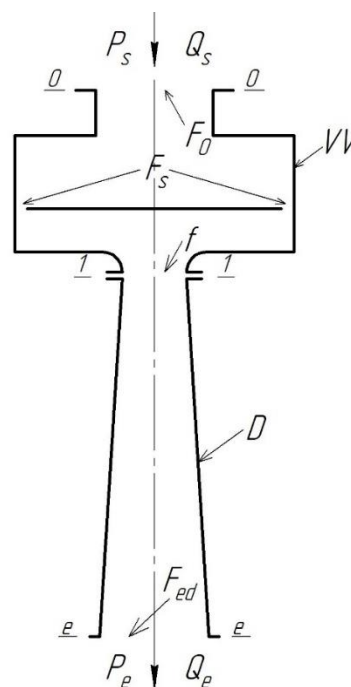


Рис.1. Расчётная схема вихревого клапана с диффузором

Основные допущения и предположения:

- клапан находится в полностью открытом состоянии, соответствующем отсутствию управляющего потока (на схеме не показан);
- течение рассматривается с осредненными по сечению параметрами;
- течение развитое турбулентное при числах Рейнольдса $Re \geq 10^5$;
- рабочая среда несжимаемая, число Маха $M \ll 1$, при котором можно считать $\rho = const$;
- течение в диффузоре безотрывное [10,11];
- сужения струи в сечении 1-1 ввиду плавности геометрической формы выходного патрубка не происходит;
- перепад статических давлений Δp на входе в клапан p_s и на выходе из него p_e , для случаев без диффузора в выходном канале и с диффузором один и тот же

$$\Delta p = (p_s - p_e) \sim idem.$$

Ограничения, определяемые физическими свойствами рабочей среды:

- течение капельной среды происходит до появления парообразования в горловом сечении;
- течение газовой среды происходит при докритическом режиме [5].

Будем рассматривать два случая:

1. Вихревой клапан без диффузора.

С учетом принятых допущений, уравнение Бернулли [1], записанное для сечений 00 – 11 имеет вид

$$p_0 + \alpha_0 \rho \frac{V_0^2}{2} = p_1 + \alpha_e \rho \frac{V_1^2}{2} + \Delta p_{0-1}^*.$$

Здесь V – скорость в рассматриваемом сечении (обозначенного индексом), $-\Delta p_{0-1}^*$ – потери полного давления между рассматриваемыми сечениями (см. индекс).

Заменяя параметры течения, записанные в общей форме, на обозначения, принятые для вихревого клапана (рис.1),

$$p_0 = p_s; \quad V_0 = \frac{Q_s}{F_0}; \quad p_1 = p_e; \quad \varepsilon = \frac{f_c}{f} = 1;$$

$$V_1 = \frac{Q_s}{f}$$

и записав выражение для потерь полного давления на клапане, имеющем коэффициент гидравлического сопротивления ζ_{vv}

$$\Delta p_{0-1}^* = \zeta_{vv} \rho \frac{V_1^2}{2} = \zeta_{vv} \rho \frac{Q_s^2}{2f^2},$$

получим преобразованное исходное уравнение Бернулли в виде

$$p_s + \alpha_0 \rho \frac{Q_s^2}{2F_0^2} = p_e + \alpha_e \rho \frac{Q_s^2}{2f^2} + \zeta_{vv} \rho \frac{Q_s^2}{2f^2}.$$

Из него следует:

$$p_s - p_e = \rho \frac{Q_s^2}{2f^2} \left(\alpha_e + \zeta_{vv} - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2} \right).$$

Т.о. расход через клапан без диффузора, будет определяться соотношением

$$Q_s = \frac{f}{\sqrt{\left(\zeta_{vv} + \alpha_e - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2} \right)}} \sqrt{\frac{2(p_s - p_e)}{\rho}}. \quad (1)$$

2. Вихревой клапан с диффузором в выходном патрубке.

При подсоединении к выходному отверстию диффузора, в случае безотрывного течения в нем, уравнение Бернулли для сечений $00 - ee$, запишется в следующем виде:

$$p_s + \alpha_0 \rho \frac{Q_{sd}^2}{2F_0^2} = p_e + \alpha_{ed} \rho \frac{Q_{sd}^2}{2F_{ed}^2} + \zeta_{vv} \rho \frac{Q_{sd}^2}{2f^2} + \zeta_d \rho \frac{Q_{sd}^2}{2f^2},$$

из которого следует, что при наличии диффузора в выходном патрубке, расход через открытый клапан будет определяться соотношением

$$Q_{sd} = \frac{f}{\sqrt{\zeta_{vv} + \alpha_{ed} \frac{f^2}{F_{ed}^2} + \zeta_d - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}}} \sqrt{\frac{2(p_s - p_e)}{\rho}} \quad (2)$$

Следуя известной формуле расхода при истечении несжимаемой жидкости [1],

$$Q = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

а также, принятому условию одинаковых перепадов давления на клапане в рассматриваемых случаях 1 и 2,

$$\Delta p = (p_s - p_e) \sim idem,$$

с учетом того, что $\zeta_{vv} \sim idem$, так как конфигурация проточной части до диффузора неизменна, получим соотношения для коэффициентов расхода клапанов рассматриваемых модификаций:
без диффузора

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{vv} + \alpha_e - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}}}, \quad (3)$$

с диффузором

$$\mu_d^* = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{vv} + \alpha_{ed} \cdot \frac{f^2}{F_{ed}^2} + \zeta_d - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}}}. \quad (4)$$

Заметим, что для удобства сравнения (3) и (4) коэффициенты расхода устройства определены для одной и той же площади сечения горла f . Поэтому для 2-го случая $\mu_d^* \geq 1$, т.е. является приведенным.

Соотношение между полученными коэффициентами расхода для рассмотренных случаев:

$$k_\mu = \frac{\mu_d^*}{\mu} = \sqrt{\frac{\zeta_{vv} + \alpha_e - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}}{\zeta_{vv} + \alpha_e \cdot \frac{f^2}{F_{ed}^2} + \zeta_d - \alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}}}. \quad (5)$$

Оценим порядок величин входящих в (5). Исходя из рекомендаций для геометрических параметров проточной части [6] и экспериментальных значений коэффициентов гидравлического сопротивления вихревых клапанов [7] и диффузоров [3], получаем:

$$O\left(\frac{f}{F_0}\right) \sim 10^{-2}; \quad \frac{F_{ed}}{f} = n; \quad n = 4 \div 16; \quad \alpha_e \approx 1;$$

$$\alpha_{ed} \approx 1 \div 2; \quad O(\zeta_{vv}) \sim 10^{-1}; \quad O(\zeta_d) \sim 10^{-1}.$$

Пренебрегая слагаемым $\alpha_0 \frac{f^2}{F_0^2}$, ввиду его

более высокого порядка малости по отношению к остальным слагаемым в выражении (5), будем иметь

$$k_\mu \approx \sqrt{\frac{\zeta_{vv} + \alpha_e}{\zeta_{vv} + \alpha_{ed} \cdot n^{-2} + \zeta_d}} \quad (6)$$

Полученное соотношение позволяет с достаточной точностью определить эффект увеличения расхода через вихревой клапан применением диффузоров с различными геометрическими параметрами и величинами сопротивлений.

Так, в случае идеальной жидкости, формула (6) в точности описывает тривиальный результат

максимально достижимого, и вместе с тем нереального, значения k_μ :

$$\zeta_{vv} = 0; \alpha_e = 1; \alpha_{ed} = 1; \zeta_d = 0; k_\mu = n.$$

Легко также сформулировать условие *позитивного эффекта* от использования диффузора, при котором $k_\mu > 1$:

$$\alpha_{ed} \cdot n^{-2} + \zeta_d \leq \alpha_e. \quad (7)$$

Физически это можно сформулировать следующим образом: «*приращение энергии в диффузоре за счет преобразования кинетической энергии потока в потенциальную в виде давления, должно превышать потери энергии на преодоление гидравлического сопротивления диффузора*».

В случае равенства левой и правой частей в формуле (7) будем иметь «нулевой» эффект диффузора, при котором

$$k_\mu = 1.$$

Для того, чтобы определить направления и возможности повышения пропускной способности вихревых клапанов за счет увеличения коэффициента расхода устройства путем установки диффузора в выходном патрубке, соотношение (5) удобнее представить иначе. Замечая, что

$$\mu = \varepsilon \varphi, \text{ при } \varepsilon = 1; \mu = \varphi = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{vv} + \alpha_e}},$$

получаем

$$k_\mu = \frac{1}{\sqrt{1 - (\alpha_e - \alpha_{ed} \cdot n^{-2} - \zeta_d) \mu^2}} \quad (8)$$

Из полученного выражения следует, что для увеличения k_μ необходимо минимизировать значения знаменателя. Этого можно достичь, снижая сопротивление диффузора ζ_d и (или) увеличивая степень его диффузорности n до значений, при которых $\alpha_{ed} \cdot n^{-2} \ll \zeta_d$, однако при условии [3], что течение остается безотрывным. Тогда

$$k_\mu = \frac{1}{\sqrt{1 - (\alpha_e - \zeta_d) \mu^2}} \quad (9)$$

Коэффициент расхода клапана без диффузора, по возможности, необходимо максимизировать, снижая его сопротивление, т.е. $\mu \rightarrow 1$. В этом случае

$$(k_\mu)_{\max} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\zeta_d}} \quad (10)$$

Применить полученные данные к исследуемому в данной работе случаю допустимо, если кинематические условия входа в диффузор, установленный на выходе клапана, будут близкими к условиям опытов [3].

Профили скорости на выходе из клапана, полученные экспериментально и по результатам математического моделирования пространственного течения [5] в клапане в исследованиях [4], приведены в двух ортогональных направлениях на рисунке 2.

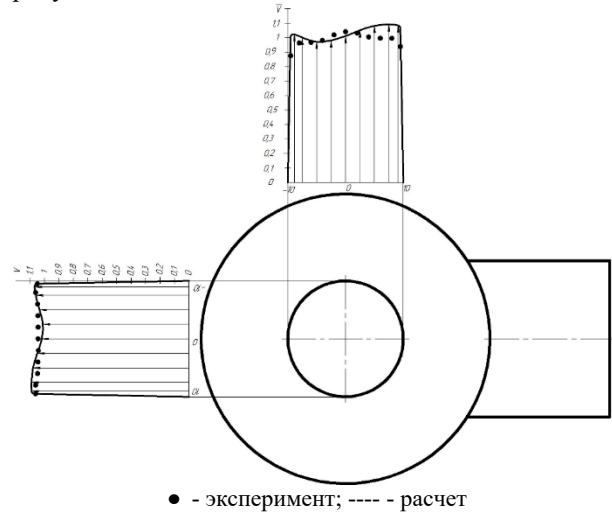


Рис. 2. Экспериментальные и расчётные профили скорости на выходе из вихревого клапана

Результаты эксперимента и моделирования позволяют сделать вывод о близком к равномерному распределению скоростей по сечению выходного отверстия клапана, т.е. о правомерности применения результатов опытов [3] к нашему случаю.

Расчеты по формуле (8) можно производить, установив взаимосвязь $\zeta_d = f(n; \varphi)$. В справочнике по гидравлическим сопротивлениям [3] приведены таблицы с экспериментальными значениями $\zeta_d = f(n; \varphi)$, полученные при турбулентном ($Re \geq 10^5$) истечении несжимаемой среды из неограниченного объема в атмосферу. Фрагмент этой связи графически представлен на рис. 3.

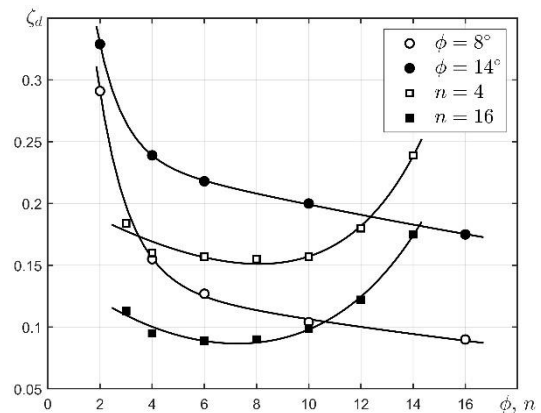


Рис. 3. Характерный фрагмент взаимосвязи $\zeta_d = f(n; \varphi)$

Точность вычисления k_μ по соотношению (8) зависит от погрешностей определения

коэффициентов Кориолиса α_e , α_{ed} , сопротивлений клапана ζ_{vv} и диффузора ζ_d . Ниже на рис. 4 и 5 представлены результаты этих расчетов.

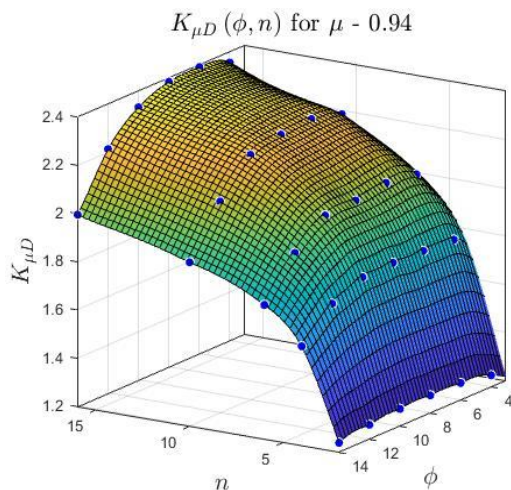


Рис.4. График зависимости расчетного коэффициента эффективности от параметров осевого диффузора, установленного на выходе экспериментального образца вихревого клапана с коэффициентом расхода $\mu = 0.94$

Из анализа графика на рис. 4 следует, что область максимальных градиентов k_μ находится в диапазоне степеней уширения диффузора $n = 4 \div 6$ и углов раскрытия $\phi = 8^\circ \div 10^\circ$. В этих интервалах прирост пропускной способности клапана составляет более 80% от ее максимальных значений. Дальнейшее увеличение n и ϕ приводит к снижению значений k_μ , но тенденция к увеличению пропускной способности устройства сохраняется.

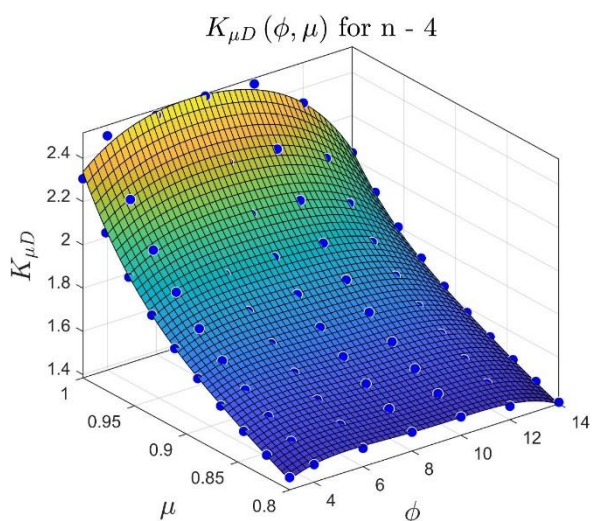


Рис.5. Зависимость коэффициента эффективности осевого диффузора со степенью уширения $n = 4$, установленного на выходе вихревых клапанов с различными значениями коэффициента расхода

С увеличением значений коэффициента расхода клапана без диффузора μ , $k_{\mu d}$ возрастает нелинейно во всем диапазоне углов раскрытия $\phi = 8^\circ \div 14^\circ$. Так, в диапазоне $0.9 \leq \mu \leq 1$ прирост $k_{\mu d}$ практически вдвое больше, чем $0.8 \leq \mu \leq 0.9$. По углу раскрытия диффузора наблюдается четкий максимум, соответствующий значению $\phi = 8^\circ$.

Сравнивая расчетное $\mu_c = 1.61$, по соотношению (8) и экспериментальное $\mu_{\text{exp}} = 1.62$ значения из наших опытов, для клапанов с углом раскрытия диффузора $\phi = 14^\circ$, можно сделать вывод об их хорошем совпадении.

Предлагаемый подход можно использовать к оценке эффективности применения других типов диффузоров в вихревых клапанах, с условием соблюдения принятых ограничений. При этом необходимо предварительно установить взаимосвязь между коэффициентом сопротивления диффузора и определяющими его параметрами.

Выводы

- установлена аналитическая зависимость коэффициента расхода вихревых клапанов с осевым диффузором на выходе, связывающая его величину с определяющими параметрами;
- эффективность применения диффузора в вихревом клапане зависит от кинематики потока в горловом сечении, т.е. на входе в диффузор и его выходном сечении, оцениваемой коэффициентами Кориолиса, коэффициента сопротивления диффузора и степени его уширения, а также коэффициента расхода клапана без диффузора;
- установлено, что максимальный прирост коэффициента расхода устройства соответствует углу раскрытия диффузора $\phi = 8^\circ$, при $2 \leq n \leq 16$;
- установлено, что прирост коэффициента расхода устройства тем выше, чем больше коэффициент расхода клапана;
- получены практически совпадающие значения расчетного и экспериментального коэффициентов расхода устройства: вихревого клапана с радиальным каналом питания и осевым диффузором в выходном патрубке;
- полученные результаты справедливы и для вихревого клапана с осевым каналом питания, поскольку его проточная часть обладает осевой симметрией;
- предложенную методику оценки эффективности любого типа диффузора на выходе из вихревого клапана, возможно использовать, предварительно установив взаимосвязь между коэффициентом сопротивления диффузора и параметрами, от которых он зависит.

Л и т е р а т у р а

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидравлические машины, гидравлические приводы. Или Машиностроительная гидравлика.
2. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров выхлопных патрубков турбомашин. М. «Энергия», 1970, 384 с.
3. Идельчик М.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. «Машиностроение», 1975, 559 с.
4. Левашов Я.Н. *Повышение эффективности трубопроводных транспортных систем снижением энергозатрат на управление вихревой арматурой*. Дисс. канд. техн. наук. Луганск, 2022, 150 с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. «Дрофа». – 2003. – 846 с.
6. Сёмин Д.А. Разработка и совершенствование характеристик крупномасштабных вихревых клапанов. Дисс. канд. техн. наук. Луганск, 1992, 203 с.
7. Сёмин Д.А., Левашов Я.Н., Левашов А.Н. Экспериментальные исследования рабочих характеристик вихревых клапанов различных модификаций. Вестник ЛНУ им. В.Даля, №11(29), 2019. С.113-119.
8. Сёмин Д.А. Эффективность применения диффузоров в гидравлических устройствах и системах. Вестник ЛНУ им. В.Даля, №12(66), 2022. С.99-103.
9. Сьомін Д.О. Вихрові виконавчі пристрої: В 2-х частинах. Ч.1. Однорідні робочі середовища: монографія. / Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Мальцев Я.І., Войцеховський С.В., Роговий А.С., Дмитрієнко Д.В., Мальцева М.О. - Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2009. – 284 с.
10. Чжен П. Отрывные течения. Т.1. М. «Мир». 1972. 300 с
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. «Наука». 1974. 712 с.

Syomin D.A., Levashov Ya.N., Levashov A.N., Serykh A.V.

ESTIMATION OF THE FLOW CAPACITY OF VORTEX VALVES WITH DIFFUSER OUTPUT CHANNELS

A hydraulic calculation of a device consisting of a vortex valve and a diffuser connected to its outlet has been performed. Analytical relations have been obtained and analyzed to determine the effect of flow changes through a vortex valve by using diffusers with different geometric parameters.

The conditions for maximum efficiency of using diffusers in the device are determined.

A quantitative assessment of the effect of the axial diffuser parameters on the device throughput has been performed.

Keywords: device, vortex valve, diffuser, flow coefficient, efficiency.

Сёмин Дмитрий Александрович, д.т.н. профессор кафедры «Гидрогазодинамика» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск
E-mail: sdaa261@yandex.ru

Левашов Ярослав Николаевич, доцент кафедры «Гидрогазодинамика» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: xpioneerx@mail.ru

Левашов Артём Николаевич, доцент кафедры «Гидрогазодинамика» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: boschcdi@yandex.ru

Серых Александр Викторович аспирант кафедры «Транспортные технологии» ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Syomin Dmitry Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir Dahl Lugansk State University", Lugansk

Levashov Yaroslav Nikolayevich, Associate Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dahl", Lugansk.

Levashov Artem Nikolayevich, Associate Professor of the Department of Fluid and Gas Dynamics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dahl", Lugansk.

Serykh Alexander Viktorovich postgraduate student of the Department of Transport Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir Dahl Lugansk State University", Lugansk.

Рецензент: Тарарычкин Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой транспортных технологий ФБГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

УДК 539.3

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ

Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н.

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ROTARY EXTRACTION PROCESS

Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N.

В статье рассмотрена схема формообразования оболочки двумя роликами. Проведен анализ динамического состояния установившегося процесса ротационной вытяжки, выполнена оценка его устойчивости на стыке теории упругости и пластичности.

Ключевые слова: Формообразование, ротационная вытяжка, оболочка, упругость, пластичность, ролики, критические режимы деформации.

Введение. Процесс ротационной вытяжки оболочковых изделий, востребованных в области авиа- и судостроения, химической и пищевой промышленности, относится к ресурсосберегающим технологиям [1]. В свое время в ВМИ профессор Могильный Н.И. с коллективом СКТБ «Искра» положил начало исследованиям данного направления, тем самым создавая более рациональную технологию изготовления осесимметричных тонкостенных изделий по сравнению с другими способами обработки давлением таких изделий [2]. До сих пор существует сложность оценки устойчивости упругопластического режима изготовления оболочек ротационным способом, как динамического процесса (определение тензоров напряжений и деформаций, зависящих от времени) [3].

Целью работы является создание математической модели, описывающей устойчивый процесс упругопластического режима изготовления оболочек ротационной вытяжкой. Данное математическое описание позволило бы в практическом применении конструктору разработать новое оборудование с большей эффективностью.

Постановка и решение проблемы. Большое распространение имеет схема формообразования оболочки из плоского листа на оправке одним или несколькими роликами, когда исходная заготовка с одной стороны контактирует с оправкой, с другой стороны – с роликом, при этом в зоне воздействия ролика материал заготовки переходит из упругого состояния в пластическое [4]. В отличие от данной схемы в работе [5] предложена двухроликовая система формообразования без применения

оправки, которая заключается во введении наряду с деформирующим внешним роликом поджимного внутреннего ролика, работающего синхронно с основным в области бегущего контакта без наличия проскальзывания (рис. 1). При этом внутренний ролик движется синхронно с некоторым опозданием по отношению к верхнему с целью сохранения заданной криволинейности деформируемой переходной волны без образования складок материала, что является критерием устойчивости процесса.

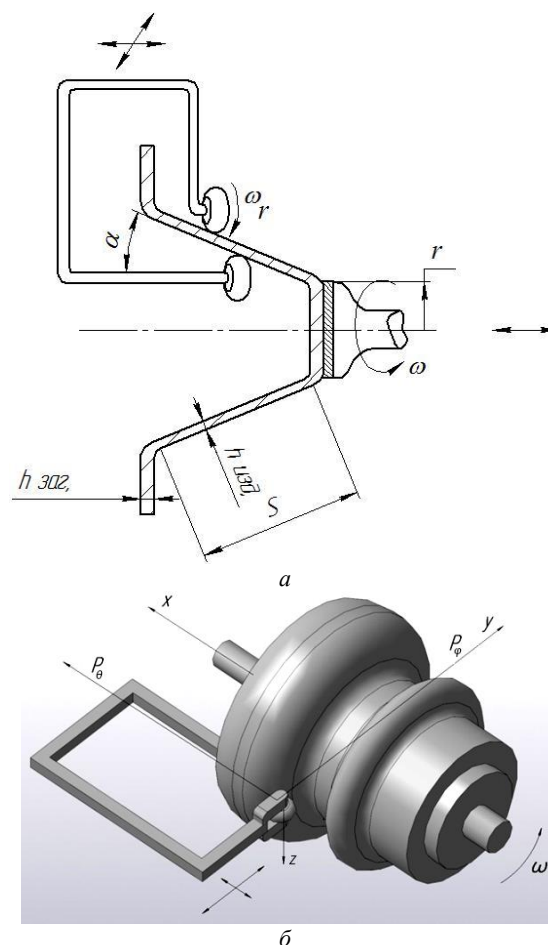


Рис. 1. Двухроликовая ротационная вытяжка оболочки: а – схема; б – 3D-модель

$$v_{кр.} = \frac{c}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (10)$$

При этом коэффициент динамичности

$$k_{дин.} = \frac{1}{\sqrt{1-\lambda}}, \quad (11)$$

а соответствующее началу пластической деформации напряжение

$$\sigma_z = \frac{F}{2\pi R h}. \quad (12)$$

Приведем также коррелирующую эмпирическую формулу критической скорости верхнего ролика с энергетической точки зрения:

$$v_{кр.} = \frac{N \cdot 60 \cdot 1020}{F} \eta, \quad (14)$$

где N – мощность формообразующего устройства;
 η – его к.п.д.

Вывод. Как известно, в процессе ротационной вытяжки происходит изменение формы изделия с управляемым утонением h , избегая складкообразования, сохраняя несущую способность за счет формирования наклепа поверхности. При принятых упрощениях задача оценки устойчивости процесса ротационной вытяжки решена на стыке теории упругости и пластичности.

Л и т е р а т у р а

1. Могильный Н.И., Могильная Е.П. Автоматизированная ротационная вытяжка оболочковых изделий // Машиностроитель. – 1998. – №1. – С. 12-18.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке – Л: Машиностроение, 1979. – 520 с.
3. Ворovich И.И. Некоторые вопросы теории устойчивости вязкоупругих систем // Труды XII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин – Ереван, 1980. – С. 18-28.
4. Ильюшин А.А., Ленский В.С. О соотношениях и методах современной теории пластичности // Известия СКНЦВШ. – Ростов-на-Дону. – 1974. – №3. – С. 3-11.
5. Обоснование изготовления оболочковых изделий ротационной вытяжкой / М.Д. Солодовник, С.Н. Ясуник, И.В. Волков, М.Н. Кузнецова // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – 2019. – №4(29). – С. 19-26.
6. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения – М.: Наука, 1987. – 80 с.

Solodovnik M.D., Yasunik S.N., Volkov I.V.,
Kuznetsova M.N.

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ROTARY EXTRACTION PROCESS

The article discusses the schemes of forming the shell with two rollers. The analysis of the dynamic state of the steady-state process of rotary extraction is carried out, an assessment of its stability at the junction of the theory of elasticity and plasticity is carried out.

Key words: Shaping, rotary extraction, shell, elasticity, plasticity, rollers, critical deformation modes.

Солодовник Михаил Дмитриевич, к.ф.-м.н., доц., доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Ясуник Светлана Николаевна, к.т.н., доц., доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: jsn7628620@mail.ru.

Волков Игорь Владимирович, к.т.н., доц., доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: volnaana@mail.ru.

Кузнецова Марина Николаевна, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: kuz_mari@rambler.ru.

Solodovnik Mikhail, Candidate of Physical and Mathematical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting at the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.

Yasunik Svetlana, Candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting at the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.

Volkov Igor, Candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting at the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.

Kuznetsova Marina, senior lecturer of the department of engineering technology and engineering consulting at the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., проф., проректор ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 25.11.2023

УДК 621.694

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПНЕВМАТИКИ

Сулига С. В.

MODERN PROBLEMS AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PNEUMATICS

Suliga S. V.

В современной автоматизации пневматические системы используются очень широко, а в автомобилестроении, упаковке, производстве напитков, продуктов питания, медицинских препаратов, электронных устройств и во многих других отраслях промышленности с помощью пневматики делается более 70% всех перемещений. Этому способствуют ее традиционные преимущества, такие как доступность рабочей среды, простота конструкции и низкая стоимость элементов, экологическая и технологическая безопасность, стойкость ко многим факторам окружающей среды. Конечно, в основном пневматика используется для простых перемещений от упора до упора при относительно небольших массах нагрузки, для создания вибрации, распыления сред или сдува мелких объектов. Но в последние годы пневматические приводы часто используются и для позиционирования без упоров, правда, уступая в точности остановки гидравлике и электрике, зато значительно превосходя последние по стоимости, весу и габаритам. В целом, на настоящий момент перспективы пневматических (а чаще электропневматических) систем, где измерение и управление взяла на себя электрика) выглядят устойчиво. И на этом фоне кажутся странными заявления в технологически развитых странах о скором закате пневматики, как средства автоматизации, и ее полной замене электрикой, даже при простых перемещениях. Но недаром же почти все ведущие производители пневматики запустили производство электроцилиндров, моторов и контроллеров к ним.

Ключевые слова: пневматика, пневмоцилиндр, электроцилиндры, моторы, сжатый воздух, источник энергии.

Попробуем разобраться, насколько это все обосновано. Здесь мы будем говорить, опять-таки, о технологически развитых странах, где в последние годы ужесточились требования к энергоэффективности, безопасности (персонала, оборудования и выпускаемой продукции – именно в таком приоритете) и экологии. Проблемы с пневматикой в России пока лежат в другой плоскости, о чем скажем в конце.

Как ни странно, проблемы пневматики появились со стороны ее считавшихся незыбленными сильных качеств. Долгое время легкая доступность воздуха воспринималась и как

низкая стоимость его в качестве рабочей среды – мы же не покупаем его, как гидравлическое масло, и не платим по электросчетчику за каждое перемещение, как в электрике. Да, когда работа делается пневмоцилиндром или струей воздуха, расход электроэнергии на производственной линии может быть равен нулю. Но когда включается компрессор, превращающий атмосферный воздух в сжатый, картина радикально меняется. Стоимость сжатого воздуха, а вернее атмосферного, который засасывается компрессором (так принято для удобства, поскольку рабочее давление может быть разным), подсчитать нетрудно. Нужно знать стоимость компрессора и все связанные с его эксплуатацией затраты, включая занимаемую площадь, запчасти, зарплату персонала и т.п., а также его производительность, к.п.д. и ресурс. По ресурсу и производительности подсчитываем, сколько он за свою «жизнь» засосет кубометров воздуха, а по мощности, к.п.д. и стоимости киловатт-часа определяем, сколько они стоят. Если же хочется знать стоимость кубометра воздуха под каким-то избыточным давлением, полученную стоимость атмосферного кубометра нужно просто умножить на отношение абсолютного давления к атмосферному. Так, средняя стоимость засасываемого кубометра в Европе стоит 2,5 евроцента, а уже кубометр воздуха с давлением по манометру 6 бар будет стоить 17,5. Причем эта цена характерна для нового компрессора с хорошим обслуживанием, а для старого и изношенного она вырастает до 4 раз. Конечно, абсолютная стоимость воздуха будет зависеть от региона (затраты на электроэнергию составляют более 70% стоимости воздуха), но относительное сравнение затрат на потраченную энергию в пневмо- и электроприводе справедливо везде. Ведь 1 кубометр атмосферного воздуха содержит 100 кДж энергии (1 м³ x 1 бар), а 1 кВт-час – 3600 кДж, т.е. в 36 раз больше. Осталось только сравнить стоимость. На текущий момент получаем, что энергия от сжатого воздуха, например, в европейской части России, в 7...9 раз дороже электрической. Некоторые фирмы-производители электрических средств автоматизации, например, Schneider, называют

цифру 10, а с учетом утечек и потерь на нагрев она доходит до 28. Так что теперь при сравнении стоимости систем автоматизации на пневматике и электрике учитывают, как минимум, годовые затраты на энергию. Но и при таком подсчете пока электрическая система в 3...4 раза дороже пневматической. Но с ростом использования электрических систем, учете более длительного периода эксплуатации и других факторов эта разница уменьшается. Например, в известной автору машине по производству пальчиковых батареек, замена пневмопривода в простых перемещениях от упора до упора на электропривод позволила настолько повысить производительность, что более высокие затраты на оборудование окупались даже быстрее, чем на варианте с пневматикой. Не говоря уже о выгодах, связанных с отказом от второго источника энергии.

Так что теперь экономии потребления сжатого воздуха в пневмосистемах перед лицом «электрической опасности» уделяют большое внимание. Это и проектирование оптимальных каналов для прохода воздуха внутри устройств и между ними (например, сокращение длины шлангов, поворотов, сужений/расширений сечения, тройников, угловых штуцеров и т.п.), и пульсирующая подача на генераторы вакуума и устройства обдува, и использование дросселирования на входе в комбинации с отсечкой магистрали при достижении нагрузкой конечного положения, и использование более низкого давления для обратного хода или всего процесса, и отключение подачи питания во время пауз в работе, чтобы не «кормить» утечки, и многое другое. В результате в каталогах ведущих производителей пневматики появились дорогие, на первый взгляд отечественного пользователя, устройства, которые позволяют сократить потребление сжатого воздуха в несколько раз. Широко стала использоваться реверсивная работа распределителей, при которой каналы питания, выхода и выхлопа назначаются в соответствии с текущей задачей и экономией потребления воздуха. И здесь распределители должны иметь внешнее питание пилотов или прямое управление. Окупаемость этих мер зависит от интенсивности работы оборудования – циклы/мин., часы, смены, дни. Отечественный пользователь обычно не хочет использовать такие устройства из-за сложной конструкции, а значит – проблем с обслуживанием, и высокой цены.

С точки зрения безопасности пневматика всегда выгодно отличалась от гидравлики с ее высоким давлением/усилием и электрики с ее высокой скоростью и опасностью поражения током. Но даже при работе на давлении 6...8 бар перемещения исполнительных устройств могут быть опасными для персонала, оборудования и продукции. Сейчас все западное оборудование классифицируется по степени безопасности (PLa...PLe), а дальше пользователь обязан

использовать в нем те или иные специальные устройства и/или схемы безопасности. Различают определенные функции безопасности, по которым в системе должна быть предусмотрена защита.



Рис. 1. Генератор вакуума со всеми встроенными функциями, включая функцию экономии воздуха (слева), и модуль энергоэффективности, прекращающий подачу воздуха при снижении расхода ниже заданного уровня

Например, защита от неожиданных перемещений при подаче питания, стоп в текущем положении, реверс, резкое снижение скорости/усилия или сброс давления. Здесь могут использоваться как схемные решения, так и специальные устройства. В результате стоимость систем резко увеличивается. Например, простая пневматическая цепочка для реализации возвратно-поступательного перемещения нагрузки включает цилиндр, главный распределитель, два дросселя с обратным клапаном для регулировки скорости обоих перемещений и два концевых выключателя (датчика положения). А та же цепочка, но способная по команде зафиксировать шток в текущем положении с удержанием нагрузки и не допускающая при подаче питания опасного перемещения на полном давлении, дополнительно включает два пневмоматка (или 2/2-распределителя) с управлением от отдельного распределителя (а в системах с повышенной безопасностью это все дублируется), распределитель включения подачи питания пилотов, клапан плавного пуска на основном питании главного распределителя. Для подтверждения переключения распределителей питания пилотов и управления пневмоматками используются встроенные датчики, реагирующие на перемещение золотника, или реле давления, подключенные к соответствующему выходу. Зачастую и подачу питания в систему реализуют через блоки распределителей, подключенных так, чтобы воздух подавался только при наличии нескольких сигналов. Это все требует появления специальных устройств в программе поставок и ведет к значительному подорожанию пневмосистемы. В электросистеме те же требования реализуются с меньшими дополнительными затратами.

В качестве специальных устройств безопасности чаще других используются модули подачи питания, которые открывают подачу воздуха только при наличии минимум двух сигналов, а также клапаны быстрого сброса давления, где расход на сброс в 2 раза превышает расход на подачу воздуха в систему. Для снижения

затрат на оборудование иногда их комбинируют с клапаном плавного пуска.

Это интеллектуальные устройства со встроенной диагностикой ошибок и самотестированием. Кроме особенностей подключения нужно помнить о ежемесячной перезагрузке питания, если они работают под давлением непрерывно.

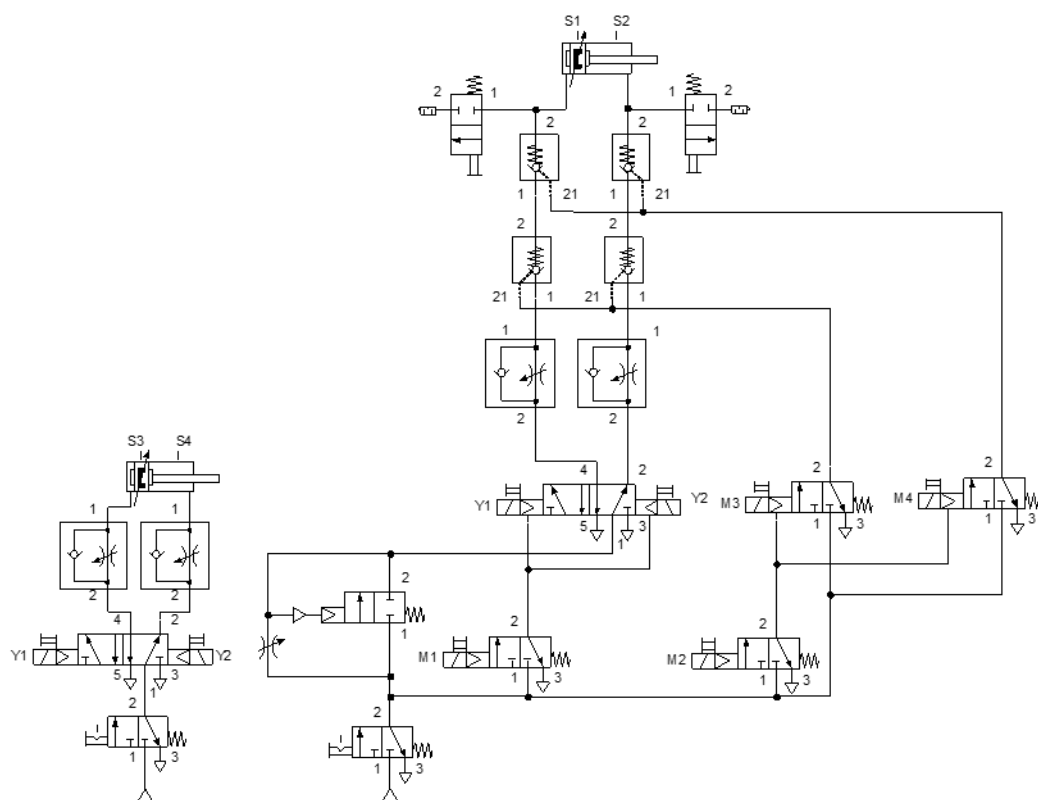


Рис. 2. Обычная пневмосхема для возвратно-поступательного перемещения нагрузки (сверху) и та же схема всего с двумя функциями безопасности в соответствии с категорией PLd (снизу)



Рис. 3. Устройства безопасности: модуль подачи питания из двух распределителей со встроенными датчиками положения (слева) и клапаны плавного пуска и быстрого сброса воздуха для разных категорий безопасности

Почти все современные пневмосистемы содержат пневмоострова, которые, по сути, являются наиболее эффективным способом монтажа распределителей. Но с ростом сложности оборудования пневмоострова становятся платформой для автоматизации, и теперь это не

только распределители и модули входов/выходов для подключения датчиков, внешних катушек и других электрических устройств, но и модули управления мощными электромеханическими приводами. Из устройств безопасности в них включают модули для аварийного отключения всех

или части «своих» или внешних катушек и других выходов и модули для подключения входов безопасности (световые завесы, аварийные сигнальные элементы, системы «вопрос-ответ»). Теперь один пневмоостров может управлять крупной автоматической линией, имеющей не только пневматические исполнительные устройства, и обеспечивать безопасность работы.

И с точки зрения экологии проблемы в пневматику пришли откуда не ждали. Раньше выхлоп отработанного в пневмоцилиндрах воздуха почти никого не волновал, за исключением случаев монтажа распределителей в шкафу. Но потом признали, что распыленное в воздухе жидкое смазочное масло вредно для окружающей среды и персонала. В результате все цилиндры и распределители стали при сборке снабжаться консистентной смазкой, а маслораспылители практически оказались под запретом. Их теперь ставят только в случае больших скоростей перемещений и после вымывания консистентной смазки, например, водяным конденсатом. Это привело к более жестким требованиям к подготовке воздуха после компрессора (в первую очередь осушка). Но и в случае отсутствия распыленного масла выхлоп признается вредным в производстве продуктов питания, фармацевтике, электронике, при контактах с бумагой, тканью и т.п. А такие операции как, например, покраска, сортировка струей воздуха ряда объектов (те же продукты питания и таблетки), транспортировка порошков также требуют высокой степени очистки рабочего воздуха. Так, для машиностроения достаточно поставить после компрессора холодильный осушитель и грубый фильтр (5...40 мкм) на входе в систему, а в указанных выше производствах после грубого фильтра нужно ставить один-два тонких (коалесцентных), а часто еще фильтр с активированным углем и дополнительные осушители. При такой очистке затраты серьезно растут не столько из-за закупки дополнительных элементов, сколько из-за повышения сопротивления потоку воздуха, что, в свою очередь, приводит к расходу энергии. Только переход с фильтра 40 мкм на 5 мкм повышает расход электроэнергии на 10...15%. Т.е. пневмосистема становится еще более затратной в эксплуатации. В ряде случаев удается экономить, делая более тщательной подготовку воздуха только для питания пилотов распределителей, естественно внешнего. Необходимость лучшей очистки воздуха часто связана с тем, что из-за желания как можно больше снизить мощность катушек распределителей приходится уменьшать проходное сечение как раз в канале питания пилота в месте его закрытия якорем катушки, что увеличивает риск его закупорки. А мощность катушек стараются снизить, чтобы избежать перегрева и использовать блоки питания на 24 В постоянного тока как можно меньшей мощности (а здесь уже просто вопрос

цены). Для этой же цели все чаще используют катушки с энергосбережением, т.е. со схемой снижения тока через 3...5 мс после подачи сигнала, когда катушка уже переключилась и переходит в режим удержания якоря. Как видно, использование нескольких уровней давления и внешнего питания пилотов стало устойчивой тенденцией современных пневмосистем автоматизации, поскольку это делает их более экономичными и безопасными. В пневмоостровах вообще все распределители имеют внешнее питание пилотов, просто весь остров можно сделать с внешним или внутренним питанием пилотов, и все больше островов получают возможность переключать тип питания пилотов в ходе эксплуатации.

Выводы. 1. С учетом вышеизложенного постепенная сдача пневматикой своих позиций в пользу электрики не выглядит необоснованной. Уже сейчас многокоординатные системы перемещения используют электромеханические приводы, а на долю пневматики остается, в лучшем случае, только захват объекта. И вполне возможно, что скоро вопрос «а стоит ли ради пары простых перемещений в машине ставить компрессор, разводить трубопроводы и готовить воздух?» станет задаваться все чаще. Конечно, процесс замены пневматики электрикой займет десятилетия и вряд ли будет стопроцентным. Но анализ продаж крупнейших производителей техники автоматизации эту тенденцию подтверждает. А такая известная во всем мире компания как Festo уже старается позиционировать себя не как производителя пневматики, а как поставщика систем перемещений. А пневматика для нее, похоже, это славное прошлое.

2. Для российского рынка автоматизации пока говорить о сокращении использования пневматики в пользу электрики не приходится – мы еще даже толком не начинали ее использовать. Зато собственное производство этой техники благополучно прекратили. И теперь, после ухода всех ведущих иностранных производителей с нашего рынка, приходится переходить на китайскую продукцию. За последние лет 15...20 китайские производители пневматики достигли значительных успехов, но все равно это откат в 1990-е. Несмотря на то, что они копируют известные бренды, портфель продукции даже самых передовых из них далеко не тот, который был нам доступен полтора года назад. Придется обходиться без бесштоковых цилиндров с механической связью между кареткой и поршнем, цилиндров с саморегулируемым демпфированием, удобных датчиков положения, пневмоостровов с электрической периферией, стандартных распределителей по ISO 5599 и 15407, пропорциональной техники, тонкой фильтрации, локальной осушки и еще многого. Но на простую пневматическую цепочку номенклатуры хватает в достаточно широком диапазоне размеров. Открытым остается и вопрос надежности ресурса:

полтора года поставок – не тот срок, по которому можно судить о качестве продукции. Но главная проблема – подбор аналогов при замене элементов на импортном оборудовании. Китайской номенклатуры там явно не хватит. Остается только надеяться на «серые» схемы импорта и быть готовыми к переplate.

Л и т е р а т у р а

1. Сулига, С. В. Проектирование и обслуживание пневматических систем : учебное пособие / С. В. Сулига. – [Б. м.]: FESTO, 2021. – 295 с.

2. Каталог «Фесто». https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/450379/KeyProducts_2017_RU_low.pdf

3. Каталог продукции SMC
4. Каталог продукции Camozzi
5. Каталог продукции Pneumax
6. Каталог продукции Rexroth-Aventics
7. Каталог продукции Parker
8. Каталог продукции Norgren
9. Каталог продукции E.MC
10. Каталог продукции NCPC
11. Каталог продукции EMAX
12. Каталог продукции XCPC
13. Каталог продукции KCC
14. Каталог продукции JELPC
15. Каталог продукции TPC

Suliga S.V.

MODERN PROBLEMS AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PNEUMATICS

In modern automation, pneumatic systems are used very widely, and in the automotive industry, packaging, beverages, food, medicines, electronic devices and many other industries, more than 70% of all movements are made using pneumatics.

This is facilitated by its traditional advantages, such as accessibility of the working environment, simplicity of design and low cost of elements, environmental and technological safety, resistance to many environmental factors. Of course, pneumatics is mainly used for simple stop-to-stop movements with relatively small load masses, to create vibration, spray media or blow away small objects. But in recent years, pneumatic actuators have often been used for positioning without stops, although they are inferior in stopping accuracy to hydraulics and electrics, but significantly surpassing the latter in cost, weight and dimensions. In general, at the moment, the prospects for pneumatic (and more often electropneumatic systems, where electrics have taken over measurement and control) look stable. And against this background, statements in technologically developed countries about the imminent decline of pneumatics as a means of automation and its complete replacement with electrics, even with simple movements, seem strange. But it is not for nothing that almost all the leading manufacturers of pneumatics have launched the production of electric cylinders, motors and controllers for them.

Key words: pneumatics, pneumatic cylinder, electric cylinders, motors, compressed air, energy source.

Сулига Сергей Васильевич, к.т.н., руководитель программ подготовки персонала компании «Фесто-РФ».

Suliga Sergey Vasilyevich, Ph.D. Head of Festo-RF personnel training programs

Рецензент: Сёмин Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидрогазодинамика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 25.11.2023

УДК 658.78.06

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ С ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Турушина Н. В., Жарский Н. И.

THE USE OF DEVICES WITH AN AIR CUSHION TO EXPAND THE OPERATIONAL CAPABILITIES OF THE TRANSPORT SYSTEM

Turushina N. V., Zharskiy N. I.

Статья посвящена актуальной теме по совершенствованию устройства с воздушной подушкой для новых эффективных и менее энергоёмких способов транспортировки грузов на поддонах или с плоскими опорами. Рассмотрена упрощенная схема устройства с воздушной подушкой для расширения эксплуатационных возможностей транспортной системы, которое может быть использовано в различных областях народного хозяйства в технологических процессах по передаче груза, для подачи скомпанованных в контейнеры грузов, а также моногрузов, уложенных на поддоны.

Ключевые слова: устройство с воздушной подушкой, транспортная система, эксплуатационные возможности, упрощенная схема.

Введение. Существенную роль в эффективности работы любого производства играет реинжиниринг и автоматизация различных процессов и видов деятельности, в том числе и процессов складской логистики.

Участок хранения грузов – это один из важнейших технологических участков склада, на создание которого затрачивается большая часть средств при строительстве склада.

Понятие «способ хранения грузов» включает условия хранения; типы и параметры устройств, примененных для хранения грузов и доставки их на места хранения; типы и параметры строительных конструкций, которые создают определенные условия для хранения грузов.

Условия хранения и перемещения грузов в складах должен обеспечивать качественную и количественную сохранность, рациональное размещение грузов по участкам хранения, максимальную производительность средств механизации, максимальное использование площадей и объемов складских помещений, соблюдение безопасности, возможность автоматизации всех видов работ.

Таким образом, создание эффективной транспортной системы в зоне хранения склада с использованием устройства с воздушной подушкой является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие стеллажные склады обслуживаются либо возможными погрузчиками, либо кранами-штабелерами. Применение таких средств механизации требует создание больших транспортных проходов, что влечет за собой уменьшение полезной площади в зоне хранения грузов, больших капитальных вложений, значительного расхода энергии [1, 4].

Анализ последних исследований показал, что снижение затрат на складирование продукции возможно за счет: более эффективного использования складского здания, снижения эксплуатационных расходов и общей трудоемкости складских процессов, ускорения оборачиваемости материальных ценностей, обеспечения сохранности качества продукции и др. [2, 3].

Ранее уже была рассмотрена принципиальная схема механизации транспортно-складских работ в зоне хранения стеллажного склада с использованием транспортных средств с воздушной подушкой. Зона хранения стеллажного склада представляет собой многорядную систему многоярусных стеллажей с ячейками для хранения грузов. Между рядами стеллажей оставляются транспортные проходы для работы подъемно - транспортных механизмов [2, 3]. При обслуживании склада кранами-штабелерами ширина этих проходов в зависимости от типа крана составляет от 1,0 до 2,5 м, что влечет за собой появление значительных неиспользуемых для хранения площадей склада. При использовании транспортных устройств с воздушной подушкой эти проходы могут быть уменьшены до размеров груза, так как перемещение груза вдоль стеллажа может осуществляться с помощью конвейеров с воздушной подушкой с наклонными питающими каналами [3, 4].

Анализ предлагаемой транспортной системы и результат проведенных теоретических и экспериментальных исследований показал достаточную работоспособность этой системы и на основании ее позволил разработать упрощенную схему устройства на воздушной подушке для расширения эксплуатационных возможностей транспортной системы.

Цель исследования. Целью работы является разработка перспективной упрощенной схемы устройства с воздушной подушкой, которая дает возможность расширить эксплуатационные возможности, увеличить коэффициент использования площади склада, уменьшить энергозатраты на процессе перемещения грузов, а также оптимизировать схему автоматизации рабочего процесса транспортной системы.

Материалы и результаты исследования. В последнее время свое развитие получают приводные и не приводные конвейеры с воздушной подушкой для транспортирования штучных грузов с плоской опорной поверхностью или размещенной на плоском поддоне. В не приводных конвейерах движение груза (поддона) осуществляется за счет реактивной силы наклоненной к опорной поверхности струей воздуха, исходящей из наклонных питающих каналов [2].

Применение конвейеров с воздушной подушкой для механизации транспортных работ в зоне хранения склада дает возможность исключить или в значительной степени сократить количество подъемно-транспортных машин (погрузчиков, кранов и др.), что влечет за собой снижение капитальных затрат и эксплуатационных расходов, повышает производительность при переработке грузов, упрощает схему автоматизации управления складом, позволяет в значительной степени повысить коэффициент использования площади зоны хранения склада. Наиболее эффективным типом конвейеров в этих условиях является конвейер с наклонными питающими каналами, который при горизонтальном расположении может осуществлять реверсивное движение грузов с плоской опорной поверхностью.

Транспортная система склада состоит из устройств для приемки груза, устройств для доставки груза к зоне хранения, установки груза на конвейер, выдачи груза с конвейера, доставки груза к месту потребления (комплектации, погрузки на внешний транспорт, отправка в производство).

Предложенную ранее схему, где устройство с воздушной подушкой было рассмотрено в стеллажном складе и груз доставлялся с конвейера в ячейку и наоборот, целесообразно применять при большом разнообразии поступающих грузов (почтовые учреждения, камеры хранения, базы торговых предприятий и др.).

В том случае, если склад предназначен для обслуживания массового производства, а также в других случаях, когда происходит массовое поступление одинаковых грузов или групп одинаковых грузов, целесообразно использовать упрощенную схему (рисунок 1). Система не имеет ячеек, а грузы хранятся непосредственно на транспортном конвейере и выдаются путем подачи воздуха в ресивер конвейера или открытии соответствующих наклонных каналов.

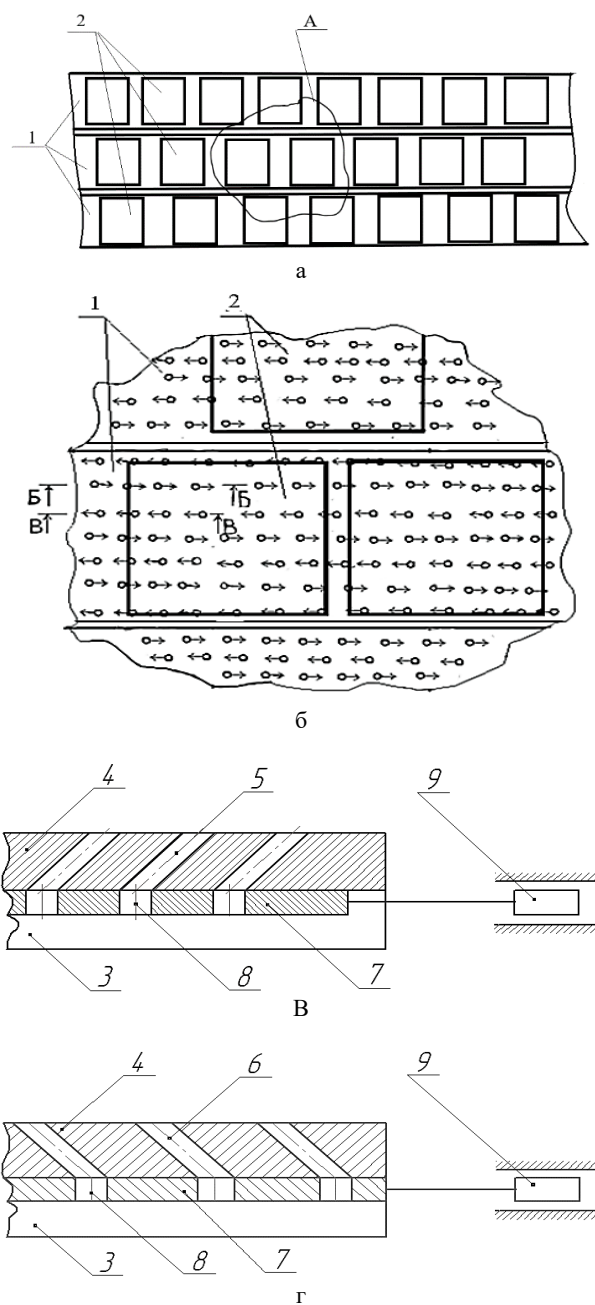


Рис. 1. Принципиальное устройство яруса стеллажа с использованием пневмотранспортного устройства:

а – вид сверху, б – вид А; в – сечение Б-Б; г – сечение В – В; 1 – транспортный конвейер, 2 – поддон с грузом или груз с плоским основанием, 3 – ресиверная камера, 4 – несущая плита, 5, 6, 8 – питающие каналы, 7 – управляющая плита, 9 – управляющее устройство

Этаж стеллажа для хранения грузов представляет собой продольный транспортный конвейер 1 с воздушной подушкой и поддонами с грузом 2, которая содержит ресиверную камеру 3, несущую плиту 4 с наклонными питающими каналами с наклоном в одну и другую стороны и управляющую плиту 7 с вертикальными питающими каналами 8, которая приводится в движение устройством 9 (пневмоцилиндр, соленоид, электромагнит и др.). При выдаче поддона с грузом 2

с конвейера 1 управляющая плита 7 с помощью устройства 9 устанавливается в такое положение, при котором питающие каналы 5 открыты, а каналы 6 закрыты. Воздух, который находится под давлением в ресиверной камере 3, поступает через питающие каналы 8 и 5 под опорную поверхность поддона. Между несущей плитой 4 и опорной поверхностью поддона с грузом 2 создается воздушная подушка. За счет действия наклонных воздушных струй поддон с грузом перемещается по транспортному конвейеру 1 к месту выдачи. Установка поддонов с грузом (или груза с плоским основанием) 2 на конвейер 1 производится в обратном порядке, при этом наклонные питающие каналы 6 открыты, а каналы 5 закрыты. Передача поддона с грузом с транспортного конвейера на наземный транспорт может быть осуществлена с помощью подъемника элеваторного типа, либо любого другого подъемника. Количество этажей в зоне стеллажного склада не ограничено.

В качестве воздухоудных машин, создающих и поддерживающих давление постоянно в ресиверах конвейеров и транспортных устройствах используются вентиляторы высокого давления. На конвейерах устанавливаются клапаны, открывающие наклонные каналы только при наличии над ними поддона (магнитные, контактные и др.). Клапаны обслуживают группу каналов.

Так как давление в ресивере низкое, их целесообразно выполнять из пластмассы. Несущие плиты с каналами и управляющие плиты также целесообразно выполнять из пластмассы. Камеры ряда ячеек соединены между собой в общий ресивер, где постоянно поддерживается необходимое давление.

Использование упрощенной схемы устройства с воздушной подушкой позволит более эффективно использовать производственные площади за счет уменьшения транспортных проходов; снизить затраты энергии на транспортно-складские работы; повысить безопасность работ, так как используемые в настоящее время подъемно – транспортные машины являются объектами повышенной опасности; упростить схему автоматизации транспортно-складских работ.

Выводы. Разработка упрощенной схемы устройства с воздушной подушкой для транспортировки контейнерных грузов и моногрузов, уложенных на поддоны позволяет:

- расширить эксплуатационные возможности транспортной системы;
- увеличить коэффициент использования площади склада;
- уменьшить энергозатраты на процессе перемещения грузов;
- оптимизировать схему автоматизации рабочего процесса транспортной системы.

Предлагаемое устройство транспортирования грузов на воздушной подушке найдет широкое применение в технологических процессах по передаче грузов на внутрицеховом транспорте, а также в грузовых и пассажирских службах на

воздушном, морском и железнодорожном транспорте.

Л и т е р а т у р а

1. Нечаев Г.И., Турушин В.А., Турушина Н.В. Анализ эффективности применения конвейеров с воздушной подушкой для механизации и автоматизации работ в зоне хранения стеллажных складов / Нечаев Г.И., Турушин В.А., Турушина Н.В. // Вісник ЧНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 6 (177) частина 1. – С. 288-291.

2. Турушина Н.В., Турушин В.А., Редько А.М. Использование транспортных устройств с воздушной подушкой для механизации и автоматизации стеллажных складов / Турушина Н.В., Турушин В.А., Редько А.М. // Вестник ЛНУ им. В. Даля. – 2017. – № 2 (4) часть 2. – С. 196-199.

3. Турушин В.А., Редько А.М., Турушина Н.В. Совершенствование складских транспортных устройств на воздушной подушке с наклонными питающими каналами / В.А. Турушин, А.М. Редько, Н.В. Турушина // Сетевой электронный теоретический и научно-практический журнал Безопасность техногенных и природных систем. – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2021. – № 1. – С. 58-66.

4. Нечаев, Г.И. Основы организации работы и управления транспортно-складскими комплексами / Г.И. Нечаев. – Луганск: Изд. Восточноукраинского государственного университета, 1998. – 226 с.

Turushina N.V., Zharskiy N.I.

THE USE OF DEVICES WITH AN AIR CUSHION TO EXPAND THE OPERATIONAL CAPABILITIES OF THE TRANSPORT SYSTEM

The article is devoted to the topical topic of improving the air cushion device for new efficient and less energy-intensive methods of transporting goods on pallets or with flat supports. A simplified scheme of an air cushion device is considered to expand the operational capabilities of the transport system, which can be used in various fields of the national economy in technological processes for the transfer of cargo, for the supply of goods packed in containers, as well as monogrugs stacked on pallets.

Key words: an air cushion device, a transport system, operational capabilities, a simplified scheme.

Турушина Наталья Владимировна, к.т.н., доцент кафедры «Транспортные технологии», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: sun.best@mail.ru

Жарский Никита Игоревич, ассистент кафедры управления ЖКХ ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

E-mail: zharskiy.93@mail.ru

Turushina Nataliya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Technologies«LSU named after V. Dahl».

Zharsky Nikita, Assistant of the Department of Housing and Communal Services Management of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Замота Тарас Николаевич, д.т.н., проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 14.11.2023

УДК 621.436

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ВЫСКООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тырловой С. И., Костенко А. В., Чудной А. А.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF HIGH-SPEED DIESEL FUEL PUMPS IN OPERATION

Tyrlovoi S. I., Kostenko A. V., Chudnoj A. A.

Представлены результаты исследований влияния эксплуатационных факторов на характеристики системы автоматического регулирования высокооборотных автомобильных дизелей, оснащенных распределительными топливными насосами высокого давления типа BOSCH-VE. Параметры и настройки регуляторов формируют заданные скоростные характеристики топливоподачи, от которых непосредственно зависят эксплуатационный расход топлива, динамические и экологические характеристики двигателя.

В процессе эксплуатации при потере жесткости и усадке различных пружин регулятора снижаются мощность, номинальная и максимальная частоты вращения двигателя до 11%. На режиме максимального крутящего момента снижается частота вращения дизеля до 8%.

В начале режимов разгона (для диапазона частот вращения двигателя 1000 -2000 мин-1) эксплуатационная усадка пружин приводит к снижению подачи топлива на 13,5%.

При износе плунжерных пар (снижении гидравлической плотности) показана возможность скомпенсировать снижение цикловых подач на режимах пуска, а так же при использовании вязких топлив скорректировать скоростные характеристики дизеля.

Ключевые слова. *цикловая подача топлива, топливный насос высокого давления, гидравлическая плотность плунжерной пары, механический регулятор.*

Введение. Во многих странах, в том числе и СНГ, в больших масштабах применяют экономичные высокооборотные автомобильные дизели с распределительными топливными насосами высокого давления (ТНВД) типа BOSCH-VE, VER, которые остаются самыми массовыми в мире. Кроме стран дальнего зарубежья, ими же комплектуют дизели ВАЗ-341, дизели ЗМЗ-514 для автомобилей ГАЗ и УАЗ [1].

Большинство этих насосов оснащены механическими многорежимными регуляторами частоты вращения. Регуляторы встроены в корпус ТНВД и оказывают регулирующее воздействие на дозатор топлива насосной секции. Параметры и

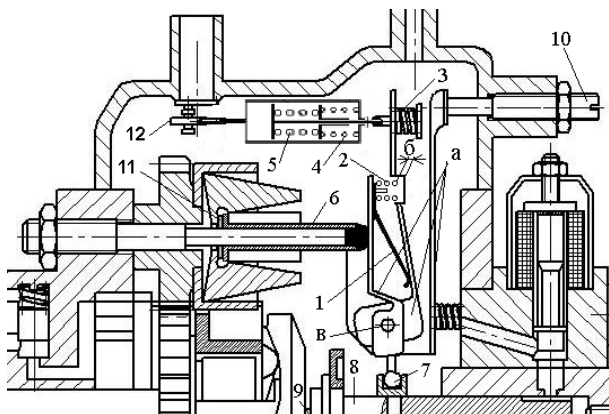
настройки регуляторов формируют заданные скоростные характеристики топливоподачи, от которых непосредственно зависят эксплуатационный расход топлива, динамические и экологические характеристики двигателя.

Переходные процессы составляют значительную часть режимов работы транспортных ДВС [2-4]. В процессе эксплуатации параметры регуляторов отклоняются от первоначально заданных из-за износов элементов и усадок пружин. Кроме того, скоростные характеристики топливоподачи высокооборотных дизелей существенно зависят от вязкости топлива. Вопросам влияния эксплуатационных факторов на показатели систем топливоподачи и автоматического регулирования дизелей посвящен ряд работ, например [5, 6], и другие. Однако в этих работах не рассмотрены вопросы моделирования характеристик многорежимных регуляторов, в том числе при нарушении в эксплуатации первоначально заданных конструктивных параметров и настроек из-за наличия износов деталей и усадок пружин. Кроме того, данное моделирование актуально и в случае использования топлив различной вязкости (дизельного топлива с добавками растительного масла, а также различных биотоплив). Экспериментальные данные по этим вопросам имеются в работах [7, 8], однако отсутствие расчетно-теоретических результатов моделирования характеристик названных регуляторов препятствует разработке стратегии восстановительных работ, а также выбору параметров и настроек для адаптации регуляторов к работе на вязких топливах. Данная статья призвана устранить названные пробелы.

Цель статьи – получить информацию, необходимую для должной настройки рассматриваемых регуляторов в различных случаях эксплуатации.

Изложение основного материала. Для проведения расчетного исследования использовалась математическая модель регулятора,

описанная в работе [8]. Схема многорежимного регулятора показана на рис. 1. В работах [5, 7] установлено, что при эксплуатации рассматриваемых ТНВД наблюдается износ следующих элементов: плунжерной пары, усадка пружин регулятора, уменьшение толщины S дистанционной шайбы 9 между кулачком и плунжером 8, уменьшение длины L муфты чувствительного элемента 6 и износ его антифрикционной шайбы 11.



1 – пружина режима пуска; 2 – пружина режима холостого хода; 3 – пружина частичных режимов; 4 – пружина режима максимального крутящего момента; 5 – пружина максимальной частоты вращения; 6 – муфта центробежного чувствительного элемента; 7 – шарнир управления дозатором; 8 – плунжер; 9 – дистанционная шайба осевой установки плунжера; 10 – винт установки исходного положения шарнира управления дозатором (винт регулировки подачи топлива); 11 – антифрикционная шайба муфты чувствительного элемента; 12 – рычаг управления. а – трехплечий рычаг; б – зазор между пружиной 2 и стенкой рычага «а» на режиме пуска при положении рычага управления на упоре режима холостого хода; в – ось трехплечего рычага.

Рис. 1. Конструктивная схема регулятора

Эти параметры определенным образом сказываются на перемещении дозатора (шарнира 7) и, следовательно, на скоростные и пусковые характеристики ТНВД. Результаты исследований по данным вопросам приведены ниже.

Усадка пружин №4 и №5 (см. рис. 1) влияет на уменьшение перемещения дозатора, (соответственно и цикловых подач топлива) при повышенных частотах вращения, а усадка пружины №3 – то же при более низких частотах вращения (1000...2000 мин⁻¹ по коленчатому валу).

В работе [8] показано, что деформации ΔX_5 и ΔX_4 пружин №5 и №4 по внешней характеристике определяются выражениями:

$$\Delta X_5 = (Z - Z_K) \cdot \frac{L_{X3}}{L_Z}, \quad \Delta X_4 = \Delta X_3 \cdot \frac{C_3}{C_4} - \Delta X_{40},$$

соответственно усилия пружин (восстанавливающая сила регулятора на рассматриваемых участках):

$$F_4 = C_4 (\Delta X_4 + \Delta X_{40}) L_{X3} / L_Z \text{ и}$$

$$F_5 = C_5 (\Delta X_5 + \Delta X_{50}) L_{X3} / L_Z,$$

где Z_K – перемещение муфты 6 от крайнего левого положения до ее контакта с центральным элементом трехплечего рычага; L_{X3} , L_Z – расстояние от оси «в» до осей пружин №3 – №5 и муфты 6 соответственно. C_3 , C_5 – жесткости пружин №3 – №5; ΔX_{40} и ΔX_{50} – предварительные деформации пружин №4 и №5.

Результаты исследования. Перемещение муфты измерителя Z определяется приведенной к ней жесткостью пружин №1 – №5 и поддерживающей силой грузов чувствительного элемента. При потере жесткости и усадке этих пружин в эксплуатации (как установлено экспериментально – до 15%) снижается восстанавливающая сила чувствительного элемента и баланс восстанавливающей и поддерживающей сил смещается в область более низких частот вращения коленчатого вала. Поэтому перемещения шарнира управления (дозатора) 7 в сторону уменьшения активного хода плунжера при этом начинаются раньше (с ростом частоты вращения) на 11% и 8%, как это показано на рис. 2.

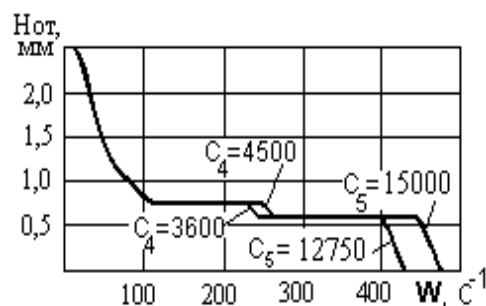


Рис. 2. Сравнительные перемещения дозатора при уменьшении жесткости пружин №4 и №5 в эксплуатации

Восстанавливающая сила на участке внешней характеристики, когда работает пружина №3, может быть определена для 2-х случаев. Первый случай (когда пружины N1 и N2 деформировались частично или до упора). При этом пружины №4 и №5 являются абсолютно жесткими по отношению к пружинам №1, №2 и №3, поскольку усилия от их предварительной деформации больше максимальной силы пружины №3. Деформация 3-й пружины: ΔX_3 здесь определяется как:

$$\Delta X_3 = L_Z [(C_1 + C_2) \cdot (Y_{\max} - Y_1^*) - C_2 \delta_{x2}] / (L_{x3} C_3).$$

Второй случай. На основании анализа результатов эксперимента, при соотношениях $C_3 \Delta X_3 > C_4 \Delta X_{40}$, но $\Delta X_3 < \Delta X_{3\max}$, установлено, что работают соединенные последовательно обе пружины №3 и №4. Деформация 3-й пружины: ΔX_3 здесь:

$$\Delta X_3 = \frac{C_4}{C_3 + C_4} \cdot [(Z - Z_{k\max} + h_p - Y_{\max}) \cdot \frac{L_{X3}}{L_Z} + \Delta X_{40}]$$

В обоих случаях восстанавливающая сила определится как $E(\phi, z) = C_3 \cdot \Delta X_3 \cdot L_{x3} / L_z$. В итоге, как показали результаты моделирования, уменьшение жесткости пружины 3 существенно уменьшает (на 13,5%)

перемещение дозатора, как это показано на рис. 3 (что практически пропорционально снижает подачу топлива) в диапазоне частот вращения 1000 - 2000 мин⁻¹ по коленчатому валу. Это обстоятельство можно использовать для коррекции скоростных и внешней характеристики топлива подачи при использовании вязких топлив, в том числе биотоплив на основе растительных масел [6, 7].

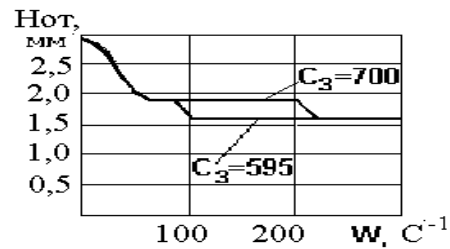


Рис. 3. Сравнительные перемещения дозатора при уменьшении жесткости пружины №3 в эксплуатации

При малых частотах вращения вала ТНВД на формирование внешней характеристики перемещения дозирующего органа существенное влияние оказывают пружины №1 и №2, а также их усадка и зазор b_{x2} , как это видно из выражения для восстанавливающей силы E (подробнее см. работу [8]) на этих режимах:

$$E(\phi, z) = C_1 \cdot (Y_{\max} - Y_1^*) + C_2 \cdot \left[(Y_{\max} - Y_1^*) \cdot \frac{L_{x2}}{L_z} - \delta X_2 \right] \cdot \frac{L_{x2}}{L_z}$$

здесь

$$Y_1^* = \frac{1}{C} \left[C_3''(Z_{k\max} - h_p + Y_{\max}) - C_2'' \cdot \delta X_2 + (C_1 + C_2'')Y_{\max} \right] - \frac{C_3''}{C} Z.$$

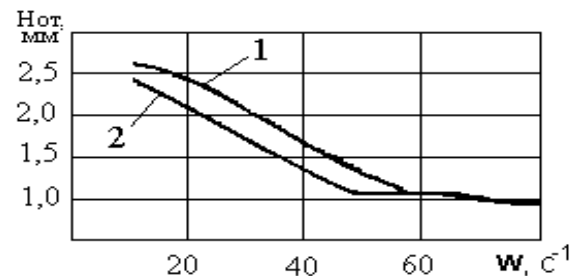
Перемещение дозатора при этом процессе показано на рис. 4. Пружины №3, №4 и №5 на этом участке не оказывают влияние на форму характеристики.

Износ плунжерных пар снижает в первую очередь подачу топлива при пуске, нарушается режим холостого хода и в меньшей степени режимы малых частот вращения. Увеличением длины пружины 3 удастся скомпенсировать снижение цикловых подач на малых и средних частотах вращения из-за износа плунжерной пары, а увеличением жесткости пружин №1 и №2 на ремах холостого хода и пуска. Как видно из рисунка 4, восстановление характеристик пружин позволяет на режиме пуска увеличить геометрический активный ход плунжера до 25%.

Уменьшение толщины шайбы 9 (см. рис. 1) на 0,1мм вследствие износа приводит к увеличению цикловых подач на 4% по всей скоростной характеристике. Исключением здесь могут быть режимы пуска в случае существенной потери гидравлической плотности плунжерной пары. Здесь цикловая подача может уменьшаться с одновременным снижением максимального давления впрыска. В этом случае также полезным оказывается увеличение жесткости пружин №1 и №2 с одновременным уменьшением зазора b_{x2} .

Износ носика муфты 6 и антифрикционной шайбы 11 (см. рис. 1), например на 0,1мм, также приводят к увеличению активного хода плунжера на 2,3% для всех режимов (в том числе при пуске), но сопровождается снижением первоначально заданной максимальной частотой вращения. К этому же эффекту приводит и износ упорного бурта

центрального звена трехплечего рычага (позицию «а» на рис. 1).



1 – $C_2=250\text{Н/м}$, $C_1=50\text{Н/м}$, $b_{x2}=2,5\text{мм}$ (исходные параметры); 2 – $C_2=200\text{Н/м}$, $C_1=10\text{Н/м}$, $b_{x2}=3,125\text{мм}$ (случай длительной эксплуатации)

Рис. 4. Сравнительные перемещения дозатора при уменьшении жесткости пружин 1, 2 и увеличении зазора b_{x2}

Выводы. В процессе эксплуатации при потере жесткости и усадке пружины №5 многорежимного регулятора снижаются мощность, номинальная и максимальная частоты вращения двигателя до 11%;

на режиме максимального крутящего момента аналогичная потеря упругости пружины №4 снижает частоту вращения дизеля на этом режиме до 8%;

для диапазона частот вращения двигателя 1000 - 2000 мин⁻¹ (начало разгона) эксплуатационная усадка пружины №3 приводит к снижению подачи топлива на 13,5%;

При износе плунжерных пар (снижении гидравлической плотности) увеличением жесткости

пружин №1 и №2 с одновременным уменьшением зазора бх2 удается скомпенсировать снижение цикловых подач на режимах пуска;

износ шайбы 9 (см. рис. 1) на 0,1мм приводит к увеличению цикловых подач на 4% по всей скоростной характеристике, что необходимо учитывать при настройке ТНВД;

для коррекции частичных скоростных и внешней характеристик топливоподачи при использовании вязких топлив необходимо снизить жесткости пружин №3 и №4 не менее 20% и 35% соответственно.

Литература

1. Голубков, Л.Н. Топливные насосы высокого давления распределительного типа / Л.Н. Голубков, А.А. Савастенко., М.В. Эммиль // Учебно-практическое пособие / 3-е изд., перераб. и доп. - М.: "Легион-Автодата", 2000. - 176 с.

2. Барченко Ф.Б. Моделирование работы двигателя при движении колесного транспортного средства по ездовому циклу / Ф.Б. Барченко, А.В.Сячинов, И.Д. Шишко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Транспортное и энергетическое машиностроение. №6(663) / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. – С. 9-15.

3. Маняшин А. В. Моделирование расхода топлива автомобилями на базе типичных ездовых циклов / А. В. Маняшин. С. А. Маняшин. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. - 124 с.

4. Погуляев, Ю.Д. Универсальная система нового поколения управления подачей топлива в дизелях / Ю.Д. Погуляев, В.Н. Наумов, Р.М. Байтимеров // Строительные и дорожные машины, 2013. – №10. – С. 24-27.

5. Тырловой С.И. Восстановление характеристик топливных насосов автомобильных дизелей изменением параметров центробежного регулятора / С.И. Тырловой // Вестник национального технического университета «ХПИ», Двигатели внутреннего сгорания, выпуск 2, 2001 г., С. 44-50.

6. С.И. Тырловой. Адаптация топливной аппаратуры высокооборотных дизелей для работы на растительном масле. Вестник СНУ, 2005, №8(90), часть 1. – с. 209-213.

7. С.И. Тырловой. Изменение параметров топливоподачи распределительных ТНВД с приводом плунжеров кулачком с торцовым профилем в условиях эксплуатации Вестник СНУ, 2006, №8(102), часть 1. – С. 157-162.

8. С.И. Тырловой. Моделирование работы многорежимных регуляторов распределительных ТНВД. Вестник СНУ, 2007, №8(114), часть 1. – С. 171-176.

**Tyrlovoi S.I., Kostenko A.V., Chudnoj A.A. I
IMPROVING THE PERFORMANCE OF HIGH-SPEED
DIESEL FUEL PUMPS IN OPERATION**

The results of studies of the influence of operational factors on the characteristics of the automatic control system of high-speed automobile diesel engines equipped with high-pressure fuel distribution pumps of the BOSCH-VE type are presented. The parameters and settings of the regulators form the specified speed characteristics of the fuel supply, on which the operating fuel consumption, dynamic and environmental characteristics of the engine directly depend.

During operation, with the loss of rigidity and shrinkage of various governor springs, the power, rated and maximum engine speeds are reduced by up to 11%. At maximum torque mode, the diesel engine speed is reduced to 8%.

At the beginning of acceleration modes (for the engine speed range 1000 -2000 min⁻¹), the operational shrinkage of the springs leads to a reduction in fuel supply by 13.5%.

When plunger pairs wear out (decrease in hydraulic density), it is possible to compensate for the decrease in cyclic feed rates during start-up modes, and also when using viscous fuels to adjust the speed characteristics of the diesel engine.

Keywords. cyclic fuel supply, high-pressure fuel pump, hydraulic density of the plunger pair, mechanical regulator.

Тырловой Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: tyrlovoy.si@mail.ru

Костенко Арсений Вадимович, студент гр. ТЛ-801 кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Чудной Артем Александрович, студент гр. ТЛ-801 кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Tyrlovoy Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines «LSU named after V. Dahl».

Kostenko Arseniy Vadimovich, student gr. TL-801 of the department "Internal combustion engines" «LSU named after V. Dahl».

Chudnoj Artem Alexandrovich, student gr. TL-801 of the department "Internal combustion engines" «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Семин Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрогазодинамики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 19.11.2023

УДК 628.12:628.16.06

ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА

Чебан В. Г.

CIRCULATION INSTALLATION

Cheban V. G.

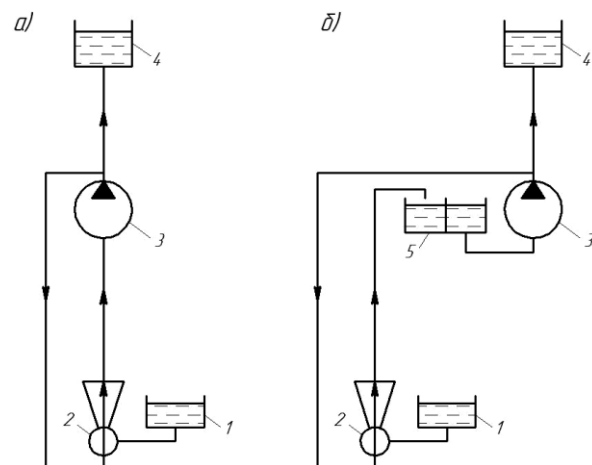
Предложена схема циркуляционной установки, способной откачивать загрязненную жидкость с большой глубины, содержащая гидродинамический очиститель, обеспечивающий непрерывную очистку жидкости от твердых механических примесей на входе в центробежный насос. Применение дополнительных элементов и оборудования позволит повысить надежность и эффективность работы циркуляционной установки.

Ключевые слова: центробежный насос, струйный насос, гидродинамический очиститель, загрязненная жидкость, механическая примесь.

Введение. В практике эксплуатации насосных установок нередко возникает необходимость подъема жидкости с большой глубины, значение которой превышает допустимую вакуумметрическую высоту всасывания центробежных насосов. Поэтому в таких случаях вынуждены применять погружные насосы. Однако на их эффективное применение оказывают влияние условия эксплуатации. Во-первых, это концентрация, тип и размер твердых частиц механических примесей в перекачиваемой жидкости. Во-вторых, параметры серийно выпускаемых погружных насосов не всегда соответствуют требуемому диапазону напоров и расходов. Для указанных условий можно использовать циркуляционные установки, содержащие центробежные и струйные насосы. При этом центробежный насос располагают выше уровня жидкости в удобном для обслуживания месте, а струйный насос опускают на необходимую глубину и погружают под уровень жидкости в источнике или в приемном резервуаре [1]. Схемы таких установок приведены на рис. 1.

Установка, приведенная на рис. 1, а предназначена для жидкостей с небольшим содержанием твердых примесей. При этом допустимое содержание загрязнений в жидкости выбирается из условия обеспечения надежной и продолжительной работы центробежного насоса 3. Поэтому для перекачивания жидкостей с твердыми примесями применяют установку, представленную на рисунке 1, б. В этом случае перекачиваемая

струйным насосом 2 жидкость подается в резервуар-отстойник 5, который имеет две секции. Левая секция предназначена для приема откачиваемой загрязненной жидкости и осаждения твердых частиц загрязнения. Очищенная жидкость поступает в правую секцию и направляется на вход центробежного насоса 3.



а – для откачки чистой жидкости; б – для откачки жидкости, содержащей твердые примеси

Рис. 1. Схемы циркуляционных установок: 1 – приемный резервуар; 2 – струйный насос; 3 – центробежный насос; 4 – напорный резервуар; 5 – промежуточный резервуар-отстойник

Совместное применение струйных и центробежных насосов позволяет существенно расширить возможности используемых насосов, например, откачивать жидкость центробежным насосом, расположенным на поверхности земли, из глубоких шахт, скважин и колодцев. Установка струйного насоса перед центробежным позволяет повысить допустимую высоту всасывания последнего, а также изменять в широких пределах его рабочие и кавитационные характеристики.

Известно, что ресурс центробежного насоса, как основного оборудования циркуляционной установки, зависит от размера и количества твердых частиц загрязнений в перекачиваемой жидкости, и

откуда условием задержания частичек загрязнения в ячейках сетки является соотношение $d \geq 4c \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

На рис. 4 показана принципиальная схема предлагаемой циркуляционной установки.

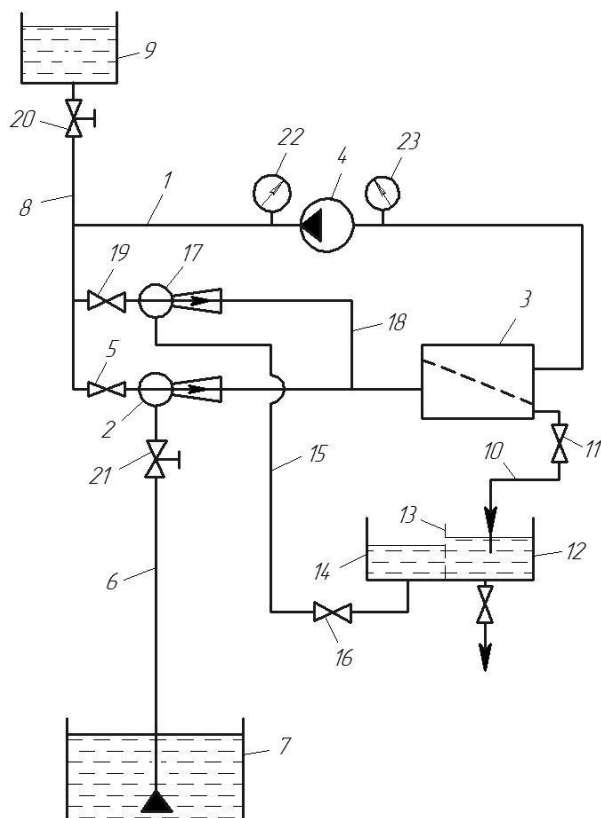


Рис. 4. Схема циркуляционной установки

Установка содержит закольцованный трубопровод 1, на котором последовательно соединены основной струйный насос 2, НГДО 3, центробежный насос 4 и регулируемый элемент 5. Струйный насос 2 посредством заборного трубопровода 6 соединен с приемным резервуаром 7, а закольцованный трубопровод 1 с помощью напорного трубопровода 8 соединен с напорным резервуаром 9, при этом напорный трубопровод 8 присоединен к закольцованному трубопроводу 1 на участке между центробежным насосом 4 и регулирующим элементом 5, обеспечивающий подачу жидкости на более значительное расстояние или высоту. НГДО 3 посредством сливного трубопровода 10 с регулирующим элементом 11 соединен с камерой 12 загрязнений, которая через фильтрующую или переливную перегородку 13 соединена с камерой 14 отстоянной жидкости, которая с помощью циркуляционного трубопровода 15 с регулирующим элементом 16 соединена с камерой пониженного давления дополнительного струйного насоса 17, присоединенного до закольцованного трубопровода 1 посредством обводного трубопровода 18 с регулирующим элементом 19 перед входом в очиститель,

параллельно основному струйному насосу 2. Установка также оборудована запорными элементами 20 и 21, манометром 22 и вакуумметром 23.

Для вывода установки в начальное состояние ее трубопроводы и оборудование заполняют очищенной жидкостью из резервуара 9. Для этого запорный 21 и регулировочные 11, 16 и 19 элементы закрывают, а регулирующий 5 и запорный 20 элементы и продувной вентиль (на рисунке не показан) полностью открывают. Далее продувной вентиль удерживают открытым до тех пор, пока жидкость не будет вытекать из него без признаков воздуха. После этого продувной вентиль закрывают. Такой же продувной вентиль может быть и на фильтре 3 и с ним поступают так же, как и с первым. Затем запускают в работу центробежный насос 4, постепенно открывают запорный элемент 21 и при посредничестве регулирующих элементов 5 и 11, манометра 22 и вакуумметра 23 налаживают работу установки. При этом часть жидкости после центробежного насоса 4 попадает в напорный резервуар 9, а другая часть, которая называется рабочей и определяется регулирующим элементом 5, попадает в струйный насос 2, где встречается с всасываемой из резервуара 7 загрязненной откачиваемой жидкостью. Далее смесь из чистой и загрязненной жидкостей под давлением и непрерывным потоком попадает в очиститель 3. В очистителе большая часть жидкости очищается от твердых загрязнений, а меньшая часть, определяемая регулирующим элементом 11, сбрасывается по сливному трубопроводу 10 в камеру 12 загрязнений, после чего проникает через фильтрующую или переливную перегородку 13 в камеру 14 отстоянной жидкости.

В то же время очищенная жидкость из очистителя 3 попадает снова в центробежный насос 4, после чего процесс повторяется. В связи с тем, что НГДО работают непрерывно при постоянном сливе части жидкости (8–20 %), то для уменьшения величины этих потерь часть жидкости из камеры 14 снова подается на вход очистителя 3. Для этого постепенно открывают регулирующие элементы 19 и 16 таким образом, чтобы расход сливной доли жидкости через регулирующий элемент 11 не изменялся. При этом посредством регулирующего элемента 5 количество жидкости перед центробежным насосом 4 настраивают постоянным. В этом случае часть сливной жидкости циркулирует в установке, а не сливается в дренаж или канализацию, что повышает эффективность работы установки.

Применение циркуляционного трубопровода 15 обеспечивает снижение потерь жидкости со сливом, что в свою очередь повышает эффективность работы установки, а регулирующий или запорный элемент 16 на нем определяет количество этих потерь. Наличие дополнительного струйного насоса 17 обеспечивает расширение возможностей

использования установки в случае, когда обязанности заборного трубопровода 6 выполняет всасывающий патрубок струйного насоса 2 (например, в случае его выполнения в скважинном варианте) и к нему невозможно присоединить циркуляционный трубопровод 6 с запорным элементом 21, обязанности которого выполняет, например, обратный клапан, смонтированный перед всасывающим патрубком струйного насоса. По сравнению с вариантом, когда циркуляционный трубопровод 15 подсоединен к заборному трубопроводу 6, в варианте с дополнительным струйным насосом 17 достигается повышение производительности очистителя 3 по входу за счет циркулирующей части жидкости без изменения его производительности по выходу, что способствует улучшению самоочистки сетки фильтроэлемента за счет увеличения скорости сливной доли жидкости в его напорном канале без увеличения ее потерь, что в свою очередь повышает надежность работы очистителя 3 в непрерывном режиме. Следствием этого является также повышение эффективности работы установки.

Выполнение шламовой емкости в виде камеры 12 загрязнений и камеры 14 отстоянной жидкости, разделенных фильтрующей или переливной перегородкой 13, по сравнению с вариантом, когда она отсутствует, обеспечивает предварительную очистку сливной жидкости путем осаждения наиболее крупных частиц загрязнений. Далее эта жидкость попадает на циркуляцию через дополнительный струйный насос 17, что повышает срок службы оборудования установки и надежность ее работы.

Выводы. Наличие гидродинамического очистителя, дополнительного струйного насоса и запорно-регулирующей аппаратуры обеспечивает повышение надежности и эффективности работы циркуляционной установки за счет непрерывной очистки загрязненной перекачиваемой жидкости, снижения потерь жидкости со сливом и увеличения срока службы основного оборудования установки.

Л и т е р а т у р а

1. Лямаев, Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 256 с.
2. Чебан, В.Г. Перспективы применения неполнопоточных гидродинамических очистителей воды как альтернативы использования автоматических самопромывных фильтров / В.Г. Чебан, А.Н. Тумин // Журнал «Вода Magazine», № 12 (112). – М.: ООО «Издательский дом «ЭкоМедиа», 2016. – С.42-46.
3. Чебан, В.Г. Расчет и проектирование гидродинамического очистителя типа «цилиндр в цилиндре»: монография / В.Г. Чебан. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГИТИ», 2022. – 111 с

Cheban V.G.

CIRCULATION INSTALLATION

A scheme of a circulation installation is proposed, capable of pumping out contaminated liquid from great depths, containing a hydrodynamic cleaner that ensures continuous cleaning of the liquid from solid mechanical impurities at the inlet of the centrifugal pump. The use of additional elements and equipment will improve the reliability and efficiency of the circulation installation.

Key words: centrifugal pump, jet pump, hydrodynamic cleaner, contaminated liquid, mechanical impurity

Чебан Виктор Григорьевич, к.т.н., доцент кафедры горных энергомеханических систем ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск.

E-mail: edvik2010@yandex.com

Cheban Viktor Grigorovych, Candidate of Sciences, associate professor of the Chair of Mining energy-mechanical systems, FSBEI HE «Donbass State Technical University», city Alchevsk.

Рецензент: Рутковский Юрий Александрович, кандидат технических наук, профессор горных энергомеханических систем ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск.

Статья подана 27.11.2023 года

УДК 621.1

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА ГАЗИФИКАЦИИ ГРАФИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Чижевская Д. Ю., Никитин Ю. Н., Шабрацкий С. В.

RESOURCE-SAVING TRANSPORT SYSTEM FOR GASIFICATION OF GRAPHITE- CONTAINING WASTE

Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N., Shabratsky S. V.

Рассмотрены вопросы использования электродного боя. Определена марка и размер электродного боя для газификации. Предложена технология подготовки и газификации электродного боя использующая установку для получения синтез-газа. Представлена сравнительная характеристика содержания полученного синтез-газа. Выполнен анализ существующей транспортной системы газификации графитсодержащих отходов и выявлены недостатки. Разработана ресурсосберегающая транспортная система газификации графитсодержащих отходов использующая систему аккумулирующую избыток синтез-газа.

Ключевые слова: графитсодержащие отходы, электродный бой, газификация, синтез-газ, транспортная система газификации.

Введение. Увеличение спроса на ресурсы в условиях недостатка сырья отражают острую необходимость поиска решений данной проблемы. Сохранение тенденций к увеличению выбросов углекислого газа и прочих парниковых газов, влекущих за собой изменения климата, усугубляют отмеченные проблемы [1].

Графитовые электроды используют при разных операциях: при проведении обработки поверхностей перед сваркой, резкой заготовок, зачистки кромок деталей из металла, для сварки медных проводов и дуговой резки, при производстве чугуна, стали и сплавов и являются важным элементом электродуговых печей.

Согласно ГОСТР 57613-2017 «Электроды графитированные и ниппели к ним» электродная промышленность выпускает широкий ассортимент электродов, как по типоразмерам, так и по физико-механическим свойствам в соответствии с потребностями металлургического комплекса.

Объем рынка графитированных и угольных электродов для печей в России по итогам 2021 г. составил 156650,9 тн [2].

Наиболее распространенным сырьем для изготовления графитовых электродов служат природные и искусственные углеродистые материалы: коксы игольчатые и регулярные,

нефтяные и пековые, возвраты электродного производства, изготовленные из высококачественной малосернистой нефти и каменноугольных смол [3].

Потери от поломки электродов составляют 5-10 % от общих потерь и определяются [4]:

- внутренними факторами: качеством графитовых электродов;
- внешние факторы: условием хранения и неправильной эксплуатацией во время установки и использования.

Электродный бой включает в себя бой и огарки графитированных электродов и фасонных изделий и используется в качестве наполнителя при производстве электродной продукции и изготовления измельченного графита для науглероживания чугуна и стали, для изготовления фасонных изделий, а также для получения синтез-газа [5, 6].

Синтез-газ (водяной газ) образуются при взаимодействии нагретого до температуры около 1 000–1 100 °С кокса, каменного или древесного угля с водяным паром. Он используется в химической промышленности: служит основой для производства различных химических веществ, включая метанол, аммиак, спирты, уксусную кислоту и другие органические соединения; энергетике: для получения тепла и электроэнергии; топливо для автомобилей: может служить альтернативным видом топлива для автомобилей - при сжигании выделяет значительно меньше вредных выбросов, чем традиционные виды топлива; производство синтетических топлив: дизельное топливо и бензин, что позволяет снизить зависимость от нефти и расширить возможности производства топлива; производство удобрений: аммиак, является основным компонентом многих удобрений; в металлургии для восстановления металлических порошков, защиты изделий при спекании, науглероживающего спекания или цементации [7, 8, 9].

Совершенствование технологий переработки графитсодержащих отходов в синтез-газ может

обеспечить решение некоторых актуальных вопросов ресурсного, экономического и экологического значения в области порошковой металлургии и других областях [10, 11].

Цель работы: усовершенствование транспортной система газификации графитосодержащих отходов, путем применения системы аккумулирующей избыток синтез-газа увеличит ресурс работы газогенератора и повысит эффективность процесса газификации, и таким образом снизит выбросы продуктов горения синтез-газа в атмосферу.

Решение проблемы. Для получения генераторного газа с помощью газогенератора [11, 12] представленного на рис. 1 возможно использовать любые кусковые графитосодержащие

отходы размером не менее 5×5 мм за исключением графитовых радиоактивных отходов. Однако наиболее эффективно использовать электродный бой (бой графита) марки А (табл. 1), так как он содержит наибольшее количество углерода – 99%, а значит дает возможность получить большее количество горючего газа CO и H₂.

В бое графита марки А содержание массовой доли серы не более 0,05%, что повышает эффективность производимого газа. При зольности не более 1% в рабочей зоне газогенератора не образуется ее свод, и она не забивает зольник. Удельное электрическое сопротивление не более 10 мкОм·м позволяет между частицами графита возникать большее количество микродуг, что повышает эффективность процесса газификации.

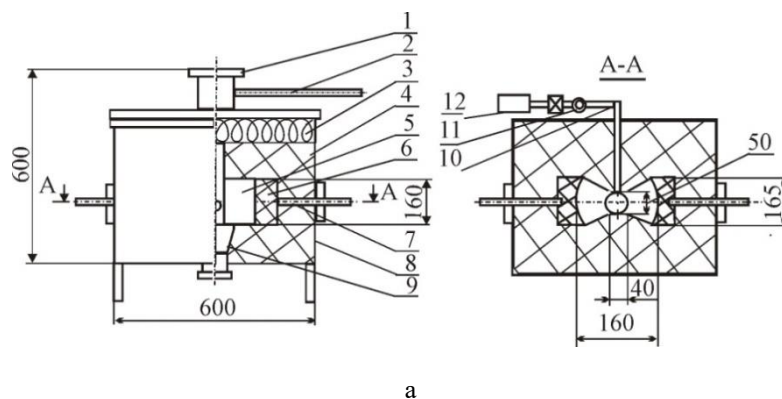


Рис. 1. Экспериментальная установка для получения синтез-газа:

а – схема; б – фото: 1 – загрузочная горловина; 2 – трубопровод для отвода газа; 3 – засыпка; 4 – футеровка; 5 – рабочая зона; 6 – графитовый электрод; 7 – токоподводящие шины; 8 – металлический корпус; 9 – зольник; 10 – трубопровод для подачи воды; 11 – регулирующий кран; 12 – резервуар с водой

Т а б л и ц а 1

Электродный бой (бой графита) ТУ 1911-109-73-2000

Наименования показателей		Марки		
		А	Б	В
Размеры кусков боя графита, мм, не менее	Сечение	250x250	100x100	50x50
	Диаметр	250	100	50
	Длина	500	300	50
Массовая доля влаги, %, не более		1	5	10
Массовая доля углерода, %, не менее		99	90	80
Массовая доля серы, %, не более		0,05	0,50	1,00
Объемная плотность, г/куб.см, не менее		1,55	1,55	1,50
Зольность, %, не более		1	10	20
Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м, не более		10	20	50

Перед загрузкой газогенератора выполняют подготовку кускового графита. Бой графита марки А дробят с помощью молотковой дробилки или др. дробилок и рассеивают до размера фракций от 5×5 мм до 15×15 мм.

Подготовленный бой графита загружают в рабочую зону 5 через горловину 1 газогенератора (рис. 1) и герметизируют. Через токоподводящие шины 7 на графитовые электроды 6 подают ток 400А от источника питания. Между частицами

графита возникают микродуги, в результате чего в рабочей зоне 5 выделяется большое количество теплоты, и температура за 10-15 мин достигает 1500-1600°C. Для повышения эффективности процесса выработки газа рабочая зона заужена в центральной части, что позволяет в этой зоне снизить сопротивление прохождению тока гораздо больше, чем у поверхности электродов. Температура электродов не превышает 400-500°C, что обеспечивает их высокую стойкость. Кроме того

срок службы электродов повышается, так как рабочая часть выполнена по радиусу равному 120 мм. В нижнюю часть рабочей зоны 5 через регулирующий кран 11 из резервуара 12 по трубопроводу подается порционно вода. Происходит процесс диссоциации пара. Образовавшийся газ отводится по трубопроводу 2.

Состав синтез-газа определяли согласно ГОСТ 31371.7 - 2020 «Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 7. Методика измерений молярной доли компонентов» результаты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Сравнительный анализ состава синтез-газа, %

Газообразные среды	H ₂	CO	H ₂ /CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂
Синтез-газ (водяной газ) образующийся при взаимодействии нагретого до температуры около 1000–1100 °С кокса, каменного или древесного угля с водяным паром [8]	48–49	36	1,35	16			
Полученный синтез-газ образовавшийся при взаимодействии нагретого до температуры около 1500-1600°С боя графита с водяным паром	63-65	30	2,1	0,5	1,5	0,5	-
Сырой неочищенный синтез-газ [13]	38-40	15-18	2,36	30-32	-	9-11	-

Одним из основных показателей является соотношение CO и H₂. В зависимости от метода получения синтез-газа соотношение CO:H₂ в нем варьируется от 1:1 до 1:3 [13]. Несмотря на то, что сырой неочищенный синтез-газ имеет большее значение H₂/CO=2,36 полученный синтез-газ имеет большее содержание CO и H₂. Очевидно, высокое содержание горючих компонентов связано с тем, предложенная технология использует более высокие температуры 1500-1600°С и давление в системе. Повышением температуры в процессе синтеза можно увеличить количество CO, а увеличив давление можно повысить содержание H₂ [13]. Необходимо также отметить низкое содержание экологически вредного газа CO₂ в произведенном синтез-газе.

Анализ транспортной системы газификации графитсодержащих отходов [14] выявил следующие недостатки:

- образующийся избыток синтез-газа выбрасывается через предохранительный клапан в атмосферу или сжигается;
- длительный выход газогенератора на рабочий режим;
- инерционность газогенератора;
- отсутствие стабильности выработки синтез-газа.

Для устранения этих недостатков предложено использование системы аккумулирующей избыток синтез-газа.

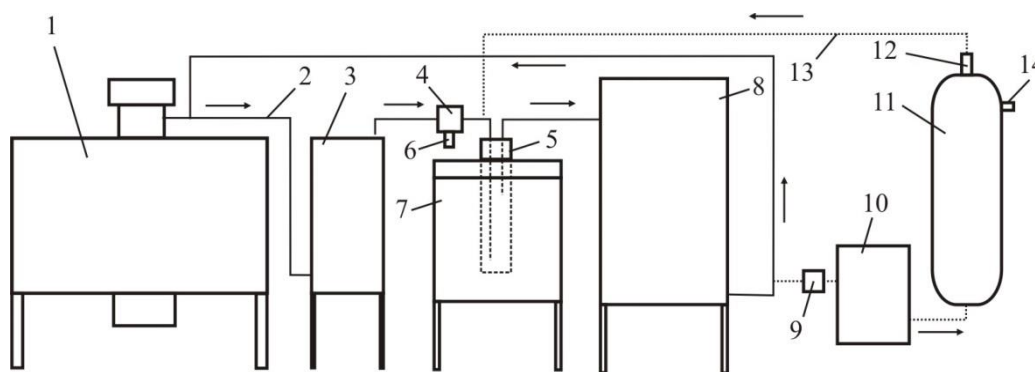


Рис. 2. Блок-схема ресурсосберегающей транспортной системы газификации графитсодержащих отходов

На рис. 2 представлена упрощённая блок-схема ресурсосберегающей транспортной системы газификации графитсодержащих отходов. Система работает следующим образом. Работа газогенератор 1 представлена выше. Произведенный синтез-газ по трубопроводу 2 перемещается в адсорбционную установку осушки газа 3, и далее к анализатору газа с электроклапаном 4. Электроклапан перекрывает трубопровод, соединенный с контейнером 5 с песчаным затвором, в котором уложены

порошковые заготовки для спекания и открывает отверстие патрубка 6 для сброса воздуха. При достижении безопасной концентрации кислорода в генераторном газе газоанализатор подает сигнал электроклапану, который перекрывает патрубок для сброса воздуха и открывает трубопровод для подачи синтез-газа. Синтез-газ заполняет контейнер с песчаным затвором по трубке снизу вверх и его устанавливают в разогретую до необходимой температуры шахтную печь 7. Далее синтез-газ

перемещается в установку для очистки и осушки 8, а оттуда в трубопровод 2, где он смешивается с выходящим из генератора газом, при этом подаваемый ток на электроды уменьшается до 50А. При избытке синтез-газа срабатывает датчик давления 9 и запускается компрессор 10. Ресивер 11 аккумулирует избыточный синтез-газ. При уменьшении давления синтез-газа меньше необходимого срабатывает датчик давления и открывает электроклапан ресивера 12. Аккумулированный синтез-газ по трубопроводу 13 перемещается в трубопровод 2. Давление в системе выравнивается и электроклапан ресивера закрывается. При избытке синтез-газа в системе срабатывает предохранительный клапан 14 и выпускает его в атмосферу. Аккумулированный синтез-газ, возможно, использовать при запуске газогенератора пока он не выйдет на рабочий режим. В этом случае электроклапан с анализатором газа закрыт, и синтез-газ с помощью компрессора циркулирует, минуя газогенератор.

Вывод. Применения системы аккумулирующей избыток синтез-газа позволяет:

- повысит ресурс работы газогенератора – снижение подаваемого тока с 400А до 50А уменьшает перегрев и оплавление футеровки;
- образующийся избыток синтез-газа аккумулируется в ресивере;
- длительный выход газогенератора на рабочий режим компенсирует подача аккумулированного синтез-газа, который циркулирует, минуя газогенератор;
- инерционность газогенератора и отсутствие стабильности выработки синтез-газа компенсируется поддержанием давления в системе аккумулированным синтез-газом нагнетаемым компрессором;
- предложенная система позволяет минимизировать выбросы синтез-газа или продуктов его горения в атмосферу.

Л и т е р а т у р а

1. Амиров, Н.Р. Циркулярная экономика: возможности и барьеры / Н.Р. Амиров, Л.В. Саргина, Я.Э. Кондратьева // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Общественные науки. – 2021. – №3 (59). – С. 187-200.
2. Анализ рынка графитированных и угольных электродов для печей в России [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Otchet_DEMO_Analiz_rynka_elektrodov_grafitirovannykh_i_ugolnykh.pdf.
3. Дыскина, Б. Ш. Теоретическое обоснование расхода сырьевых материалов в производстве графитированных электродов и ниппелей / Б.Ш. Дыскина, Е.М. Малютина, В.А. Смолко, Г.А. Лысова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. – 2008. – №9 (109). – С. 51-53.
4. Бой электродов графитированных электродов: Бой электродов графитированных — Тульская Угольная Компания — Лазерная резка металла от "ТМК" Ярославль (Тутаев) [Электронный ресурс] / Режим доступа:

<https://тмклзеп.рф/elektrod/boj-elektrodov-grafitirovannyh-elektrodov-boj-elektrodov-grafitirovannyh-tulskaya-ugolnaya-kompaniya.html>.

5. Лом (бой) графита — Портал о ломе, отходах и экологии [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://xlom.ru/nemetal-lom/lom-boj-grafita>.
6. Никитин, Ю.Н. Совершенствование технологии изготовления осесимметричных деталей из порошкового материала с использованием предельных степеней деформации: дис. канд. техн. наук (05.03.05) / Ю.Н. Никитин // Луганск. вост-укр. университет. – Луганск, 2006. – 222 с.
7. Жуйков, А.В. Способы получения и практического применения синтез-газа (обзор) / А.В. Жуйков, А.И. Матюшенко // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2020. – №4. – С. 383-405.
8. Осокин, Е.Н. Процессы порошковой металлургии. / Е.Н. Осокин, О.А. Артемьева. Версия 1.0 [Диск]: курс лекций. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 421 с.
9. Что такое синтез газа: принцип работы, использование и перспективы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://tdcollege.ru/sintez-gaza-cto-eto-takoe-i-kak-ono-rabotaet>.
10. Фадеева, Н.В. Опыт переработки графитсодержащей пыли металлургического производства. / Н.В. Фадеева, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – №75(5). С. 632-639.
11. Цыркин, А.Т. Малогабаритная установка для получения синтез газа / А.Т. Цыркин, Ю.Н. Никитин, Н.В. Белошицкий, А.В. Коваливский // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. научн. труд. В 2-х ч. - Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля. – 2004. Ч. 2. С. 115-119.
12. Заявка на патент Украина на полезную модель. Газогенератор / Цыркин А.Т., Никитин Ю.Н., Коваливский А.В., Белошицкий Н.В., Стафеев А.И. – № 200505378; от 15.12.05.
13. Васючков, Ю.Ф. Газовое углеводородное топливо из угля - будущая основа тепловой энергетики / Ю.Ф. Васючков, В.В. Мельник, Н.И. Абрамкин, И.И. Савин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2017. – №4. – С. 131-140.
14. Заявка на патент Украина на полезную модель. Газогенератор / Рябичева Л.А., Никитин Ю.Н., Шкабура К.П., Добрыднева А.И. – № 201004527; от 25.11.10.

**Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N.,
Shabratsky S. V.**

RESOURCE-SAVING TRANSPORT SYSTEM FOR GASIFICATION OF GRAPHITE-CONTAINING WASTE

The issues of using electrode strikes are considered. The brand and size of electrode scrap for gasification have been determined. A technology for the preparation and gasification of electrode waste using an installation for producing synthesis gas has been proposed. A comparative description of the content of the resulting synthesis gas is presented. An analysis of the existing transport system for gasification of graphite-containing waste was carried out and shortcomings were identified. A resource-saving transport system for the gasification of graphite-containing waste has been developed using a system that accumulates excess synthesis gas.

Key words: graphite-containing waste, electrode waste, gasification, synthesis gas, gasification transport system.

Чижевская Дарья Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий, Институт транспорта и логистики, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Никитин Юрий Николаевич, к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий, Институт транспорта и логистики, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: ynnikitint@mail.ru

Шабрацкий Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспорта и технологий, Северодонецкого технологического института, ФГБОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: ynnikitint@mail.ru

Chizhevskaya Darya, Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor of the «Transport Technologies» «LSU named after V. Dahl».

Nikitin Yuri, Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor of the «Transport Technologies» «LSU named after V. Dahl».

Shabratsky Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Transport and Technology, Severodonetsk Technological Institute, «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Тарарычкин Игорь Александрович, д.т.н., проф., зав. кафедрой транспортных технологий, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУКИ

УДК 517.939.4+517.444+621.383

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЭЛЕКТРОННЫХ, НАНОЭЛЕКТРОННЫХ, ОПТИЧЕСКИХ И КВАНТОВЫХ ЦЕПЯХ

Бобровский Г. А.

VIRTUAL EXPERIMENT IN ELECTRONIC, NANOELECTRONIC, OPTICAL AND QUANTUM CIRCUITS

Bobrowskiy G. A.

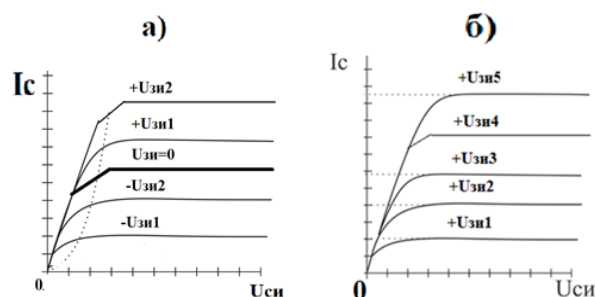
Виртуальный эксперимент – это опыт, который может быть проведён до изготовления опытного образца, к примеру, до разработки и изготовления чипа наноприбора. В данной статье представлены материалы по организации и проведению виртуальных экспериментов в электронных, нанoeлектронных, оптических и квантовых цепях различного назначения: в дифференциальных фотодиодных и фототранзисторных детекторах оптического излучения, в цепях, формирующих сигналы заданной формы, в цепях на основе биполярных и униполярных наноприборов и др.

Ключевые слова: виртуальный эксперимент, нанoeлектронные (электронные, оптические, квантовые) цепи, биполярный (униполярный) нанотранзистор, сигнал заданной формы, ряд Фурье, подсхема, иерархический блок, Фурье спектр, каскадное соединение счётчиков, дифференциальный (фотодиодный, фототранзисторный) детектор, свёртка оптических сигналов, коррелятор Ван дер Люгта, оптический образ, коррелятор совместного преобразования, область устойчивой работы схемы, триггер Шмитта, время задержки распространения сигналов, опасные состязания сигналов, метод граничных аналоговых сигналов.

Введение. Исследование электронных, нанoeлектронных, оптических и квантовых цепей на натуральных образцах является комплексной, дорогостоящей, времязатратной и наукоёмкой работой. Вместе с тем, высокие требования, предъявляемые в настоящее время к их надёжности и безотказности, делают актуальным проведение таких исследований с одновременным поиском методов их ускорения и удешевления. В этом отношении зарекомендовал себя эффективный приём проведения указанных исследований на натуральных образцах в сочетании с их реализацией на моделях в виртуальных экспериментах. При этом часть дорогостоящих натуральных экспериментов замещается виртуальными экспериментами.

Основное содержание данной статьи посвящено изучению организации виртуальных экспериментов на конкретных примерах схемных решений в электронных, нанoeлектронных, оптических и квантовых цепях.

Изложение основного материала. **Электронные и нанoeлектронные цепи.** **Нанотранзисторы в моделях на основе зависимых источников напряжения и тока.** Наиболее полное представление о характеристиках транзисторов любой степени интеграции дают их выходные вольтамперные характеристики (ВАХ): у униполярных (полевых) транзисторов – это семейство стоковых характеристик (рис. 1, а, рис. 1, б, рис. 1, в); у биполярных транзисторов – это семейство коллекторных характеристик в схеме с общим эмиттером (с общей базой) рис.1г. Анализ этих характеристик показывает, что униполярные транзисторы являются приборами, управляемыми входным напряжением $U_{зи}$, а биполярные транзисторы – приборами, управляемые входным током I_b (I_z). Именно это обстоятельство наложило наиболее общий отпечаток на выбор структуры моделей и на построение представленных далее моделей биполярных и униполярных нанотранзисторов соответственно.



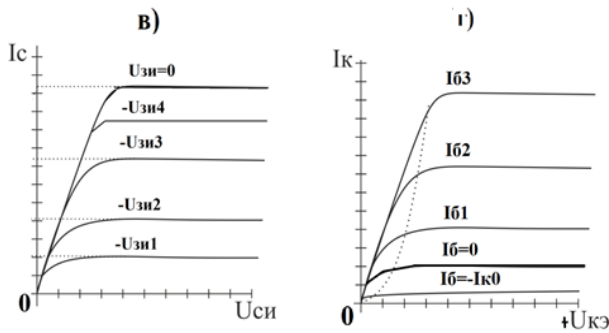


Рис. 1. Стоковые (выходные) ВАХ МДП транзистора со встроенным каналом N-типа (а), МДП транзистора с индуцированным каналом N-типа (б), полевого транзистора с управляющим p-n переходом и каналом N-типа (в); Коллекторные (выходные) ВАХ биполярного транзистора с p-n-p структурой, включённого по схеме с общим эмиттером (г)

Представленные далее компьютерные SPICE-модели биполярного рис. 2, рис. 3, рис. 4 и униполярного рис. 5, рис. 6, рис. 7 нанотранзисторов разработаны автором на основе теории четырехполюсников и построены в виде системы из двух взаимосвязанных четырехполюсников, нагруженных с двух сторон. Один из указанных четырехполюсников является усилителем на основе модели нанотранзистора, а второй – его звеном обратной связи.

Модель биполярного нанотранзистора в среде компьютерной программы NI Multisim

В биполярной модели нанотранзисторов рис. 2, рис. 3, рис. 4 первый четырехполюсник построен в h-параметрах, где I1-зависимый источник тока, управляемый с интенсивностью $[-h_{21}(A/A)]$ током, поступающим из внешней цепи $[V2, R_s]$ через входное сопротивление модели $R1(h_{11})$ собственно нанотранзистора; $V1$ – зависимый источник напряжения, управляемый напряжением внутренней обратной связи (ВОС) с интенсивностью $[-h_{12}(V/V)]$. Второй четырехполюсник является звеном обратной связи. Он выполнен в g-параметрах и содержит следующие элементы: зависимый источник напряжения $V1F$, управляемый с интенсивностью $[g_{21F}(V/V)]$; зависимый источник тока $I1F$, управляемый с интенсивностью $[g_{12F}(A/A)]$ током внутренней обратной связи (ВОС); $Z1F$ – входная проводимость звена ОС $[Z1F = 1/g_{11F}]$; $Z2F$ – выходное сопротивление звена ОС $[Z22F = g_{22F}]$.

Первый из указанных четырехполюсников схемы рис.2 описывается матричной системой уравнений (1), а второй (звено ОС) – системой уравнений (2):

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} I1F \\ U2F \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} g_{11F} & g_{12F} \\ g_{21F} & g_{22F} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U1F \\ I2F \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Модель звена обратной связи вводится в модель нанотранзистора для учета изменения его характеристик под действием локального прогрева, саморазогрева и электромагнитного взаимодействия с «соседями», находящимися на нано-расстояниях друг от друга в нано-масштабированном чипе. В этом же направлении работают и внутренние обратные связи, включенные в модель первого четырехполюсника.

Обобщенные h-параметры биполярной модели нанотранзистора H11, H12, H21, H22 с учётом звена ОС определяется соотношениями (3), (4), (5), (6).

$$H11 := h11 - g_{22}F, \quad (3)$$

$$H12 := h12 + g_{21}F, \quad (4)$$

$$H21 := h21 + g_{12}F, \quad (5)$$

$$H22 := h22 - g_{11}F, \quad (6)$$

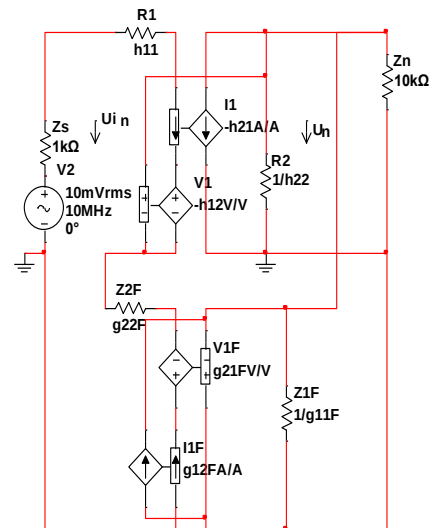


Рис. 2. Модель биполярного нанотранзистора с отрицательной обратной связью по напряжению между 4-х полюсниками

Системе уравнений (3), (4), (5), (6) соответствует модель биполярного нанотранзистора в компактном виде рис. 3.

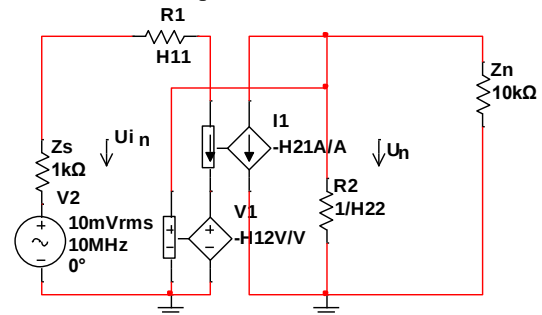


Рис. 3. Модель биполярного нанотранзистора в компактном виде

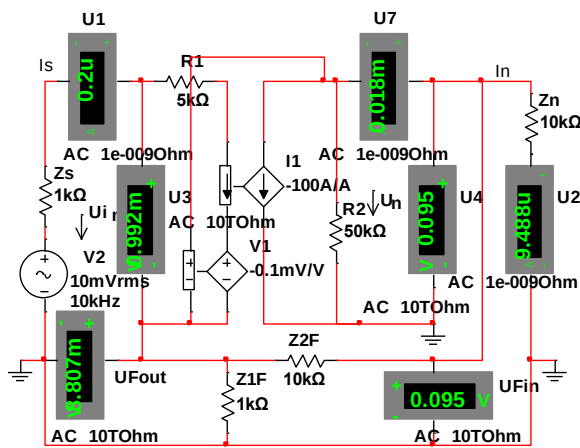


Рис. 4. Тестирование модели биполярного нанотранзистора

Пример тестирования модели биполярного нанотранзистора иллюстрирует рис.4, где в качестве звена ОС использован натуральный (резистивный) делитель напряжения Z1F = 1кОм; Z2F = 10 кОм. Результаты тестирования биполярного нанотранзистора:

$I_s = 0.2 \text{ uA (rms)}$; $I_n = 9.488 \text{ uA (rms)}$;
 $K_i = I_n / I_s = 9.488 \text{ uA (rms)} / 0.2 \text{ uA (rms)} = 47.44$;
 $K_i = 47.44$.

$U_n = I_n * Z_n = 9.488 \text{ uA (rms)} * 10000 \text{ (Ohm)} = 94.88 \text{ mV (rms)}$;

$K_u = U_n / V_2 = 94.88 \text{ mV (rms)} / 10 \text{ mV (rms)} = 9.488$; $K_u = 9.488$

Коэффициент усиления по току $K_i = 47.44$.

Коэффициент усиления по напряжению $K_u = 9.488$.

Модель униполярного нанотранзистора в среде компьютерной программы NI Multisim

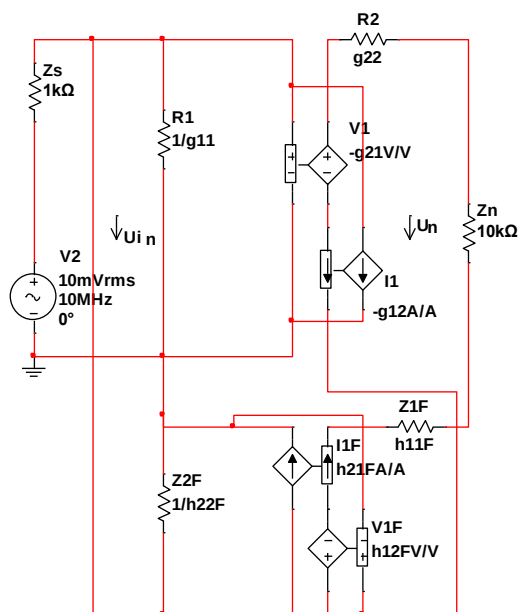


Рис. 5. Модель униполярного нанотранзистора с отрицательной обратной связью по току между 4-х полюсниками

Аналогично этому в униполярной модели нанотранзистора рис.5 имеем следующую систему матричных уравнений (7) и (8) для первого четырехполюсника и звена обратной связи соответственно.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} U_{1F} \\ I_{2F} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11F} & h_{12F} \\ h_{21F} & h_{22F} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{1F} \\ U_{2F} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Обобщенные g-параметры униполярной модели нанотранзистора рис.5 G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} с включенным в модель звеном ОС определяются соотношениями (9), (10), (11), (12).

$$G_{11} := g_{11} - h_{22F}, \quad (9)$$

$$G_{12} := g_{12} + h_{21F}, \quad (10)$$

$$G_{21} := g_{21} + h_{12F}, \quad (11)$$

$$G_{22} := g_{22} - h_{11F}, \quad (12)$$

В свою очередь система уравнений (9), (10), (11), (12) определяет модель униполярного нанотранзистора в компактном виде рис. 6.

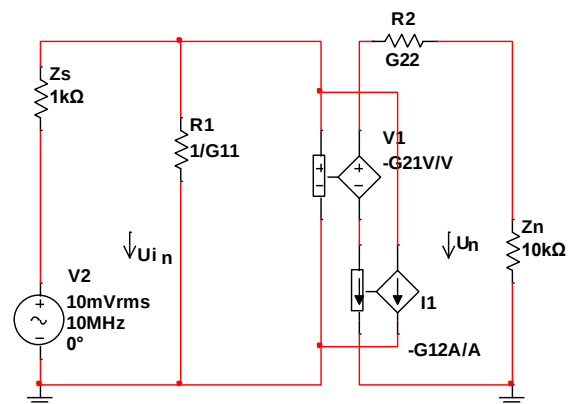


Рис. 6. Модель униполярного нанотранзистора в компактном виде

В процессе тестирования модели униполярного нанотранзистора рис.7 четырехполюсник звена ОС выполнен в виде натурального делителя тока Z1F = 1 кОм; Z2F = 9 кОм. Результаты тестирования униполярного транзистора:

$$U_n := I_n \cdot Z_n, \\ (K_u = 169.7), K_{iF} = 12.09, (K_i = 83.4) \\ K_{uF} = 169.2$$

Предложенные SPICE-модели биполярных и униполярных нанотранзисторов позволяют проводить виртуальные исследования характеристик и параметров наноустройств при их

работе в нагруженной электронной схеме при вариации параметров источников входных сигналов, сопротивления нагрузки, а также Н-, и G-параметров четырехполосников наномодели. При этом реализуется имитация поведения существующих или предполагаемых наномоделей, которая будет охарактеризована набором новых параметров и уравнений, в совокупности определяющих некоторые неизвестные множества значений или функций, характеризующих работоспособность биполярных и униполярных нанотранзисторов.

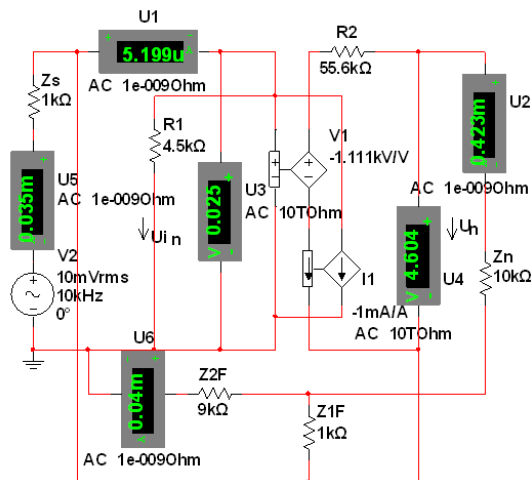


Рис. 7. Тестирование модели униполярного нанотранзистора

Моделирование цепей, выполняющих сопряжение между аналоговыми и цифровыми цепями

Наиболее востребованными элементами сопряжения в аналого-цифровых системах являются ЦАП и АЦП преобразователи, осуществляющие цифро-аналоговые и аналого-цифровое преобразование сигналов, а также однобитные разновидности АЦП – аналоговые компараторы (АК) и их гистерезисные разновидности – триггеры Шмитта (ТШ).

При построении моделей электронных схем с участием аналоговых компараторов, АК, представленный в виде подсхемы рис.1 (а), работает точно также, как и его принципиальная электрическая схема рис. 1 (б). Более того, использование подсхем уменьшает время на построение моделей и экономит место на рабочем листе проекта.

На рис. 4 представлено нетрадиционное использование триггеров Шмитта для формирования эталонных импульсных последовательностей, привязанных по времени к моментам естественной коммутации (МЕК) клапанов. Импульсные последовательности сигналов рис. 4 (б) генерируют триггеры Шмитта U1A, U1C и U3A в моменты равенства положительных полуволн следующих

синусоидальных напряжений $V1=V5$; $V1=V3$ и $V3=V5$, соответственно, где $V1=5\sin\omega t$; $V3=5\sin(\omega t-120^\circ)$; $V5=5\sin(\omega t+120^\circ)$.

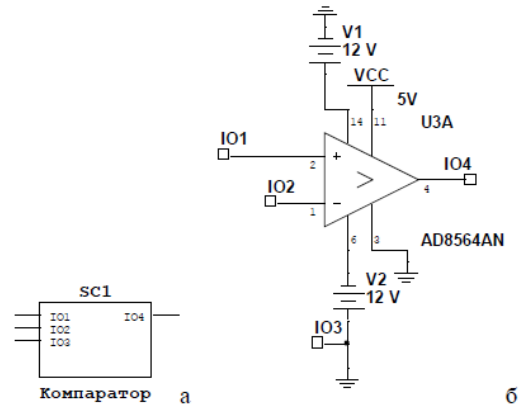


Рис. 1. Подсхема аналогового компаратора (а) и его принципиальная схема включения (б)

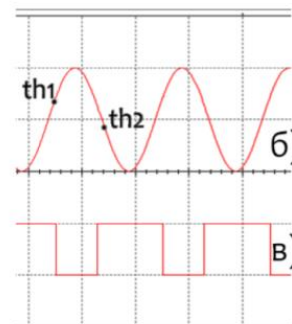
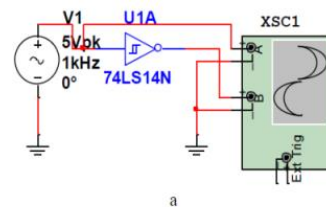


Рис. 2. Схема преобразователя (а) синусоидальных сигналов в прямоугольные импульсные сигналы и осциллограммы исходного (б) и преобразованного (в) сигнала с помощью триггера Шмитта

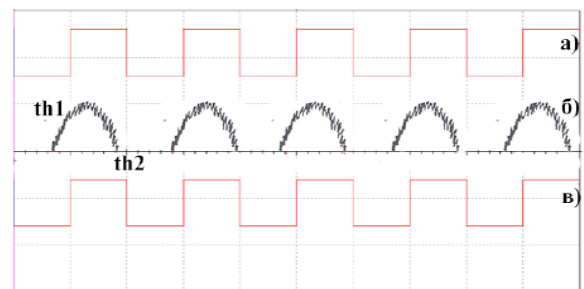


Рис. 3. Исходные импульсные сигналы на стороне передатчика (а), сигналы на выходе линии связи (б) и сигналы на выходе ТШ в приемнике (в)

заключенной внутри области, ограниченной двумя эталонными граничными сигнатурами.

Здесь, под рабочей аналоговой сигатурой ИС, подразумевается ее графический (осциллографический) образ, развернутых во времени процессов, характеризующих работоспособность схемы в условиях сжатия информации.

Моделирование аналоговых сигатур ТТЛ триггеров Шмитта

В данном разделе представлены схемы включения КМОП и ТТЛ триггеров Шмитта для формирования аналоговых сигатур в случае нерегулируемых параметров переключения 2V, 5V, 10V и 15V вольтных ТШ.

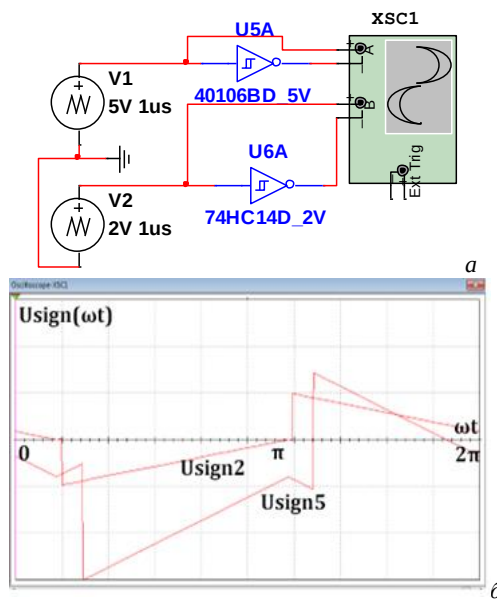


Рис.1. Схема включения ТШ при формировании АС (а) и аналоговые сигнатуры (б) ИС КМОП ТШ 40106BD_5V (Usign5) и 74HC14D_2V (Usign2). Развертка 100ns/Div; вертикаль 2V/Div. Ypos = -0.8 Div для Usign5

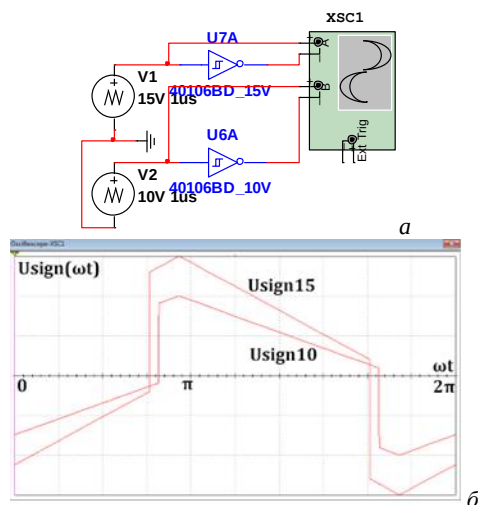


Рис. 2. Схема (а) и сформированные ею АС (б) КМОП ТШ 40106BD_15V(Usign15) и 40106BD_10V(Usign10). Развертка 100 ns/Div, вертикаль 5V/Div

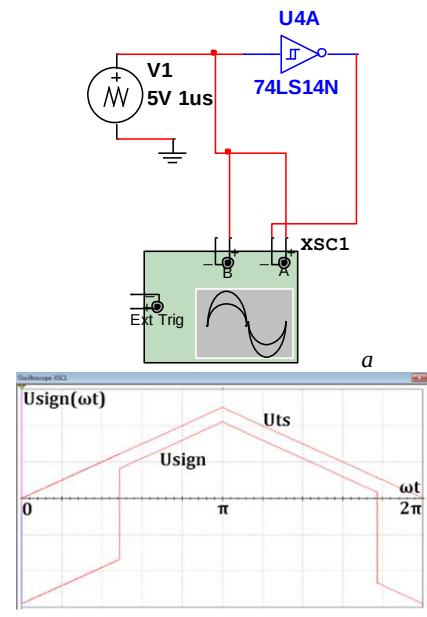


Рис. 3. Схема (а) и сформированная данной схемой АС (б) ТТЛ ТШ 74LS14N (Usign). Развертка 100ns/Div, вертикаль 2V/Div; Ypos= - 0.4Div

Далее представлены схемы, формирующие аналоговые сигнатуры с использованием аналоговых компараторов (рис. 4) при регулируемых параметрах переключения, а также даны граничные аналоговые сигнатуры, окаляющие образ работоспособной схемы по разным признакам (рис. 5).

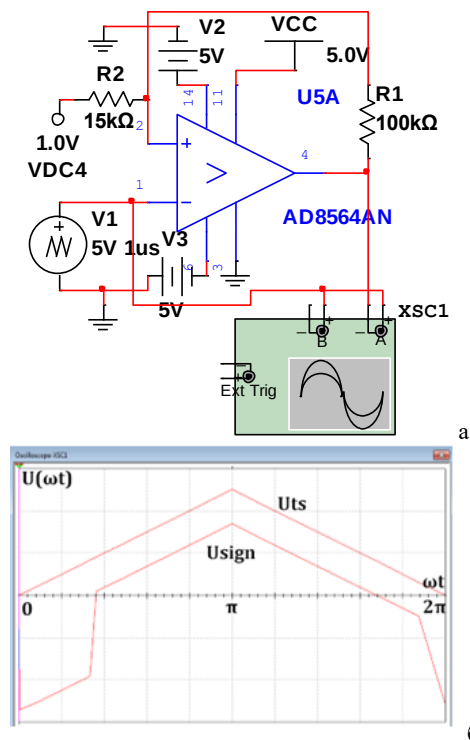


Рис. 4. Схема (а) ТШ на основе аналогового компаратора напряжения AD8564AN и его АС (б). Развертка 100ns/Div; вертикаль 2V/Div; Ypos= - 0.4 Div (канал А)

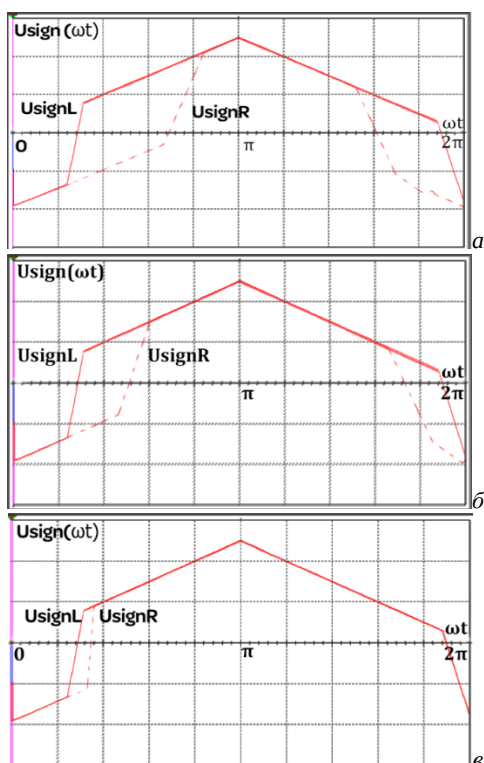


Рис. 5. Граничные аналоговые сигнатуры UsignL (сплошная линия) и UsignR (пунктир) формируют образ работоспособной регулируемой ИС ТШ, построенной на основе ИКН AD8564AN по признаку нахождения АС в заданном диапазоне регулирования (а), по признаку расположения АС в заданном поддиапазоне (б) и по признаку расположения АС в пределах поля допуска относительно образцовой АС в данной регулируемой позиции (в). Развертка 100 ns/Div; вертикаль 2V/Div; Xpos=0; Ypos=0

В схемах триггеров Шмитта с регулируемыми параметрами получены граничные аналоговые сигнатуры UsignR и UsignL, ограничивающие рабочую область исправной схемы ТШ.

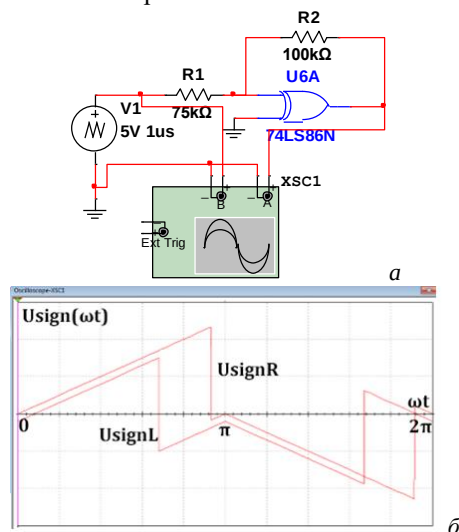


Рис.6. Схема (а) регулируемого ТШ, его граничные АС (б), окаймляющие рабочую область в заданном диапазоне регулирования. Развертка 100 ns/Div; вертикаль 2V/Div; Xpos=0; Ypos= -0.2Div (UsignL)

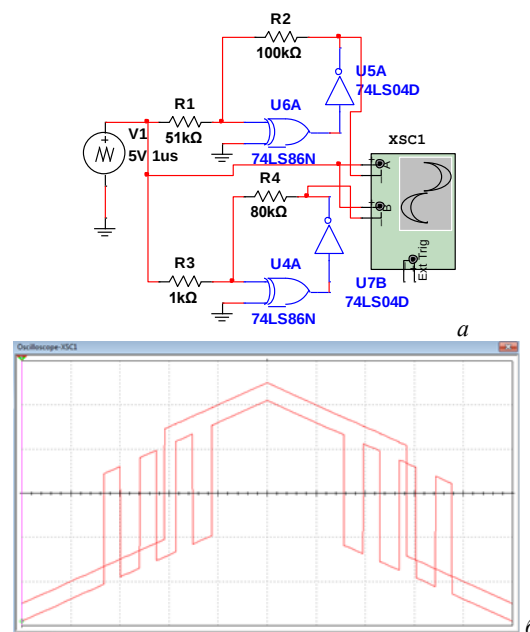


Рис. 7. Схема (а) включения 2-х регулируемых ТШ на основе ТТЛ «Логическая равнозначность» для формирования их АС и отображения указанных АС (б). Развертка 100ns/Div; вертикаль 2V/Div; Xpos=0; Ypos= -0.4Div (Канал А); Ypos=0 (Канал Б)

Моделирование регулируемых выпрямителей на SCR-тиристорах в среде КИП NI Multisim

Здесь выполнено моделирование основных типов однофазных и трёхфазных выпрямителей на основе SCR-тиристоров. Предложено оригинальное, не имеющее аналогов, шестиканальное устройство для регистрации моментов естественной коммутации (МЕК) вентилях путём формирования шести последовательностей импульсных сигналов с использованием триггеров Шмитта. ТШ в моменты равенства нулю разности напряжений в смежных коммутируемых фазах выпрямителя формируют короткие импульсные сигналы, которые предложено использовать в системе управления регулируемых выпрямителей на основе SCR-тиристоров. Это устройство может быть использовано для оценки асимметрии напряжений в трехфазной системе, а также для ускорения восстановления нормальных режимов работы выпрямителей после бросков, провалов и других аномалий в питающей сети. Это устройство может найти также применение для упрощения процесса оцифровки величины рассогласования между координатами моментов естественной коммутации в эталонной и реальной схеме при построении следящей системы регулирования.

Подробные подрисовочные надписи представляемым здесь рисункам рис. 1, рис. 2, ..., рис. 7, а также модели выпрямителей с использованием библиотечных элементов системы NI Multisim, позволяют проводить виртуальные эксперименты с различного рода выпрямителями и получать данные, близкие к экспериментам на

основе реальных однофазных и трёхфазных выпрямительных схем.

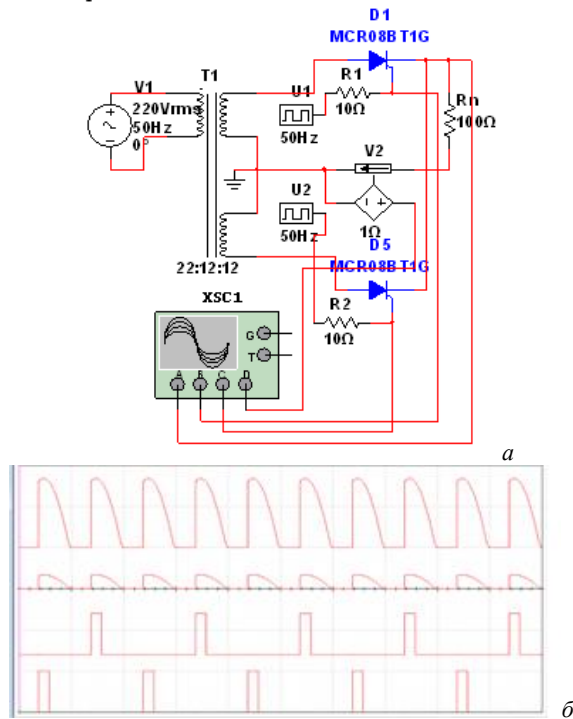


Рис. 1. Модель регулируемого однофазного выпрямителя с нулевым выводом и его схемы управления (а), осциллограммы (б) сверху-вниз: напряжение на нагрузке, ток нагрузки, импульсы управления тиристорами D1 и D2, соответственно. Масштабирование осциллограмм: Развёртка 10ms/Div, вертикаль 5V/Div

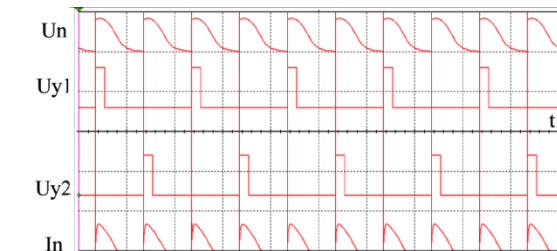


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на нагрузке U_n импульсов управления U_{y1} , U_{y2} и тока нагрузки I_n при $R_n = 51$ Ом, $L1 = 9$ мГн и фильтрующей ёмкости $C1 = 33$ мкФ

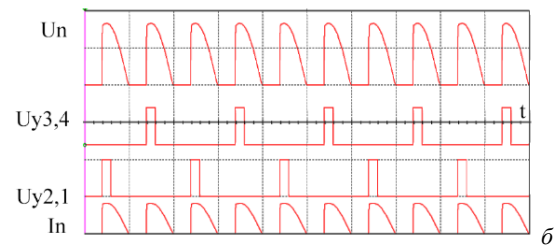
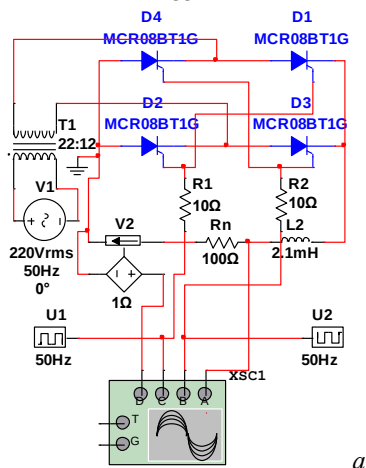


Рис. 3. Модель однофазного мостового регулируемого выпрямителя, нагруженного на R, L нагрузку ($R_n = 100$ (Ом), $L2 = 2.1$ мГн) (а) и осциллограммы напряжения на нагрузке U_n , а также осциллограммы импульсов управления $U_{y3,4}$, $U_{y2,1}$ и тока нагрузки I_n (б)

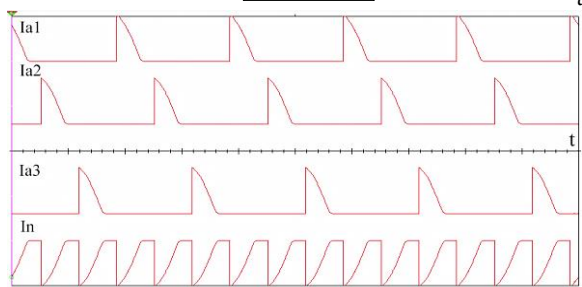
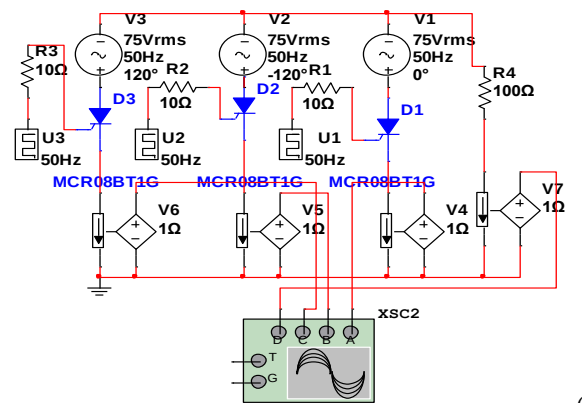


Рис. 4. Модель трехфазного регулируемого выпрямителя с 0-выводом (а), осциллограммы тока нагрузки I_n и токов анода тиристоров D1, D2, D3 (I_{a1} , I_{a2} , I_{a3}) при работе схемы на чисто активную нагрузку (б)

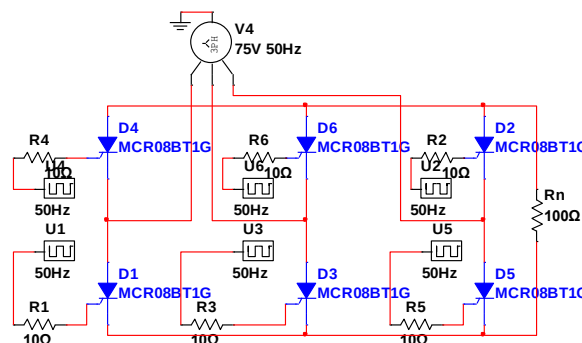


Рис. 5. Модель трехфазного регулируемого мостового выпрямителя

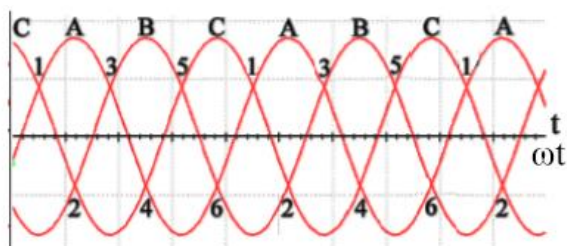


Рис. 6. Трехфазная система напряжений

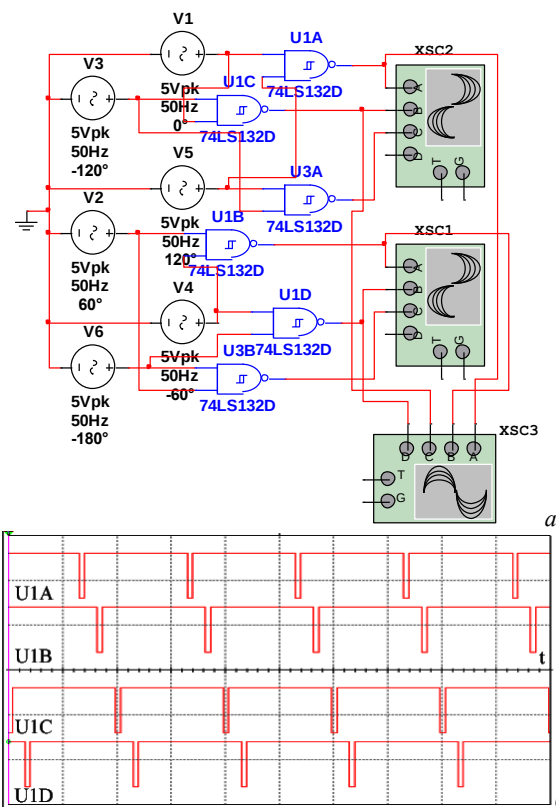


Рис. 7. Модель 6-ти канальной схемы формирования импульсных сигналов, привязанных к МЕК тиристоров 3-х фазного мостового регулируемого выпрямителя (а), и осциллограммы сигналов на выходах триггеров Шмитта U1A, U1B, U1C, U1D (б)

Моделирование аналого-цифрового преобразователя на основе дифференциальных компараторов и приоритетного шифратора

В схеме рис. 1 показано включение n дифференциальных аналоговых компараторов U5A, U5B, U5C, U5D, U6A, U6B, U6C типа AD8564AN (здесь $n=7$) и приоритетного шифратора (кодера) U7 типа 74LS148N для выполнения преобразования аналоговой величины контролируемого напряжения источника V4 в 3-х разрядный двоичный цифровой код на выходах A2, A1, A0 шифратора U7. Схема рис.1 и отдельные ее блоки работают следующим образом.

Компараторы U5A,...,U5D, U6A,...,U6C представляют собой электронные схемы, способные анализировать величину двух входных сигналов и формировать выходные сигналы, указывающие на то, является ли один из входных уровней (к

примеру, на прямом выходе) большим, равным или меньшим другого (на инверсном входе). В случае, когда величина сигнала на прямом входе становится большей или равной уровню сигнала на инверсном входе, выход компаратора переключается из «0» в «1» состояние.

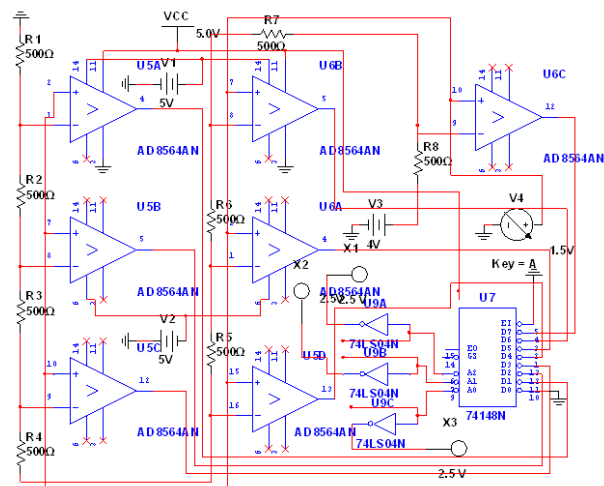


Рис. 1. ANSI АЦП на ТТЛ Шифраторе 74LS148N и Компараторах AD8564AN

Шифратор U7 – электронное устройство вырабатывающее на своих выходах m -разрядное двоичное слово в зависимости от того, на каком из $2m$ его входов присутствует «1» сигнал. В анализируемой схеме рис.1 логическая «1» может присутствовать одновременно на нескольких входах D7, D6,...,D0 шифратора U7, поэтому здесь применен приоритетный шифратор, для которого приоритетным является «1» сигнал в старшем в разряде его входного слова и он работает в соответствии с таблицей 1 истинности (табл. 1), где E1 – вход разрешения E0 – выход разрешения D7, D6,..., D0 – информационные сигналы с выходов линейки компараторов U5A,..., U5D, U6A,..., U6C. A2, A1, A0 – трехразрядный двоичный выход шифратора U7. Gs – выбор кристалла при каскадном соединении.

ВХОДЫ										ВЫХОДЫ				
E1	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7		A2	A1	A0	Gs	E0
1	X	X	X	X	X	X	X	X		Z	Z	Z	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1		Z	Z	Z	1	0
0	X	X	X	X	X	X	X	0		0	0	0	0	1
0	X	X	X	X	X	X	0	1		0	0	1	0	1
0	X	X	X	X	X	0	1	1		0	1	0	0	1
0	X	X	X	X	0	1	1	1		1	0	0	0	1
0	X	X	X	0	1	1	1	1		1	0	1	0	1
0	X	X	0	1	1	1	1	1		1	1	0	0	1
0	X	0	1	1	1	1	1	1		1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	0	1

Резистивный делитель напряжения R1, R2,..., R7, R8 совместно с источником опорного напряжения V3=4В формирует на своих отпаях

пороговые напряжения срабатывания компараторов $U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дк}, \dots, U_{д7}$ (где $k \in (1, 2, \dots, 7)$, изменяющееся с одинаковым шагом Δ в соответствии с соотношением (1):

$$U_{дк} = V_{3k/n}, \quad (1)$$

где k – номер отпая (совпадает с номером резистора, подключенного к данному отпаю делителя). Каждый отпай делителя подключен к инвертирующему входу соответствующего компаратора.

Одновременно с этим на прямые (неинвертирующие) входы всех компараторов поступает напряжение от датчика V_4 контролируемого параметра. При этом каждый компаратор сравнивает напряжения на его инверсном и прямом входах и там, где реализуется неравенство (2) k -ый компаратор переключается из «0» в «1» состояние.

$$U_4 \geq U_{дк}, \quad (2)$$

где U_4 – напряжение на зажимах контролируемого источника V_4 .

В результате указанного сравнения на выходах компараторов формируется вектор – строка (string-строка) в виде цепочки двоичных сигналов «1» и «0», представляющая собой унитарный двоичный код величины контролируемого параметра U_4 . К примеру, когда $U_4 = 2.57 \text{ V}$, при шаге Δ резистивного делителя напряжения, равном $\Delta = \frac{V_{ref}}{n} = \frac{V_3}{n} = \frac{4}{7} = 0.571 \text{ V}$, на выходах линейки компараторов будет сформирован унитарный код {0001111}, так как $2.57 \text{ V} < \{2.855 \text{ V}(U_{д5}), \dots, 4 \text{ V}(U_{д7})\}$ и $2.57 \text{ V} > \{0.571 \text{ V}(U_{д1}), \dots, 2.284 \text{ V}(U_{д4})\}$.

Этот унитарный код (string-строка) поступает на инверсные входы {D7, D6, ..., D1, D0} шифратора U_7 , который реализует двоичное кодирование string-строки. При этом на инверсных выходах A2, A1, A0 кодера U_7 типа 74LS148N в соответствии с его таблицей 1 истинности формируется двоичный цифровой код величины контролируемого параметра U_4 на момент выполнения измерения. Во время преобразования унитарного кода в двоичный цифровой код (binary code) устанавливается код, соответствующий номеру активированного входа шифратора с наиболее высоким приоритетом.

Заметим, что результаты кодирования в шифраторе выполняется в виде двоичного слова длиной m битов в зависимости от того, на каком из его $2m$ входов присутствуют логические «1». Для наращивания разрядности шифраторов выполняется их каскадное соединение с использованием входов разрешения EI и выходов разрешения EO.

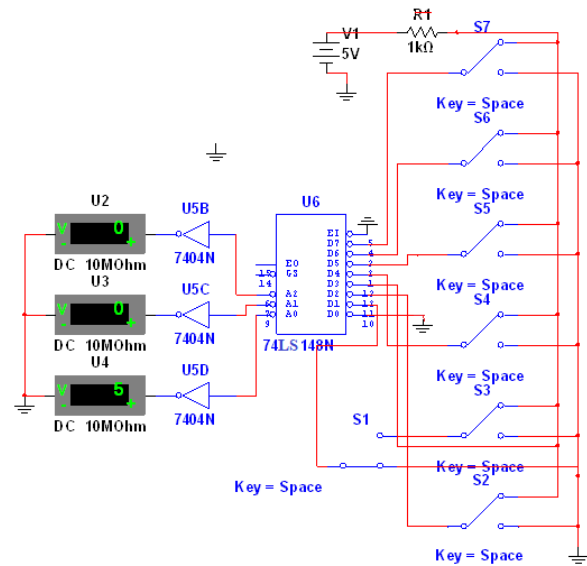


Рис. 2. Изучение TTL Шифратора 74LS148N 8Line to 3line в ANSI стандарте

На рис. 2 приведена схема, позволяющая изучить в виртуальном эксперименте работу приоритетного шифратора 74LS148N в режиме преобразования (кодирования) унитарного кода задаваемого переключателями $S_1, S_2, \dots, S_7$ в 3-х разрядный двоичный код (binary code) с представлением этого кода на его выходах A2, A1, A0.

Задание 1

1. На практическом (лабораторном) занятии в среде КИП NI Multisim постройте схему рис.2.

2. С помощью коммутации ключей $S_1, S_2, \dots, S_7$ подайте комбинации «0» и «1» сигналов, предусмотренные табл. 1 истинности и зафиксируйте показания вольтметров U_2, U_3, U_4 , подключенных к выходам шифратора через инверторы U_5B, U_5C, U_5D . Сравните полученные результаты с представленной выше таблицей 1 истинности. Сделайте выводы.

На рис. 3 представлена схема включения шифратора 74LS147D для исследования его работы в виртуальном эксперименте. Шифратор U_6 в схеме рис.3 осуществляет преобразование унитарного кода, задаваемого ключами $S_1, S_2, \dots, S_7$, в двоично-десятичный код (BCD-код: Binary coded decimal). BCD-код – это код, в котором десятичный знак представлен в виде строки двоичных знаков в системе натуральных двоично-десятичных чисел каждый десятичный знак 0, ..., 9 представляется строкой из 4-х битов, двоичные значения которых эквивалентны десятичному знаку. К примеру, цифре 5 соответствует код 0101, а цифре 9 – 1001. Код, применяемый в системе натуральных двоично-десятичных чисел называют кодом 8421. В нем взвешенная сумма битов кодового слова равна закодированному двоичному знаку.

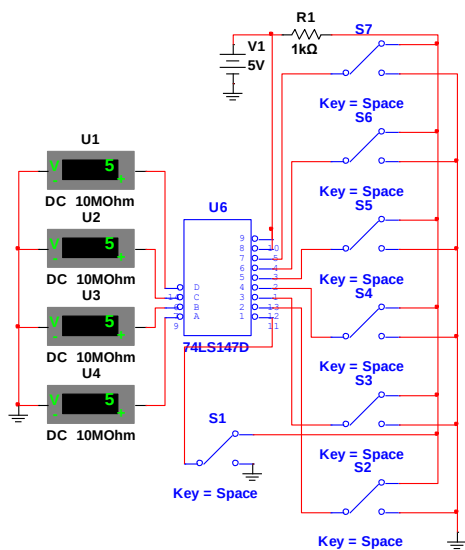


Рис. 3. Излучение ТТЛ шифратора 74LS147D, представленного в ANSI стандарте

Задание 2

1. Постройте схему рис. 3, используя КП NI Multisim.

2. Изменяя входные комбинации сигналов унитарного кода с помощью ключей S1, S2, ..., S7 с одновременной фиксацией показаний измерительных приборов U1, U2, U3, U4, создайте таблицу истинности анализируемого шифратора. Сделайте выводы. Примечание: Показания $U_K=5V$ приборов U1, U2, U3, U4 соответствуют «1» логическому сигналу. А $U_K=0V$ – логическому уровню «0», где $K \in \{1, 2, 3, 4\}$.

Моделирование сигналов заданной формы на основе уравнений их разложения в ряд Фурье, иерархических блоков, подсхем компараторов, сумматоров и др.

Моделирование пилообразных и прямоугольных сигналов с использованием подсхем, уравнений разложения в ряд Фурье, компараторов и сумматоров

На рис. 1 приведена подсхема SC1 ТТЛ-компаратора AD8564AN (а), сформированная на основе его электрической схемы (б). При моделировании в среде КП NI Multisim оба устройства (электрическая схема и подсхема) выполняют одни и те же функции. Их подключение к другим устройствам осуществляется через выводы IO1, IO2, IO3, IO4, назначение которых взаимно соответствует друг другу в электрической схеме и её подсхеме соответственно.

В схеме рис. 2 источники синусоидального напряжения V1, V2, V3, V4, V5, V6 моделируют гармонические составляющие разложения сигнала в тригонометрический ряд Фурье, а источник постоянного напряжения V7 – его постоянную составляющую. Совместно со схемой на основе ОУ U1A данная схема в целом представляет собой неинвертирующий сумматор входных сигналов V1, ..., V7.

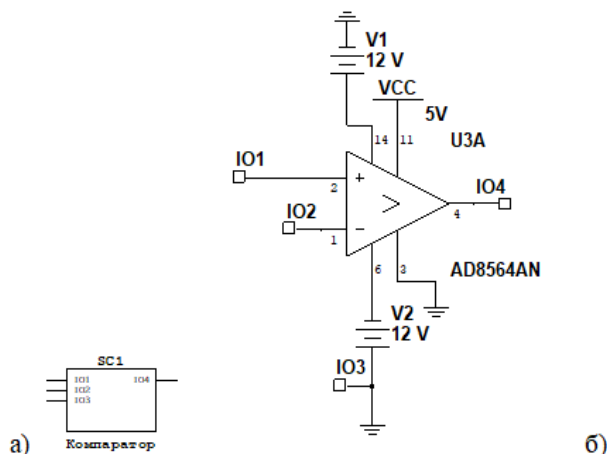


Рис. 1 Подсхема компаратора (а) и его электрическая схема (б)

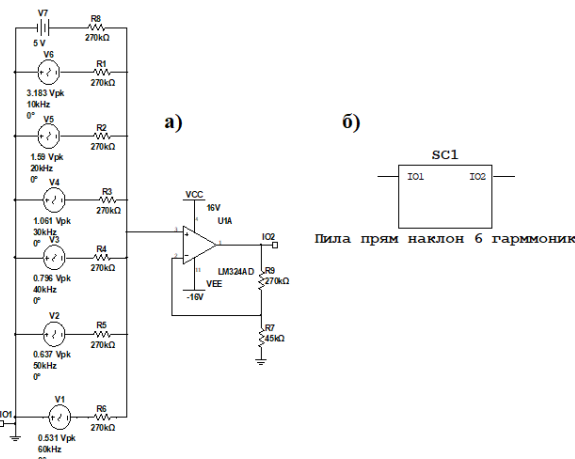


Рис. 2. Электрическая схема, реализующая пилообразный сигнал с прямым наклоном на основе 6 – ти первых гармоник разложения в ряд Фурье и её подсхема (б)

Схема сумматора рис. 2 строится с числом параллельных ветвей на прямом входе ОУ, равным числу гармоник, предназначенных для суммирования при моделировании сигнала заданной формы. Сопротивления резисторов во входной цепи принимают одинаковыми:

$$\begin{aligned} R_9 &= R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \\ R_5 &= R_6 = R_8 \ll R_{vx} \text{ ОУ}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_9 = R_{oc}$ – сопротивление обратной связи на инверсном входе ОУ; $R_{vx} \text{ ОУ}$ – входное сопротивление ОУ.

При выполнении соотношения (1) реализуется одинаковое весовое участие слагаемых в их сумме в соответствии с соотношением (2):

$$U_{вых} (wt) = [(R_7 + R_{oc}) / nR_7] (V_1 + V_2 + \dots + V_n), \quad (2)$$

где n – число параллельных ветвей на прямом входе ОУ, $U_{вых} (wt)$ – сформированный на выходе IO2 ОУ сигнал заданной формы, R_7 – сопротивление в

делителя R_{oc} , R_7 при инвертирующем входе ОУ $U1A$. Выбор параметров схемы рис.2 осуществляют исходя из равенства единице первого сомножителя в правой части выражения (2), то есть

$$[(R_7 + R_{oc}) / nR_7] = 1. \quad (3)$$

В соответствии с соотношением (3) величину сопротивления резистора R_7 в цепи делителя рассчитывают по формуле (4):

$$R_7 = R_{oc} / (n - 1). \quad (4)$$

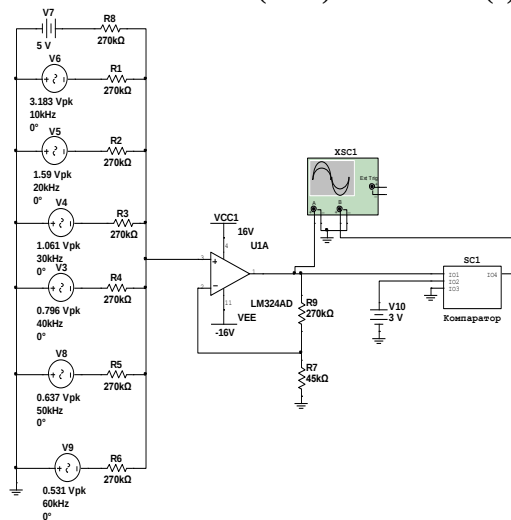


Рис. 3. Подключение выхода схемы сумматора на ОУ $U1A$, формирующего пилу с прямым наклоном, ко входу $IO1$ подсхемы компаратора $SC1$, а 2-ой вход которого $IO2$ подано постоянное напряжение $V10=3B$ с последующим его ступенчатым переключением $V10=6B$ и $V10=9B$

Электронные схемы, смоделированные в среде КП NI Multisim в виде иерархических блоков, подсхем или принципиальных электрических схем, успешно сосуществуют в едином компьютерном документе, обеспечивая работоспособность как схемы в целом, так и отдельных её блоков. При этом виртуальные измерительные приборы выполняют измерения без потери точности при их подключении к выводам моделей принципиальных электронных схем, иерархических блоков, либо подсхем. Пример подобного сосуществования представлен на рис. 3, где приведена схема, содержащая в одном техническом решении модель электрической схемы формирователя пилообразного напряжения на основе неинвертирующего сумматора 6-ти первых гармоник разложения в ряд Фурье на ОУ $U1A$ и модель подсхемы $SC1$ дифференциального компаратора, выходы которых подключены ко входам виртуального осциллографа $XSC1$, отображающего осциллограммы сигналов (рис. 4, а, б, в): напряжения на выходе ОУ $U1A$ и на выходе подсхемы $SC1$ соответственно. Побочный результат: обнаружен способ управления длительностью импульсов и паузы сигналов на выходе $IO4$ подсхемы $SC1$ посредством изменения

величины напряжения источника $V10$ в схеме рис. 3 (см. осциллограммы рис. 4 (а), (б), (в)) сигналов на выходе подсхемы $SC1$ при $V10=3B$; $V10=6B$; $V10=9B$). Иными словами, схема рис.3 наряду с формированием сигналов заданной формы (треугольных сигналов) на выходе сумматора осуществляет одновременно ещё и формирование на выходе подсхемы компаратора прямоугольных импульсов с регулируемой длительностью импульсов и паузы.

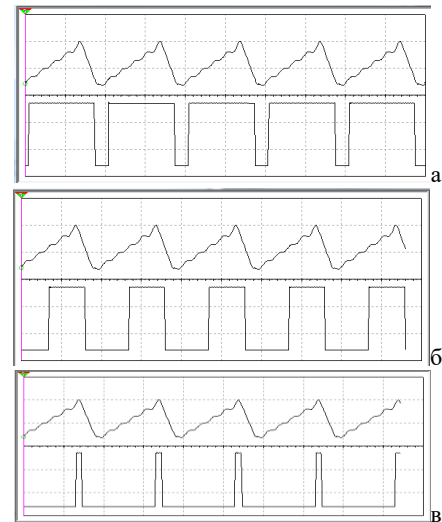


Рис. 4. Осциллограммы сигналов на выходе схемы сумматора (верхняя осциллограмма) и на выходе подсхемы компаратора (нижняя осциллограмма) при $V10=3B$ (Рис.4.а); при $V10=6B$ (Рис.4.б); при $V10=9B$ (рис. 4.в). Масштабирование осциллограмм рис.4.а, рис.4.б и рис.4.в : развёртка $50\mu s/Div$, вертикаль $5V/Div$ (канал А) и (канал В)

Моделирование схем, формирующих сигналы заданной формы с использованием компьютерных программ NI Multisim, MathCAD и MathLAB. Иерархические блоки и др..

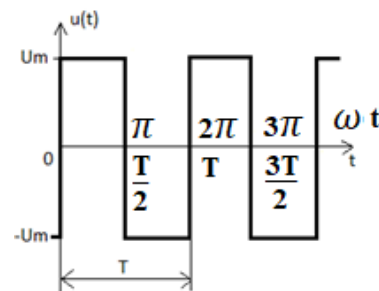


Рис. 1. Представленный к моделированию сигнал, заданной формы

Моделируемый сигнал рис. 1 в среде КП MathCAD (MathLAB) в координатах ωt и t может быть представлен моделирующими соотношениями (1) и (2), где использование правила ELSE (else rule) при написании соотношений позволяет учесть все возможные комбинации решений:

```

u(ωt):= if (ωt ≥ 0)^(ωt < π)
|| return Um
else if (ωt ≥ π)^(ωt < 2π) , (1)
|| return -Um
else
|| return 0
u(t):= if (t ≥ 0)^(t < T/2)
|| return Um
else if (t ≥ T/2)^(t < T) , (2)
|| return -Um
else
|| return 0

```

Здесь использование правила Else (Else Rule) при написании соотношений позволяет учесть все возможные комбинации решений.

Рассмотрение моделирования меандра рис. 1 на основе его разложения в ряд Фурье выполним на конкретном примере его построения при $U_m = 1V_{pk}$, $\omega = 2\pi f$, $f = 10KHz$.

Разложение сигнала рис.1 в ряд Фурье общего вида описывается соотношением (3):

$$u(t) = \left(\frac{4U_m}{\pi}\right) \left[\sin \omega t + \left(\frac{1}{3}\right) \sin 3\omega t + \left(\frac{1}{5}\right) \sin 5\omega t + \left(\frac{1}{7}\right) \sin 7\omega t + \dots \left(\frac{1}{k}\right) \sin k\omega t \right] + \dots \quad (3)$$

Подставляя $U_m = 1V_{pk}$ для 12-ти первых гармоник, имеем:

$$u(t) = 1,273V_{pk} \sin \omega t + 0,425V_{pk} \sin 3\omega t + 0,255V_{pk} \sin 5\omega t + 0,182V_{pk} \sin 7\omega t + 0,142V_{pk} \sin 9\omega t + 0,116V_{pk} \sin 11\omega t + 0,098V_{pk} \sin 13\omega t + 0,085V_{pk} \sin 15\omega t + 0,075V_{pk} \sin 17\omega t + 0,067V_{pk} \sin 19\omega t + 0,061V_{pk} \sin 21\omega t + 0,055V_{pk} \sin 23\omega t, \quad (4)$$

Уравнению (4) соответствует электрическая схема рис. 2, (а) иерархического блока на 12 гармоник.

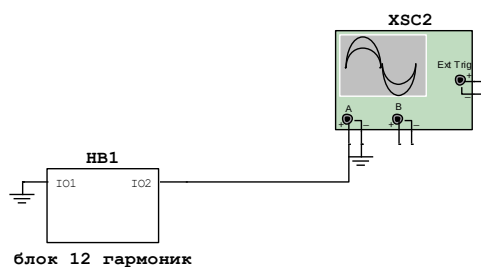
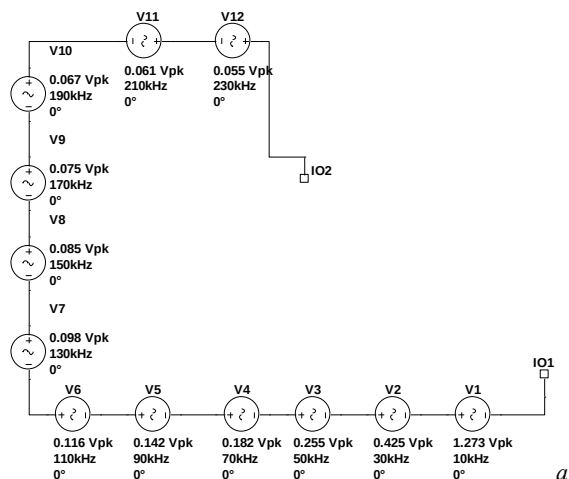


Рис. 2 Электрическая схема иерархического блока (а), соответствующая уравнению (4) разложения сигнала рис. 1 в тригонометрический ряд Фурье (12 первых гармоник), и собственно иерархический блок HB1, подключённый к каналу А осциллографа XSC2 (б)

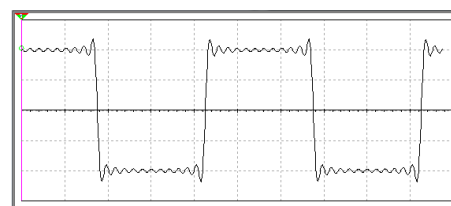


Рис. 3. Осциллограмма сигналов на выходе иерархического блока HB1 рис. 2 (б). Масштабирование осциллограмм: развёртка 20us/Div, вертикаль 500mV/Div

При построении схем, генерирующих сигналы заданной формы, применяют иерархические блоки с контактным доступом к заданному числу первых гармоник разложения в ряд Фурье и блоки их суммирования на основе операционных усилителей. На рис. 4, (а) представлена электрическая схема иерархического блока HB1 двенадцати первых гармоник разложения меандра рис. 1 в ряд Фурье, а на рис. 4, (б) – собственно этот блок.

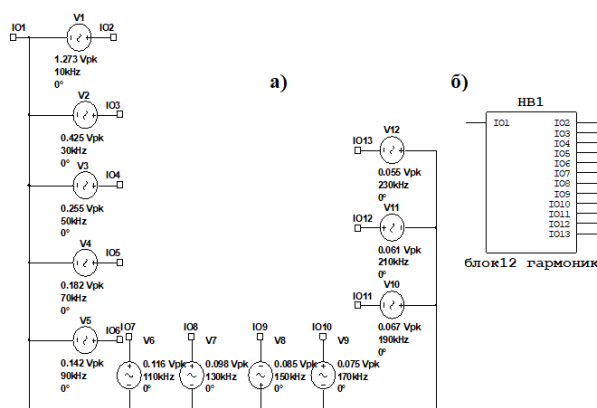


Рис. 4. Электрическая схема (а) и иерархический блок (б) 12-ти первых гармоник разложения в ряд Фурье моделируемого меандра

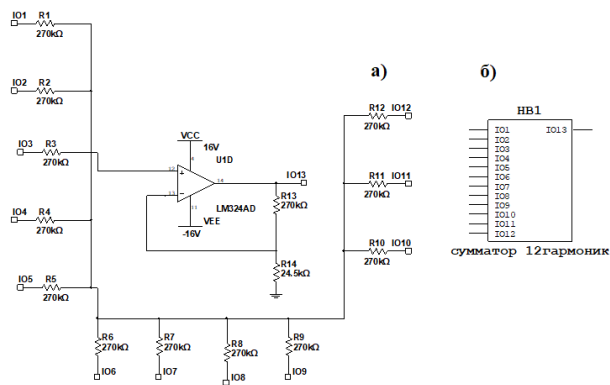


Рис. 5. Электрическая схема иерархического блока сумматора с 12-тью информационными входами (а) и иерархический блок сумматора 12 гармоник (б)

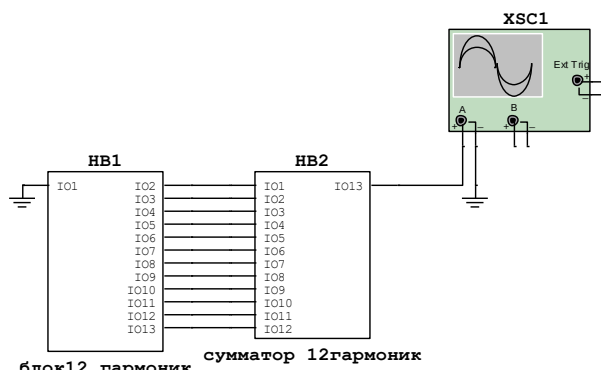


Рис. 6. Схема, формирующая анализируемые сигналы на основе 2-ух иерархических блоков: HB1 (блок 12 гармоник) и HB2 сумматор 12 гармоник

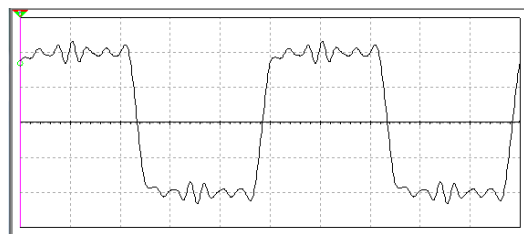


Рис. 7. Осциллограмма сигналов, сформированная схемой рис.6 на основе двух иерархических блоков. Масштабирование осциллограмм: развёртка 20us/Div, вертикаль 500mV/Div

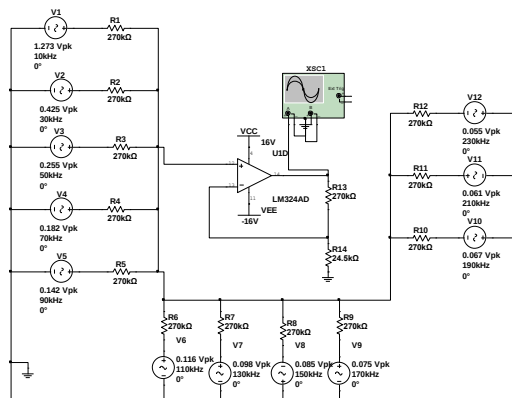


Рис. 8. Электрическая схема, формирующая заданный сигнал (меандр) посредством суммирования 12-ти первых гармоник ряда Фурье неинвертирующим сумматором на основе операционного усилителя U1D

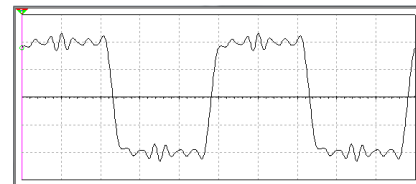


Рис. 9 Осциллограмма заданного сигнала (меандра), сформированного схемой рис.8. Масштабирование осциллограмм: развёртка 20us/Div, вертикаль 500mV/Div.

Задание 1 для самостоятельного решения

На рис. 10 представлен сигнал, который должен быть построен (смоделирован) в соответствии с представленной далее программой. Исходными данными к построению сигнала является уравнение (5) разложения сигнала рис.10 в тригонометрический ряд Фурье.

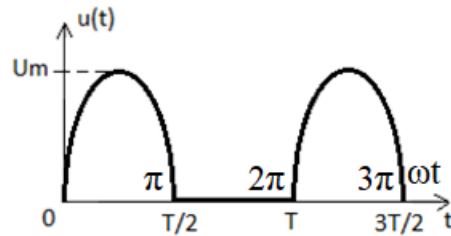


Рис. 10. Представленный к моделированию сигнал, заданной формы

$$u(t) = 2/\pi \cdot U_m \left(1/2 + \pi/4 \sin(\omega t) - 1/3 \sin(2\omega t + 90^\circ) - 1/15 \sin(4\omega t + 90^\circ) - 1/35 \sin(6\omega t + 90^\circ) - 1/63 \sin(8\omega t + 90^\circ) - 1/99 \sin(10\omega t + 90^\circ) - 1/43 \sin(12\omega t + 90^\circ) - 1/43 \sin(12\omega t + 90^\circ) - 1/195 \sin(14\omega t + 90^\circ) - 1/255 \sin(16\omega t + 90^\circ) - 1/323 \sin(18\omega t + 90^\circ) - 1/399 \sin(20\omega t + 90^\circ) - 1/483 \sin(22\omega t + 90^\circ) \right), \quad (5)$$

При анализе задания 1 с сигналом рис.10 можно будет ограничиться выполнением 4-х первых пунктов программы, а при выполнении пункта 5 предлагаем воспользоваться уравнениями (6) и (7) следующего вида:

$$u(\omega t) := \begin{cases} \text{if } (\omega t \geq 0) \wedge (\omega t < \pi) \\ \text{ll return } U_m \cdot \sin(\omega t) \end{cases}, \quad (6) \quad \begin{cases} \text{if } (t \geq 0) \wedge (t < T/2) \\ \text{ll return } U_m \cdot \sin(\omega t) \end{cases}, \quad (7)$$

Программа выполнения задания 1

1. В среде компьютерной программы NI Multisim построить виртуальную модель электрической схемы формирующую последовательность электрических сигналов с заданными параметрами. Построение данной модели выполнить с использованием разложения сигналов в гармонический ряд Фурье в следующих вариантах:

1.1. С суммированием 12 первых гармоник без использования сумматора.

1.2. С суммирование шести первых гармоник разложения в ряд Фурье с помощью неинвертирующего сумматора на основе операционного усилителя.

1.3. С суммированием 12 первых гармоник разложения в ряд Фурье с использованием неинвертирующего сумматора на основе ОУ.

2. В виртуальном эксперименте в каждом из вариантов, указанных в пункте 1, снимете осциллограммы сигналов и сравните их с идеализированным графическим изображением анализируемого сигнала. Сделайте выводы.

3. В каждом из вариантов схемных моделей выделите фрагменты представляющие собой законченные узлы и на их основе создайте иерархические блоки.

4. Используя иерархические блоки из пункта 3, соберите в NI Multisim полученные схемы в соответствии с пунктами 1.1, 1.2, 1.3. Снимите осциллограммы сигналов, сравните их с идеализированным изображением сигналов и с осциллограммами, полученными в пункте 2.

5. Моделируемый сигнал опишите на каждом из его участков в терминах КП MathCAD (MathLAB) в координатах ωt и t с представлением моделирующих соотношений. Оцените отклонение модели от идеального отображения сигнала.

Способ моделирования сигналов с заданными параметрами на основе их разложения в ряд Фурье с минимизацией временных и аппаратных затрат.

При моделировании сигналов с заданными параметрами (амплитуда, период, форма) на основе их разложения в ряд Фурье точность воспроизведения сигналов существенно зависит от числа гармонических составляющих ряда, используемых при построении модели. Увеличение количества гармоник повышает точность воспроизведения, но делает процесс моделирования более громоздким по временным затратам и по аппаратным затратам при его реализации в «железе». В случае уменьшения числа гармоник теряется точность воспроизведения сигнала. То есть, возникает необходимость в поисках оптимума.

Нами предложен способ оценки минимальной достаточности применяемого в модели количества гармоник разложения сигнала в тригонометрический ряд Фурье. Проиллюстрируем предлагаемый способ на примере моделирования сигнала треугольной формы с обратным наклоном, который в терминах MathCAD (MathLAB) может быть описан соотношениями (1) и (2) и далее по тексту будет именоваться, как «идеальный сигнал».

Идеальный сигнал:

$$\begin{aligned} u(\omega t) &:= \text{if } (\omega t = 0) & u(t) &:= \text{if } (t = 0) \\ &\text{ll return } U_m & &\text{ll return } U_m \\ &\text{else if } (\omega t \geq 0) \wedge (\omega t < 2\pi) & &\text{else if } (t \geq 0) \wedge (t < T) \\ &\text{ll return } U_m - U_m \cdot \omega t / 2\pi & (1) &\text{ll return } U_m - U_m \cdot t / T & (2) \\ &\text{else} & &\text{else} \\ &\text{ll return } 0 & &\text{ll return } 0 \end{aligned}$$

В соответствии с данным способом на начальном этапе создаётся граничная модель анализируемого сигнала, в которой «граничный сигнал» формируется с предельно-допустимым отклонением от «идеального сигнала», заданного исходными данными. При этом «граничный сигнал» может быть описан уравнениями (3) и (4), в которых для конкретизации граничное отклонение его формы от формы «идеального сигнала» по переднему фронту принято равным $0.1T$ (где T - период повторения сигналов).

Граничный сигнал:

$$\begin{aligned} u(\omega t) &:= \text{if } (\omega t \geq 0) \wedge (\omega t < 0.1 \cdot 2\pi) & u(t) &:= \text{if } (t \geq 0) \wedge (t < 0.1 \cdot T) \\ &\text{ll return } U_m \cdot \omega t / 0.1 \cdot 2\pi & &\text{ll return } U_m \cdot t / 0.1 \cdot T \\ &\text{else if } (\omega t \geq 0.1 \cdot 2\pi) \wedge (\omega t < 2\pi) & (3) &\text{else if } (t \geq 0.1 \cdot T) \wedge (t < T) & (4) \\ &\text{ll return } \frac{U_m}{0.9} - \frac{U_m \cdot \omega t}{0.9 \cdot 2\pi} & &\text{ll return } \frac{U_m}{0.9} - \frac{U_m \cdot t}{0.9 \cdot T} \\ &\text{else} & &\text{else} \\ &\text{ll return } 0 & &\text{ll return } 0 \end{aligned}$$

В заключение осуществляется построение искомой модели сигнала с заданными параметрами посредством введения в неё «произвольного» количества гармоник и выполнением сравнения «граничного» и «произвольного» сигналов на предмет попадания последнего в область, окаймлённую двумя сигналами; «граничным» и «идеальным». Затем реализуется коррекция числа гармоник в модели с шагом коррекции, равным одной гармонике его разложения в тригонометрический ряд Фурье. Изменение формы сигнала в процессе коррекции оценивается по критерию перемещения «произвольного» сигнала в направлении к указанной окаймлённой области. В момент попадания «произвольного» сигнала в окаймлённую область этот сигнал становится искомым сигналом с заданными параметрами, гарантирующими его надёжную работу в пределах поля допусков. Аналогично этому схема, формирующая искомый сигнал, и модель, на основе которой построена эта схема также являются искомыми.

На рис. 1 приведена осциллограмма искомого сигнала 1 в момент его попадания в заданную область под «граничным сигналом 2». Этот сигнал сформирован схемой рис. 2 (искомой схемой) на основе 12-ти первых гармоник разложения треугольного сигнала с обратным наклоном в тригонометрический ряд Фурье.

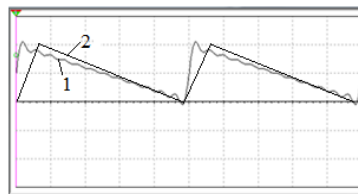


Рис. 1. Осциллограммы искомого 1 и «граничного» 2 сигналов сформированных схемой рис.2. Масштабирование осциллограмм: развертка 20 $\mu\text{s}/\text{Div}$, вертикаль 5 V/Div

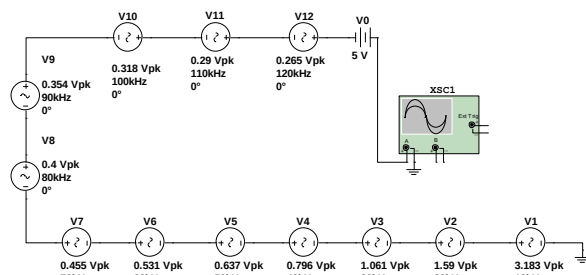


Рис. 2. Искомая схема формирующая, искомые пилообразные сигналы с обратным наклоном

Счётчики, дешифраторы, знакосинтезирующие индикаторы, пробники, каскадные соединения, иерархические блоки, стандарты в виртуальном эксперименте

При организации виртуальных экспериментов счётчики числа импульсов, дешифраторы, знакосинтезирующие индикаторы, шины, логические пробники, иерархические блоки и др. используются как основные, либо вспомогательные средства. При этом изображение схемных элементов осуществляется в североамериканском стандарте ANSI (American National Standards Institute), либо в европейском DIN-стандарте. Здесь представлены схемные решения с подробными подрисовочными пояснениями, которые позволяют эффективно и компактно обеспечить их применение.

Шины, счётчики, ANSI, DIN стандарты и др.

Шина (магистраль) – это среда передачи сигналов, в которой может осуществляться параллельное подключение нескольких электронных устройств системы, а также выполняется обмен данными. Для того, чтобы пропускная способность шины была максимальной, число её линий должно быть равно числу битов в информационном слове данных и количеству двоичных разрядов адреса максимальной длины, а также плюс к этому числу линий, по которым передаются управляющие сигналы.

Обозначение шины – утолщённая ломаная линия, в которую входят и выходят в местах расположения компонентов более тонкие соединительные линии с их нумерацией при входе в шину и выходе из неё (к примеру, с номером Ln1(4) при входе и с тем же номером Ln1(4) при выходе).

Каскадирование счётчиков в режимах суммирования и вычитания

Как правило, счётчики числа импульсов строят путём каскадного включения, при котором каждый элемент каскадного счётчика представляет собой отдельный счётчик, способный формировать на своём выходе биты переноса (переполнения). В двоичных счётчиках длина счётной последовательности выражается целым числом, равным 2^n , а в десятичных (декадных) счётчиках – 10^n .

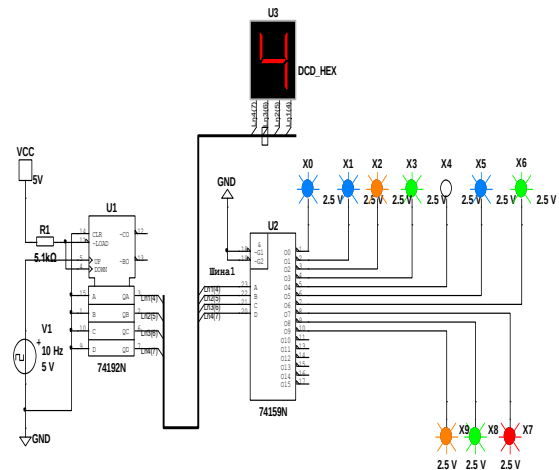


Рис. 1. Соединение счётчика (74192N) с дешифратором (74159N) с инверсными выходами, знакосинтезирующим индикатором (DCD_HEX) и логическими пробниками (X0 – X10). В счётчике зарегистрировано число 4, в дешифраторе избран выход X4 (избрание зафиксировано нулевым сигналом на этом выходе). В изображении схемных элементов применён ANSI стандарт.

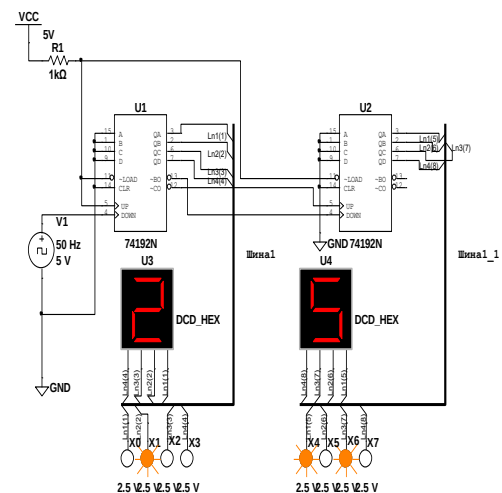


Рис.2. DIN стандарт. Двухкаскадный реверсивный декадный счётчик на ИМС U1 и U2 (74192N) построен с применением шин. Режим вычитания. Число 52 код (0101001)

Ёмкость двоичного счётчика, состоящего из m триггеров равна 2^m . В декадных счётчиках (в счётчиках по модулю 10) сигнал может принимать 10 отдельных состояний, для реализации которых каждый счётчик должен иметь по крайней мере 4 триггера. В синхронных счётчиках переключение в цепочке взаимосвязанных триггеров происходит одновременно. Их выходы изменяют своё состояние в один и тот же момент времени при подаче на вход синхронизирующего сигнала. Изменение направления счёта (режим суммирования / режим вычитания) в реверсивных счётчиках осуществляется следующим образом.

При наличии в счётчике отдельных входов управления UP и DOWN для реализации режима суммирования выход источника импульсных

сигналов подключают ко входу UP первого каскада, а вход DOWN соединяют с VCC. При этом выходы переноса суммирования СО и вычитания ВО каждого предыдущего счётчика соединяют со входами UP и DOWN следующих счётчиков каскадного соединения. Для перехода в режим вычитания генератор импульсов подключают к входу DOWN счётчика первого каскада, а вход UP соединяют с источником VCC.

Если счётчик имеет один обобщённый вход управления U/D направлением счёта, то в любом режиме его работы счётные импульсы подают на вход синхронизации CLK первого счётчика, а импульсы переноса суммирования (вычитания) с выхода переноса MAX/MIN каждого предыдущего счётчика поступают на вход CLK каждого последующего счётчика. В режиме суммирования на вход U/D подаётся нулевой потенциал, а в режиме вычитания – напряжение VCC.

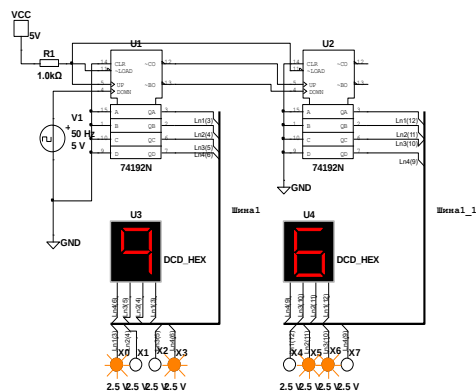


Рис. 1. ANSI стандарт. Двухкаскадный реверсивный декадный счетчик на ИМС 74192N с применением шин. Режим вычитания. Число 69, код(01101001)

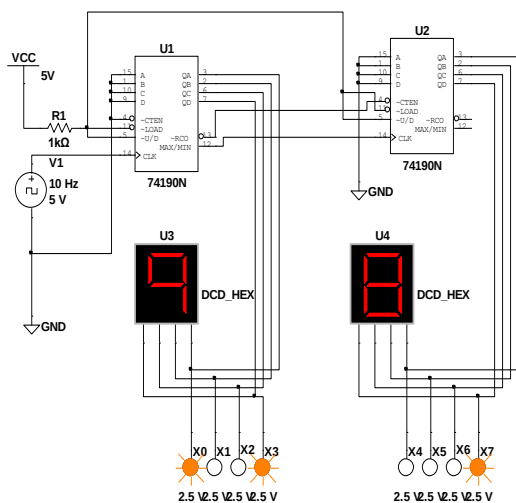


Рис. 2. DIN стандарт. Двухкаскадный реверсивный декадный счетчик на ИМС 74190N. Работа в режиме вычитания. Зафиксирован двоичный код (10001001). В индикаторе DCD_HEX зафиксировано число 89

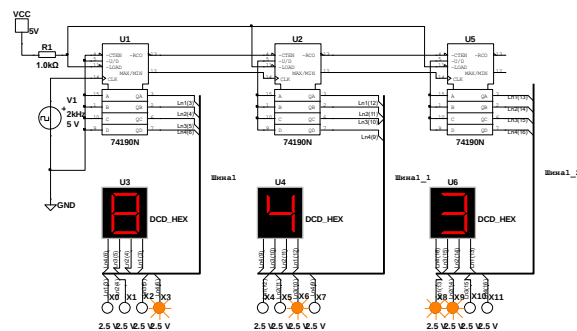
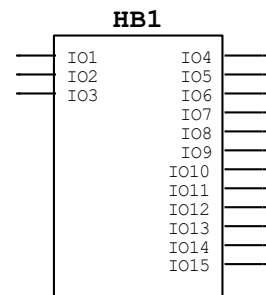


Рис. 3. ANSI стандарт. Построение трёхкаскадного реверсивного декадного счётчика на основе ИМС 74190N с применением соединений с помощью шин, число зафиксированное в счётчике 348. Двоичный код (001101001000). Режим суммирования.



3каска дек счётчик

Рис. 4. Иерархический блок трёхкаскадного декадного счётчика на ИМС 74190N.

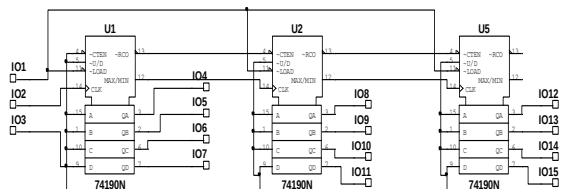


Рис. 5. Электрическая схема иерархического блока рис.4.

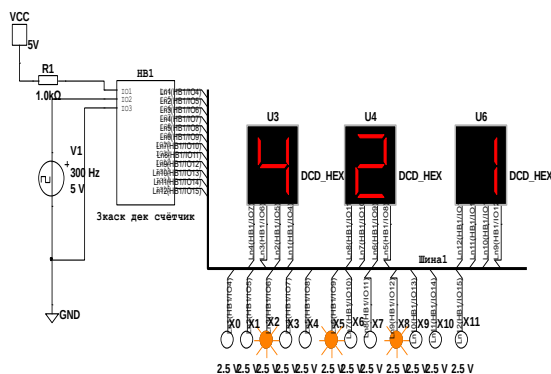


Рис. 6. Включение иерархического блока HB1 трехкаскадного декадного счетчика на ИМС 74190N в режиме суммирования. Число зафиксированное в счетчике 124

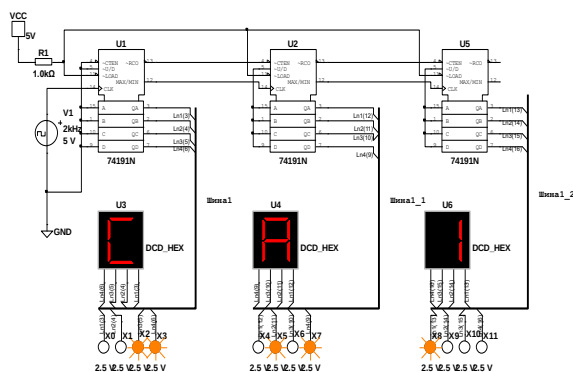


Рис. 7. ANSI-стандарт. Построение трёхкаскадного реверсивного двоичного счётчика на основе ИМС 74191N с применением соединений с помощью шин. Число, зафиксированное в счётчике в 16-ти ричном (1AC)₁₆. Двоичный код (000110101100). Режим суммирования.

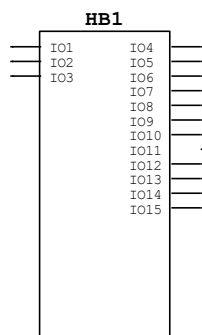


Рис. 8. Иерархический блок трехкаскадного двоичного счетчика на ИМС 74191N

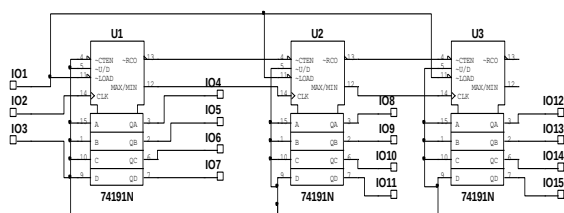


Рис. 9. Электрическая схема иерархического блока рис.8

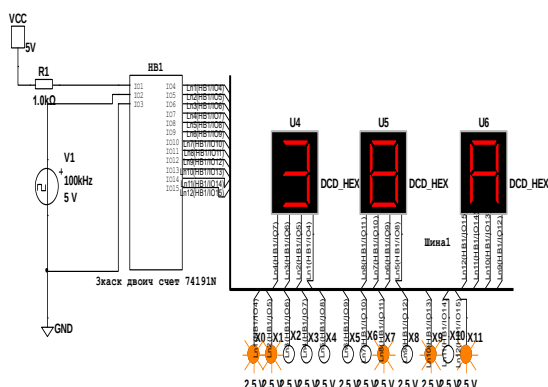


Рис. 10. Включение иерархического блока HB1 трёхкаскадного двоичного счетчика на ИМС 74191N. Число, зафиксированное в счетчике в 16-ти ричном коде (A83)₁₆.

Квантовые и оптические цепи Дифференциальные фотодетекторы в виртуальном эксперименте.

Дифференциальные фотодетекторы - это детекторы оптического излучения, построенные по дифференциальной схеме и предназначенные для выполнения сравнения оптических сигналов от разных источников, а также для приёма световых сигналов на фоне более мощной засветки, либо при наличии помеховых сигналов, например, импульсных помех. На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема фотодиодного дифференциального фотодетектора, построенного на основе отечественной компонентной базы.

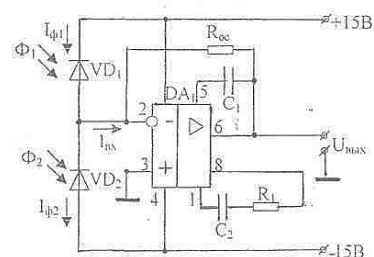


Рис. 1. Пример схемной реализации дифференциального фотодетектора на основе отечественных компонентов, где VD1, VD2 - два встречно включённых фотодиода – ФД-24 –К с токовой чувствительностью $S_1 = 0,5 \text{ А/Вт}$ в области длин волн 900 нм, DA1 - операционный усилитель К153 УД1, дискретные компоненты $R_{oc} = 100 \text{ кОм}$, $R_1 = 4,5 \text{ кОм}$, $C_1 = 27 \text{ пФ}$, $C_2 = 470 \text{ пФ}$

Для построения дифференциальных фотодетекторов используют фотодиоды и фототранзисторы (рис.2). При этом входную цепь детектора образуют два встречно включённых фотодиода Φ_1 и Φ_2 рис.2(а), либо два встречно включённых фототранзистора Φ_1 , Φ_2 рис.2(б), подключённые общей точкой их соединения к инвертирующему входу операционного усилителя U1(U2).

Фотодиоды схемы рис.2 (а) работают в фотодиодном режиме вследствие подачи на их электроды обратного смещения от источников питания VCC (+15V) и VEE (-15V). В случае, когда световые потоки равны $\Phi_1 = \Phi_2$, происходит взаимная компенсация сигналов на инвертирующем входе ОУ U1.

При возникновении рассогласования в величинах световых потоков Φ_1 и Φ_2 входной ток ОУ $I_{вх}$ становится равным разности фототоков ($I_{\Phi 1} - I_{\Phi 2}$), в результате чего на выходе фотодетектора формируется напряжение $U_{вых}$, пропорциональное указанной разности фототоков:

$$U_{вых} = R_1 (I_{\Phi 1} - I_{\Phi 2}), \quad (1)$$

В схеме дифференциального фотодетектора рис. 2(б) в качестве фотоприёмников использованы фототранзисторы Φ_1 и Φ_2 . Разность их токов

эмиттера (коллектора) $I_{\Phi 1}$ и $I_{\Phi 2}$ формирует информационный сигнал $I_{\Phi x} = (I_{\Phi 1} - I_{\Phi 2})$, пропорциональный рассогласованию световых потоков, приходящих на базы фототранзисторов.

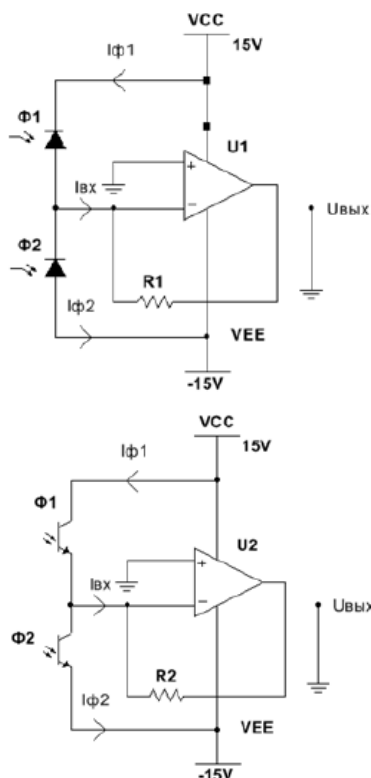


Рис. 2. Упрощённые схемы фотодиодного (а) и фототранзисторного (б) дифференциальных детекторов

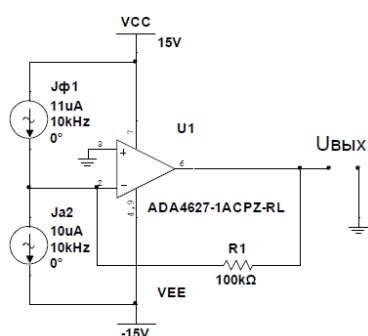


Рис. 3. Модель замещения дифференциального фотодетектора при воздействии на его фотоприемники синусоидальных потоков излучения

Фототранзисторы – это биполярные транзисторы, у которых управление током коллектора осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта при преобразовании световых сигналов в электрические с одновременным их усилением. При попадании излучения на базу (коллектор) в ней образуются электронно-дырочные пары, которые разделяются полем коллекторного перехода. При этом в базовой области накапливаются основные носители заряда, что приводит к снижению потенциального барьера эмиттерного перехода и к увеличению тока через

фототранзистор по сравнению с током только тех носителей заряда, которые образовались под действием света. Важнейшими параметрами являются интегральная чувствительность – отношение фототока к падающему потоку излучения (достигает 10А/лм) и коэффициент усиления первоначального тока (достигает 100,...,1000).

Для схематического моделирования разработчики электронной аппаратуры используют такие программы, как MicrjoCAP, AltiumDesigner, Orcad, Alpak, LabView, NI Multisim, Simulink, Proteus и другие. В данной работе для этих целей нами используется программа NI Multisim как наиболее мощная программа схематического моделирования, которая имеет набор виртуальных измерительных приборов, обеспечивающих возможность измерения практически любых характеристик и параметров электронных характеристик и параметров электронных схем, близких к реальным. С учётом изложенного выше с использованием программы NI Multisim на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 приведены эквивалентные схемы замещения дифференциальных фотодетекторов в различных режимах работы. В указанных моделях источники постоянного и переменного токов отображают переменные и постоянные составляющие фототоков в фотоприёмниках детекторов в указанных режимах работы.

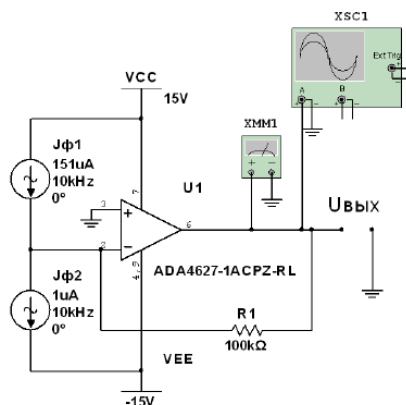


Рис. 4 (а). Модель замещения дифференциального фотодетектора

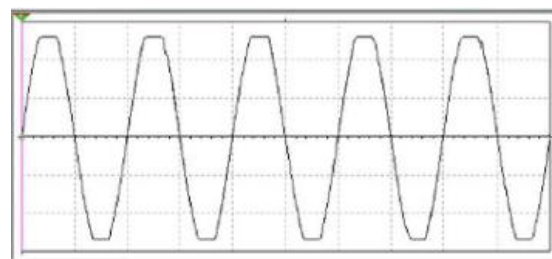


Рис. 4 (б). Осциллограмма выходных сигналов схемы рис. 3(а) при работе детектора за границей допустимого рассогласования амплитуд синусоидальных потоков. Масштабирование осциллограмм: развёртка 50us/Div, вертикаль 5V/Div

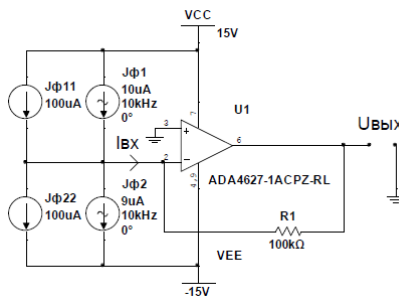


Рис. 5. Модель замещения фотодетектора при воздействии на его фотоприемники синусоидальных и постоянных потоков излучения

Устройство для исследования дифференциальных фотодиодных детекторов в виртуальном эксперименте

На рис. 1 представлена компьютерная модель устройства для тестирования дифференциальных фотодиодных детекторов, в котором дифференциальные (разностные) оптические сигналы формируются фотодиодными оптронами U1 и U2, которые одновременно являются составной частью исследуемого устройства. Входная часть схемы выполняет функции задания режимов работы устройства при его испытаниях (источники постоянного напряжения V1, V3, и резисторы R2, R4 задают постоянные составляющие фототоков светодиодов оптронов), (источники переменного напряжения V2, V4, резисторы R3, R5 и конденсаторы C1, C2 задают переменные (синусоидальные) составляющие фототоков указанных светодиодов, работающих в составе оптронов U2 и U3). Виртуальные измерительные приборы U4 (DC-амперметр), U5- (AC-амперметр), U6 - (DC-амперметр), U7 - (AC-амперметр) измеряют величины постоянных и переменных электрических токов, протекающих через светодиоды оптронов U2 и U3 во время генерации ими постоянных и переменных потоков светового излучения Ф1 и Ф2 соответственно. Иными словами, входная часть схемы рис.1 моделирует различные режимы внешней засветки от различных источников, излучающих как полезные, так и помеховые сигналы.

На выходах оптронов U2 и U3 формируется дифференциальная разность их фототоков. Для построения преобразователя разности фототоков ($I_{\phi 1} - I_{\phi 2}$) в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ дифференциального фотодетектора рис.1 используют операционные усилители с высоким входным импедансом, низким уровнем входных токов и внутренней частотной коррекцией, обеспечивающей устойчивую работу ОУ при любых режимах цепи обратной связи. Подобные характеристики имеют к примеру, отечественные операционные усилители К544УД1(А-В), К544УД2(А-В) и зарубежные ОУ типа ADA4627-1ACPZ, ADA6617 и др. В анализируемом устройстве применён ОУ типа ADA4627-1ACPZ-

RL. Напряжение на его выходе $U_{\text{вых}}$ измеряет виртуальный вольтметр U8.

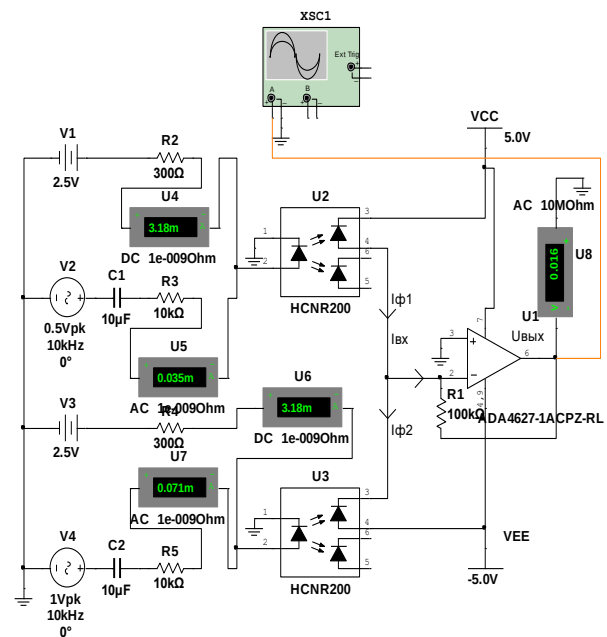


Рис. 1. NI Multisim модель устройства для исследования дифференциальных фотодиодных детекторов

При проведении работ по исследованию фотодиодных дифференциальных детекторов могут быть использованы оптроны из библиотеки программы NI Multisim, к примеру диодные оптроны HCNR200, HCNR-200-050E, HCNR-200-350E, HCNR-201 и др.

Устройство для исследования фототранзисторных дифференциальных детекторов в виртуальном эксперименте

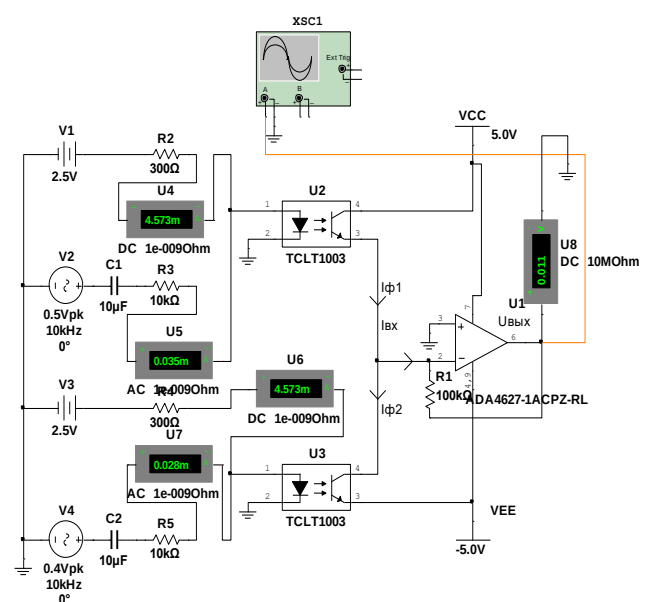


Рис. 2. NI Multisim модель устройства для исследования дифференциальных фототранзисторных детекторов

Экспериментальные образцы:

*Диодные оптроны: HCNR200; HCNR-200-050E; HCNR-200-350E; HCNR-201 и др.;

- Транзисторные оптроны: TIL192; TCLK1003; SFH6156-3T; PS2801-1; MOCD213 и др.

Моделирование фотодиодных и фототранзисторных дифференциальных детекторов с использованием иерархических блоков и др. Иерархические блоки в моделях фотодиодных дифференциальных детекторов

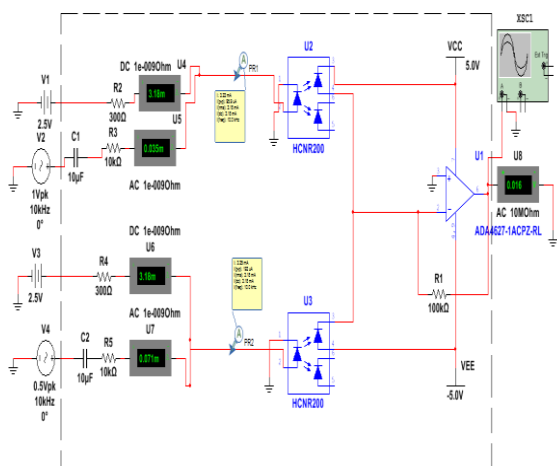


Рис. 1. Электрическая схема фотодиодного дифференциального детектора. Рассогласование по переменной составляющей сигналов на анодах светодиодов оптронов U1 и U2 ($V_2 - V_4 = 0,5 \text{ Vpk}$)

Сигнал на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 16 \text{ mVpk}$. Пунктирной линией обозначен иерархический блок схемы.

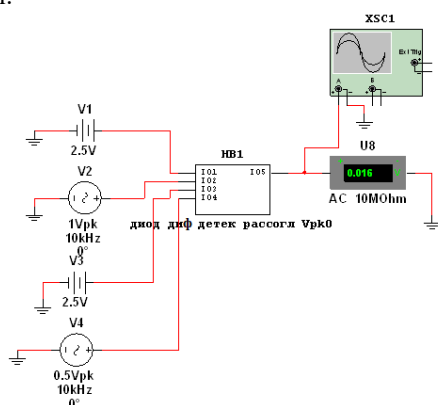


Рис. 2 Иерархический блок HB1 схемы рис. 1 при рассогласовании по переменной составляющей $0,5 \text{ Vpk}$ ($V_2 - V_4 = 0,5 \text{ Vpk}$). Сигнал на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 16 \text{ mVrms}$

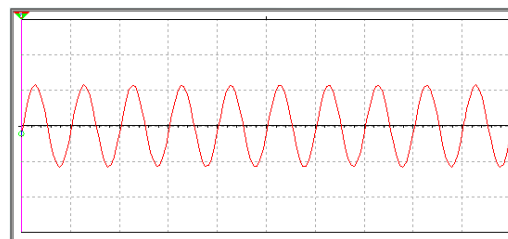


Рис. 3 Осциллограмма сигналов на выходе иерархического блока рис. 2. Масштабирование осциллограммы: развертка 100 us/Div , вертикаль 20 mV/Div

Таблица 1

Фотодиодный дифференциальный детектор							
V1	V3	ΔDC	V2	V4	ΔAC	Uвых DC	Uвых AC
V			Vpk			V	Vrms
2.5	2.5	0	1	0.5	0.5	-	0.016
2.5	2.5	0	0.5	1	-0.5	-	0.016
5	2.5	2.5	0.5	0.5	0	-3.403	-
7.5	2.5	5	0.5	0.5	0	-3.403	-
2.5	2.5	0	1	0.5	0.5	-	0.016
2.5	2.5	0	1.25	0.5	0.75	-	0.025

Иерархические блоки в моделях фототранзисторных дифференциальных детекторов

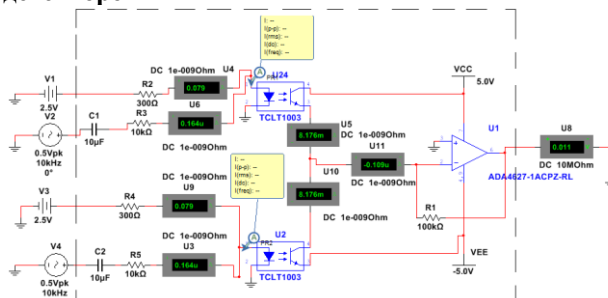


Рис. 1. Электрическая схема фототранзисторного дифференциального детектора. Рассогласование по переменной и постоянной составляющим сигналов на анодах светодиодов оптронов U24 и U2 отсутствует ($V_2 = V_4 = 0,5 \text{ Vpk}$); ($V_1 = V_3 = 2,5 \text{ V}$)

Пунктирной линией обозначен иерархический блок схемы.

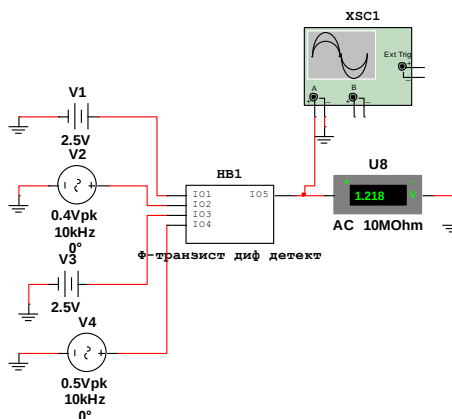


Рис. 2. Иерархический блок HB1 фототранзисторного дифференциального фотодетектора при рассогласовании $0,1 \text{ Vpk}$ ($V_4 - V_2 = 0,5 \text{ Vpk} - 0,4 \text{ Vpk} = 0,1 \text{ Vpk}$) по переменной составляющей сигнала. Сигнал на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 1,218 \text{ Vrms}$

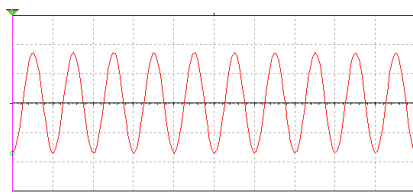


Рис. 3. Осциллограмма сигналов на выходе иерархического блока рис. 2. Масштабирование осциллограммы: развертка 100 $\mu\text{s}/\text{Div}$, вертикаль 1V/Div

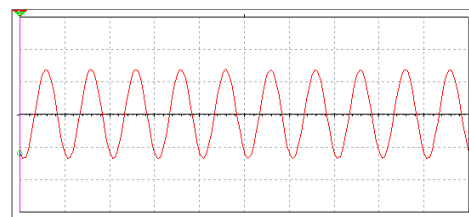


Рис. 3. Осциллограмма сигнала на выходе блока НВ1 фотодетектора рис. 2. Масштабирование осциллограммы: развертка 100 $\mu\text{s}/\text{Div}$, вертикаль 20 mV/Div

Таблица 2

Фототранзисторный дифференциальный детектор							
V1	V3	ΔDC	V2	V4	ΔAC	УВЫХ DC	УВЫХ AC
V			Vpk			V	Vrms
2.5	2.5	0	0.4	0.5	-0.1	-	1.218
2.5	2.5	0	0.35	0.5	-0.15	-	1.827
2.5	2.5	0	0.3	0.5	-0.2	-	2.354
2.5	2.5	0	0.25	0.5	-0.25	-	2.622
2.5	2.5	0	0.2	0.5	-0.3	-	2.772
2.5	2.5	0	0.2	0.5	-0.3	-	3.905

Таблица 3

Фотодиодный дифференциальный детектор (с паралельн. соединением)							
V1	V3	ΔDC	V2	V4	ΔAC	УВЫХ DC	УВЫХ AC
V			Vpk			V	Vrms
2.5	2.5	0	1	0.5	0.5	-	0.019
2.5	2.5	0	1.25	0.5	0.75	-	0.029
2.5	2.5	0	1.5	0.5	1	-	0.039
2.5	2.5	0	1.75	0.5	1.25	-	0.049
2.5	2.5	0	2	0.5	1.5	-	0.058

Иерархические блоки в моделях фотодиодных дифференциальных фотодетекторов при параллельном включении фотодиодов в смежных каналах

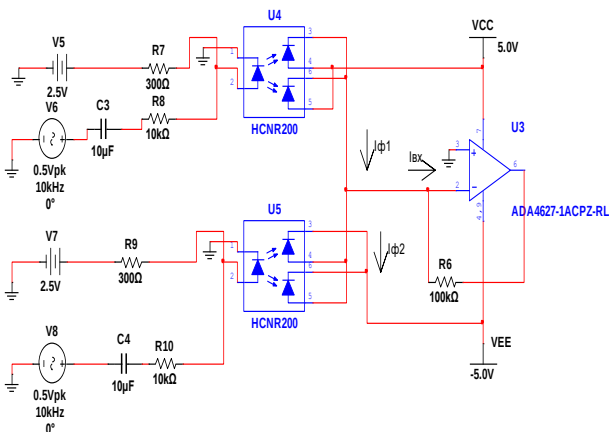


Рис.1 Электрическая схема иерархического блока фотодиодного детектора с параллельным включением фотодиодов на выходах оптронов HCSR 200 с подключёнными к входам блока источниками постоянного V1,V3 и синусоидального V2,V4 смещения

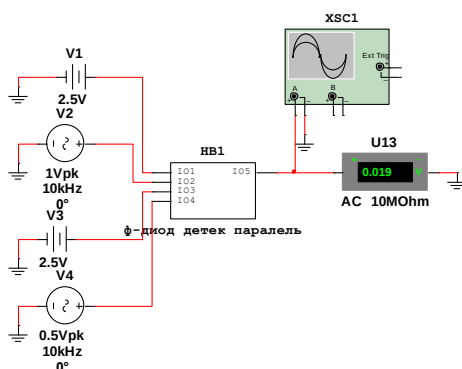


Рис. 2. Иерархический блок НВ1 фотодиодного детектора с параллельным включением фотодиодов при рассогласовании по переменной составляющей сигналов (V2 – V4) = 0.5Vpk. Сигнал на выходе блока равен $U_{\text{вых}}=19 \text{ mVrms}$

Моделирование оптоэлектронных цепей на основе транзисторных оптронов в пакете программы NI Multisim

Здесь приведены примеры моделирования цепей с транзисторными оптронами (ТО) с различной комплектацией элементов в одном корпусе. На рис.1 показана модель схемы включения ТО U1 (CNY17F-3), которая содержит оптопару U1 [светодиод + фототранзистор] выполняющие функции излучателя и фотоприёмника; виртуальные измерительные приборы [DC-амперметры U2, U4, U5 и DC-вольтметр U3]; источник VCC=5V и источник постоянного напряжения V1=4V с последовательно включенным резистором R1=300 Ом, задающие режим работы оптопары с результатами, представленными на экранах измерительных приборов U2, U4, U5 и U3, соответственно.

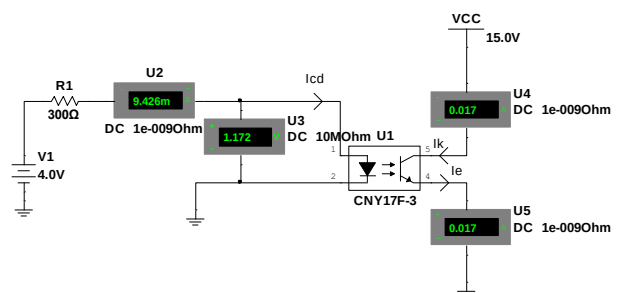


Рис. 1 Включение оптрона U1 [CNY17F-3;(светодиод + фототранзистор)] при питании светодиода от источника V1 постоянного напряжения

На рис. 2 показана модель схемы включения транзисторного оптрона U1 (TCLT1003) с аналогичной комплектацией элементов в одном корпусе [(излучательный светодиод) и (фотоприёмник в виде фототранзистора)]. Модель содержит виртуальные измерительные приборы: [(AC-амперметры U2, U4, U5); (AC-вольтметр U3); (виртуальный осциллограф XSC1); (источник VCC и

источник синусоидального напряжения $V1=1.5\text{Vpk}$, $f=10\text{kHz}$) с последовательно включенной цепью ($R1=10\text{k}\Omega$; $C1=1\text{мкФ}$), устанавливающей режим работы оптрона $U1$ по переменному току, в виде осциллограмм на рис. 3]. Для получения этих осциллограмм в схему рис.2 включен зависимый источник напряжения $V3$, управляемый током I_e фототранзистора оптрона $U1$.

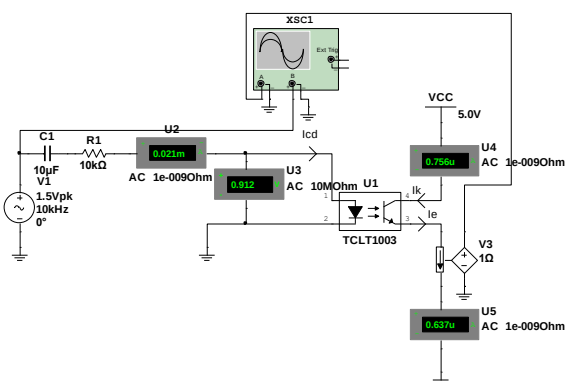


Рис. 2. Включение оптрона $U1$ [TCLT1003 (светодиод + фототранзистор)] при питании светодиода от источника $V1$ синусоидального напряжения

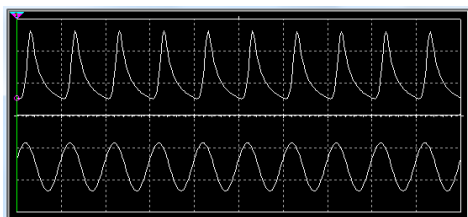


Рис. 3 Осциллограмма сигналов на выходе оптрона в схеме рис.2 при $V1 = 1.5\text{Vpk}$, $V_{cc} = 5\text{V}$, $f=10\text{kHz}$. Нижняя осциллограмма канал B – источник сигнала $V1$, верхняя осциллограмма (канал A) – тока эмиттера оптрона TCLT1003. Масштабирование осциллограмм: развёртка 100us/Div , вертикаль 2V/Div (канал B) и 1uV/Div (канал A)

Во входную часть схемы рис.4 включены: [источник постоянного напряжения $V1=2.5\text{V}$, подключенный к аноду светодиода оптрона $U1$ и через резистор $R1=300\Omega$] и [источник синусоидального напряжения $V2$ (1Vpk , 1kHz), который подключен к аноду того же светодиода через цепь ($C1=1\text{мкФ}$; $R2=10\text{k}\Omega$)]. Эти цепи осуществляют управление работой излучателя света по постоянной и переменной составляющей сигналов. Выходная часть схемы рис.4 содержит фототранзистор, который выполняет приём световых сигналов излучателя, реализует их преобразование в электрические сигналы (в электрический ток его эмиттера) с последующим усилением этих сигналов за счёт того, что фототранзистор в корпусе оптрона соединен с биполярным транзистором по схеме составного транзистора Дарлингтона. Для достижения еще более высокого усиления выходных сигналов, схема

составного транзистора была дополнена навесным транзистором $Q1(2\text{N}3634)$, а полученный в результате составной транзистор из трёх транзисторов был включен в схему эмиттерного повторителя [составной транзистор + эмиттерное сопротивление $R3=100\Omega$ + конденсатор $C2=1\text{мкФ}$] для согласования выходных сигналов со входом осциллографа XSC1 и резистивной нагрузкой $R4=10\text{k}\Omega$.

При включении виртуальной схемы рис. 4 виртуальный осциллограф формирует на экране поступающий на вход его канала А синусоидальный сигнал с масштабирование по вертикали 200pV/деление и масштабированием по оси времени 2ms/деление (рис. 4,б).

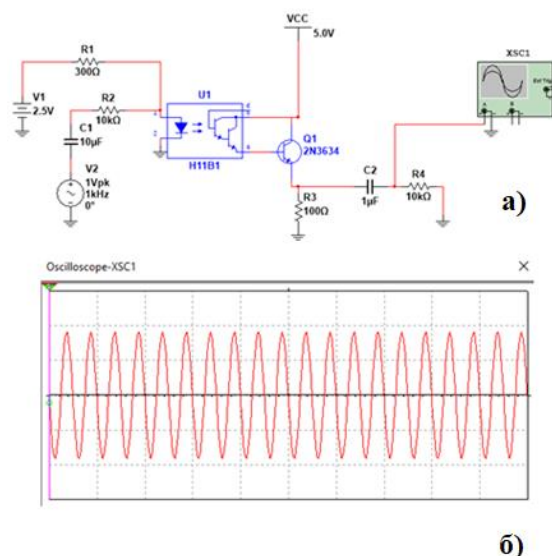


Рис. 4. Виртуальная схема (а) включения оптрона $U1$ (H11B1) с подключенным к нему навесным транзистором $Q1(2\text{N}3634)$ и осциллограмма (б) сигналов на выходе этой схемы, сформированная виртуальным осциллографом XSC1. Масштабирование осциллограмм: развёртка 2ms/Div , вертикаль 200pV/Div

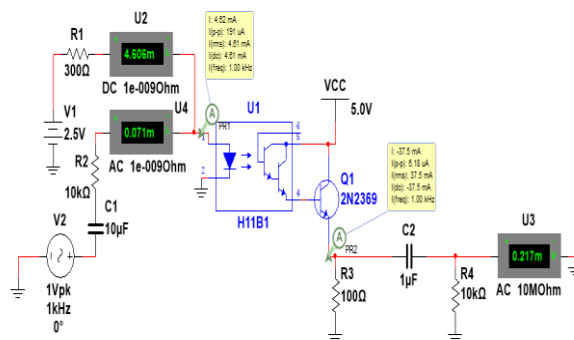


Рис. 5. Включение измерительных приборов и оптрона $U1$ [H11B1(светодиод +составной фототранзистор)] с подключённым к нему через выводы оптрона 4 и 5 навесным транзистором $Q1 - 2\text{N}2369$, включённым в схему эмиттерного повторителя

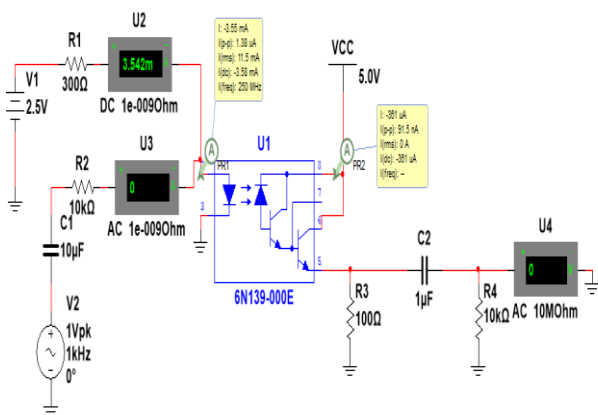


Рис. 6. Включение оптрона U1 [6N139-000E (светодиод + фотодиод + составной биполярный транзистор)]

В схеме рис. 6 применен оптрон U1 (6N139-000E), его входные цепи построены аналогично входным цепям оптрона H11B1 (см. рис. 4, рис. 5), а выходные цепи содержат в качестве преобразователя оптических сигналов в электрические сигналы фотодиод, вместо транзисторов в предыдущих схемах и составной транзистор из двух биполярных транзисторов без включения в транзистор Дарлингтона навесного транзистора, как это имело место в предыдущих схемах. Иными словами, в схеме рис.6 произошло ослабление выходного сигнала на двух этапах: при замене фототранзистора на фотодиод, и при исключении из схемы дополнительного навесного биполярного транзистора из схемы Дарлингтона.

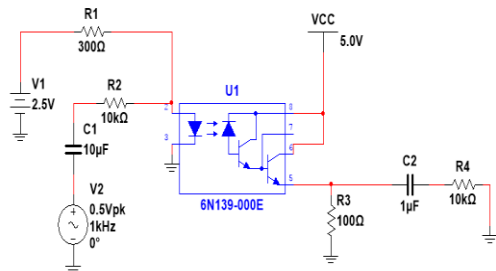


Рис.7. Включение оптрона U1 [6N139-000E (светодиод + фотодиод + составной биполярный транзистор)]

NI Multisim моделирование работы светодиодных индикаторов в статическом режиме отображения

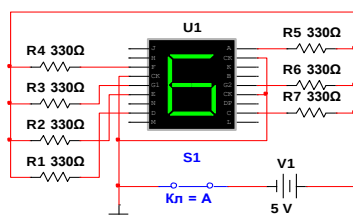


Рис. 1. Схема межсоединений сегментов дисплея C-398X с источниками логических уровней «0» и «1» для формирования буквы «Б» в результате получения с выходов кодопреобразователя системы сигналов

$$F3 = F5 = F8 = F11 = F14 = F18 = 1,$$

где CK1, CK2, CK3 – электроды «общего катода», подключенные к выводам 4, 13, 17

Моделирование динамического принципа управления отображением цифробуквенной информации на светодиодных индикаторах в среде компьютерной программы NI Multisim

Обозначение на схеме	Зарубежные компоненты в схеме NI Multisim (рис. 4, пример 2)	Отечественные аналоги
U1	74LS157D	
U2	74LS49D	
U3	74LS139D	
U4	Digital Clock	
U5	LED 7-Seg Display	
U6	LED 7-Seg Display	

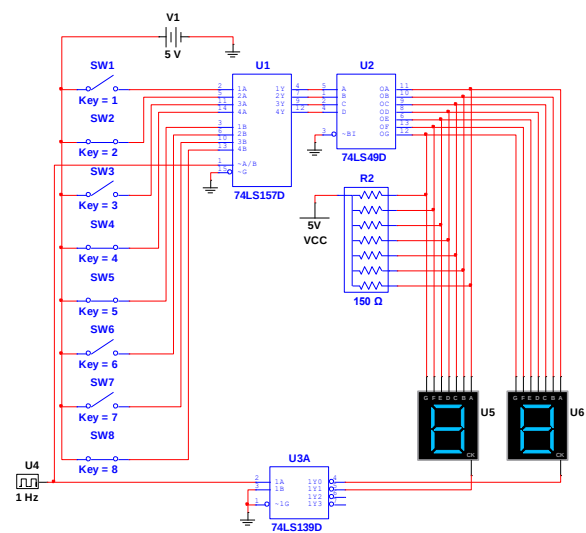


Рис. 1. Схема, реализующая динамический метод управления двухзнакоместным семисегментным дисплеем

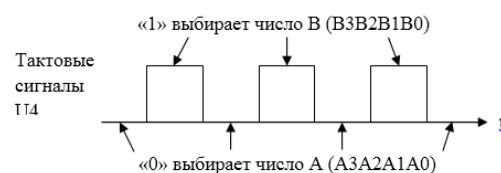


Рис. 2. Выбор информационного источника при коммутации (А или В) с выходов мультиплексора U1 на входы преобразователя U2

Распознавание оптических образов в виртуальной эксперименте на основе определения функции их свёртки с эталонным изображением

Эффективное вычисление двумерных свёрток или корреляционных функций сравниваемых изображений выполняют оптические корреляторы. При этом оптическим путём устройство осуществляет обработку поступающего на его вход изображения объекта таким образом, что параметры

выходного оптического сигнала (отклика) позволяют идентифицировать исследуемый объект в сравнении с заданным эталоном, то есть выполнить распознавание образов объектов. Решение о степени их сходства принимается по результату вычисления функции свёртки двух изображений: эталонного (заданного) и объектного (анализируемого), которое может быть выполнено одним из двух следующих способов:

* С использованием голографического коррелятора Ван дер Люгта

* С использованием голографического коррелятора совместного преобразования.

На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема коррелятора совместного преобразования (схема когерентного коррелятора с пространственным интегрированием) на этапе формирования свёртки (корреляционной функции) спектров эталонного и анализируемого изображения.

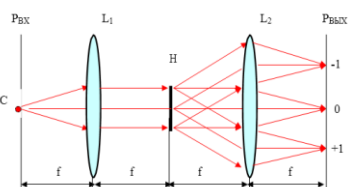


Рис. 1. Схема коррелятора совместного преобразования на этапе формирования свёртки (корреляционной функции) двух Фурье – спектров, где L_1, L_2 – Фурье – преобразующие линзы; C – точечный источник излучения; $+1, 0, -1$ – области локализации волновых полей первого, нулевого и минус первого порядка дифракции в выходной плоскости $P_{\text{вых}}$ (задняя фокальная плоскость линзы L_2); $P_{\text{вх}}$ – входная плоскость (передняя фокальная плоскость линзы L_1); H – Фурье – голограмма с предварительно записанной по схеме рис.2 интерференционной картины двух Фурье – спектров (объектов A и B), где Фурье – спектр одного объекта служил опорной волной при записи другого спектра как объектной волны

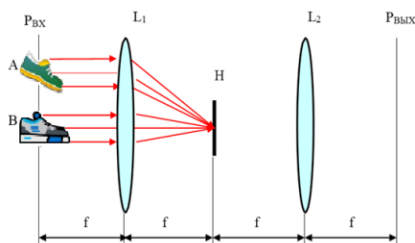


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема записи голограммы- картины интерференции двух Фурье-спектров, где L_1, L_2 – линзы, осуществляющие в схеме преобразование Фурье; H – регистрирующая среда, на которой записывается Фурье- голограмма интерференционной картины двух Фурье – спектров (объектов A и B); $P_{\text{вх}}$ – входная плоскость системы (передняя фокальная плоскость линзы L_1); A, B – транспаранты со сравниваемыми изображениями; $P_{\text{вых}}$ – выходная плоскость системы (задняя фокальная плоскость линзы L_2); f – фокусное расстояние линз L_1, L_2

При включении оптического коррелятора совместного преобразования рис. 1 в задней фокальной плоскости $P_{\text{вых}}$ линзы L_2 пространственно разделяются волны трёх порядков дифракции $+1, 0, -1$. В порядке дифракции $+1$ формируется свёртка (взаимная корреляционная функция) спектров u_A и u_B , а в порядке дифракции -1 формируется комплексно сопряжённая ей свёртка спектров u_B и u_A . Значения модулей этих двух свёрток симметричны относительно оптической оси коррелятора, а их фазы – комплексно сопряжены. Волна нулевого порядка дифракции локализуется в окрестности оптической оси коррелятора. В рамках данного анализа этот порядок дифракции не представляет интереса.

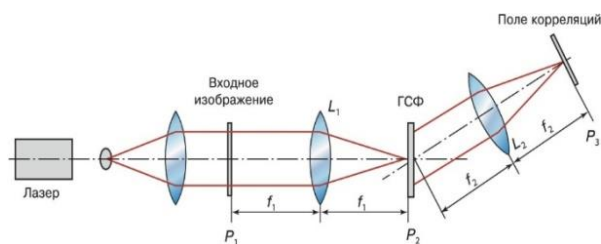


Рис. 3. Схема коррелятора Ван дер Люгта, где: L_1, L_2 – Фурье-преобразующие линзы; f_1, f_2 – фокусные расстояния линз; P_1, P_2, P_3 – входная, частотная и выходная плоскости соответственно ГСФ – голографический согласованный фильтр

Оптическая схема рис. 3 когерентного коррелятора с пространственным интегрированием Ван дер Люгта (схема 4f -коррелятора) состоит из двух последовательно работающих анализаторов спектра с пространственным интегрированием. Первый анализатор спектра осуществляет в плоскости пространственных частот умножение пространственного спектра входного сигнала на комплексно сопряжённый спектр опорного сигнала, записанного в виде фильтра. Обратное преобразование Фурье этого произведения даёт на выходе второго анализатора спектра искомую корреляционную функцию (свёртку) входного и опорного сигнала (рис 4).

Работа 4f - коррелятора (коррелятора Ван дер Люгта) отличается от работы коррелятора совместного преобразования только в технике формирования произведения пространственных спектров. Остальные базовые операции совпадают: два последовательных преобразования Фурье и перемножение спектров входного и опорного сигналов в обоих корреляторах реализуются аналогично. Поэтому пространственное разделение волн трёх порядков дифракции $+1, 0, -1$ и формирование свёртки (взаимной корреляционной функции) в порядке дифракции $+1$ и комплексно сопряжённой свёртки в порядке дифракции -1 в обоих корреляторах совпадает.

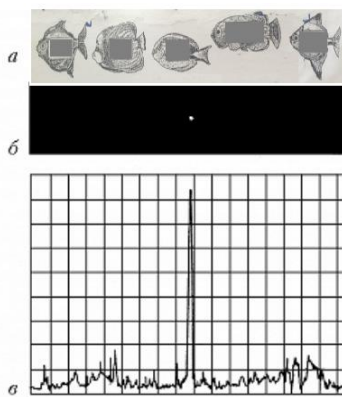


Рис. 4. Результат распознавания объекта контроля: распознаваемое изображение (а); поле корреляций в плоскости РЗ (б); поле корреляций, сканированное микрофотометром (в)

Таким образом, мерой близости изображения и эталона является их функция взаимной корреляции (функция свёрток). При решении задачи голографического распознавания образов проводится установление наличия распознаваемого объекта в анализируемом изображении с определением его координат (рис. 4, б, в) в поле зрения системы распознавания. Для этого голографический коррелятор Ван дер Люгта вычисляет ФВК двух изображений: объектного и эталонного, после чего максимум функции взаимной корреляции (функции свёртки) сравнивается с пороговым значением, которое определяется вероятностью правильного распознавания. Если сигнал корреляции превышает порог - распознаваемый объект обнаружен, если сигнал ниже порога - этого объекта в анализируемом изображении нет.

Выводы. 1. Предложенные и проверенные в данной работе модели биполярных и униполярных нанотранзисторов на основе зависимых источников тока и напряжения, образующих два взаимосвязанных четырехполюсника, позволяют проводить виртуальные исследования характеристик и параметров наноприборов при их работе в нагруженной электронной схеме при вариации параметров источников входных сигналов, сопротивлений нагрузки, а также Н-, и G-параметров четырехполюсников наномодели.

2. Разработан способ моделирования сигналов заданной формы на основе их разложения в ряд Фурье с минимизацией временных и аппаратных затрат.

3. Обосновано и реализовано в виртуальном эксперименте применение метода граничных аналоговых сигнатур при определении работоспособности КМОП и ТТЛ триггеров Шмитта.

4. Применение иерархических блоков и подсхем при организации виртуальных экспериментов в данной работе выполнено на примерах реализации моделей формирования сигналов заданной формы;

моделей каскадного построения счетчиков импульсных сигналов, а также на моделях фотодионных и фототранзисторных дифференциальных детекторов, и показало высокую эффективность и надежность. Вместе с тем, при работе с более сложными схемными решениями, применение иерархических блоков требует проведения предварительного анализа, к примеру, на возможность появления сбоев вследствие возникновения опасных состязаний сигналов (race condition – ситуация гонок в США; hazard – ситуация риска в Великобритании). При проведении указанного анализа могут быть использованы средства кластерного анализа (cluster analysis) возможно в сочетании с другими методами многомерного анализа (multivariate analysis).

5. Анализ процессов, протекающих в электронных, наноэлектронных, квантовых, оптических и нейронных цепях опирается на интегральные преобразования Лапласа и Фурье, а также на их естественные обобщения, которыми являются операции аналоговой и дискретной свёртки, позволяющие сверить любой новый результат с результатами общего преобразования свёртки в одномерном, двумерном и трёхмерном случаях. При этом в двумерном случае теорема о свёртке формулируется следующим образом. «Если $F(u,v)$ и $H(u,v)$ представляют собой фурье-образы функций $f(x,y)$ и $h(x,y)$, то функции $[f(x,y)*h(x,y)]$ и $[F(u,v)*H(u,v)]$ образуют фурье - пару (здесь знак * - знак свёртки), в которой выражение слева (пространственная свертка) может быть получено применением обратного преобразования Фурье к выражению справа (к произведению $F(u,v)H(u,v)$ в частотной области) и наоборот: выражение справа может быть получено применением прямого преобразования Фурье к выражению слева. Сходный результат заключается в том, что свертка в частотной области приводит к умножению в пространственной области и наоборот.» Эти два результата составляют теорему о свертке.

Литература

1. Бобровский Г.А. Операция свертки, ее применение и преобразования в электрических, электронных, оптических и нейронных цепях // Вестник Луг. Нац. Ун-та им. Владимира Даля.-2022.-№11(65).-с.180-185.
2. Круг К.А. Переходные и установившиеся процессы в линейных электрических цепях, Учебное пособие, М., 1948
3. Бобровский Г.А. Тестирование электронных схем, обладающих гистерезисной передаточной характеристикой на основе аналоговых сигнатур // Вестник Луг. Нац. Ун-та им. Владимира Даля.-2018.-№12(18).-с.25-30.
4. М.Ф. Гарднер, Дж. Л. Бернс, Переходные процессы в линейных системах, Пер. с англ., Изд-е 3-е, Физматгиз, М., 1961, 460 с.
5. Campbell G. and Foster R. Fourier integrals for practical applications. New York, van Nostrand, 1948.

6. Ионина Н.В., Орлов В.В., Павлов А.В. Лабораторный практикум «Оптические технологии искусственного интеллекта» / Учеб. Пособие.- НИУ ИТМО, 2012.- 73с.

7. Цирлин А.М., Заева М.А. Преобразования операции свёртки в сумму и асимптотическое поведение коэффициентов устойчивых полиномов.- Программируемые системы : Теория и применения, т.10, №4 (43), 2019 ,с.141- 161.

8. Tan M. Efficient: rethinking model scaling for convolutional neural networks / M. Tan, Q/ Le // International Conference on Machine Learning.-2019. - Pp. 6105-6114.

9. Краснящих А.В. Обработка оптических изображений.- СПб: НИУ ИТМО, 2012.- 129с.

Bobrowskiy G.A.

VIRTUAL EXPERIMENT IN ELECTRONIC, NANOELECTRONIC, OPTICAL AND QUANTUM CIRCUITS

Virtual experiment is an experience that can be conducted before the manufacture of a prototype, for example, before the development and manufacture of a nano device chip. This article presents materials on the organization and conduct of virtual experiments in electronic, nano-electronic, optical, quantum circuits for various purposes: in differential photodiode and phototransistor optical radiation detectors, in

circuits forming signals of a given shape, for purposes based on bipolar and unipolar nano-device and others.

Keywords: *virtual experiment, nanoelectronic (electronic, optical, quantum) circuits, bipolar (unipolar) nanotransistor, signal of a given shape, Fourier series, subcircuit, hierarchial block, Fourier spectrum, cascade connection of counters, differential (photodiode, phototransistor) detector, convolution of optical signals, Van Der Lugt correlator, optical image, joint correlator transformations, the area of stable operation of the circuit, the Schmitt trigger, signal propagation delay time, dangerous signal contests, the method of boundary analog signatures.*

Бобровский Геннадий Александрович, к.т.н., доц. кафедры микро- и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: nanobobr@bk.ru

Bobrowskiy Gennadiy, Ph.D., docent of department of micro- and nanoelectronics of «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Яковенко Валерий Владимирович, д.т.н., проф., зав. кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 21.12.2023

УДК 621.387.143:537.523.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ЗАГОТОВКУ ПРИ ТОЧЕНИИ С НАГРЕВОМ

Гаврыш В. С.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVE HEAT FLOW TO THE WORKPIECE DURING TURNING WITH HEATING

Gavrysh V. S.

В статье приведены результаты исследования эффективного теплового потока в заготовку при плазменно-механической обработке. Изучено влияние режимов нагрева на основные параметры процесса: эффективный КПД и эффективная удельная мощность плазменного нагрева.

Ключевые слова: плазмотрон, нагрев, заготовка, точение, эффективный тепловой поток.

Введение. Плазменно-механическая обработка (ПМО) является комбинированной обработкой, заключающейся в последовательном и согласованном воздействии на обрабатываемый материал плазменного нагрева и режущего инструмента. Локальный нагрев зоны стружкообразования позволяет увеличить производительность в 4–6 раз и улучшить качество обработки материалов лезвийным инструментом в 2–3 раза, что является целесообразным в тех случаях, когда традиционная механическая обработка затруднена или невозможна. Это особенно эффективно при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, находящихся все более широкое применение в машиностроении и технике [1–4].

Сдерживающими факторами более широкого использования ПМО является отсутствие специализированных надежно работающих плазмотронов, а также научно-обоснованной технологии обработки. В работах [1–4] рассмотрено влияние плазменного нагрева на механические свойства некоторых обрабатываемых материалов, приведены зависимости, определяющие влияние отдельных технологических параметров обработки на производительность и качество обработанной поверхности. Однако до сих пор остаются недостаточно исследованными вопросы оптимизации технологических процессов обработки в зависимости от температуры нагрева заготовки.

Для оптимизации процесса ПМО требуется отработка режимов, которые зависят от следующих параметров: диаметр сопла, расход

плазмообразующего газа, напряжение и ток дуги, КПД использования тепловой мощности, положение плазмотрона, скорость вращения заготовки и др. Одними из основных параметров является эффективный КПД нагрева $\eta_{\text{э}}$ и эффективная удельная мощность $q_{\text{э}}$, характеризующие степень использования тепла дуги на нагрев заготовки. Поэтому исследования по определению влияния рабочих параметров на эти величины является актуальной задачей. В работе [5] представлены результаты исследований влияния рабочих параметров ПМО на $\eta_{\text{э}}$, которые проводились плазмотроном прямого действия ПБР–402У4. Применение плазмотронов прямого действия имеет ряд недостатков, связанных с пережогами и изменением структуры материала, срывом дуги, низким ресурсом и надежностью конструкций. Использование плазмотронов косвенного действия позволяет устранить эти трудности. Поэтому целью данной работы является изучение влияния режимов ПМО с нагревом заготовки плазмотроном косвенного действия на эффективный КПД и эффективную удельную мощность нагрева.

Изложение основного материала. Для плазменного нагрева используются плазмтроны как прямого, так и косвенного действия [1–6]. Применение плазмотронов прямого действия часто приводит к пережогам и изменению структуры материала детали и поломки инструмента. Наиболее приемлемыми являются плазмтроны косвенного действия. В нашем случае при ПМО использовался плазмтрон косвенного действия с газовыхревой стабилизацией электрической дуги мощностью до 50 кВт, разработанный на кафедре легкой и пищевой промышленности ЛГУ им. В. Даля. Плазмтрон состоит из катодного, анодного узлов и межэлектродной вставки. Для ввода плазмообразующего газа (воздуха) в разрядный канал предусмотрены две камеры с раздельной подачей газа G_1 и G_2 . В качестве катода используется гафниевый или циркониевый стержень

диаметром 4 мм. Ресурс работы плазматрона составил более 50 часов.

ПМО предшествовали экспериментальные исследования плазматрона, которые проводились с целью определения его электрических и тепловых характеристик при расходе рабочего газа (воздуха) $G = (1-4) \cdot 10^{-3}$ кг/с, силе тока дуги до 200 А и диаметре разрядного канала 7 мм. Напряжение измерялось электростатическим вольтметром (класс точности 0,2), сила тока – милливольтметром (класс точности 1,5) с шунтом на 500 А, а расход воздуха – ротаметром (РС-5). Падающий характер кривых (рис. 1) объясняется шунтированием дуги в канале плазматрона. Исследования показали, что плазматрон устойчиво и стабильно работает в указанных диапазонах изменения рабочих параметров.

На рис. 2 представлены температурные характеристики плазматрона.

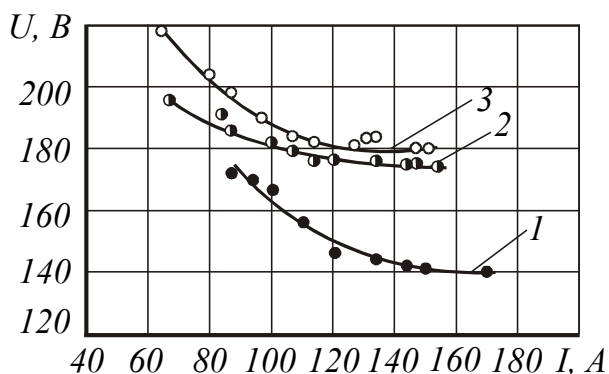


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики при $G_1 = G_2$, $G = G_1 + G_2$:

1 – $G = 1,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 – $G = 2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с;
3 – $G = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с

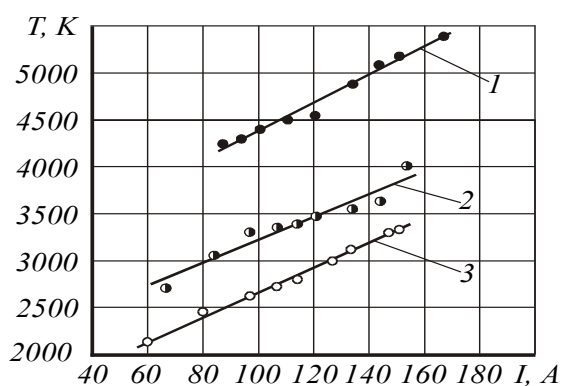


Рис. 2. Влияние рабочих параметров на среднюю температуру плазменной струи:

1 – $G = 1,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 – $G = 2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с;
3 – $G = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Тепловые характеристики плазматрона определялись методом калориметрирования (рис. 3). Из приведенных графиков видно, что тепловой КПД η увеличивается с повышением расхода рабочего газа, достигая при $I = 60$ А и $G = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с максимального значения $\eta = 0,62$.

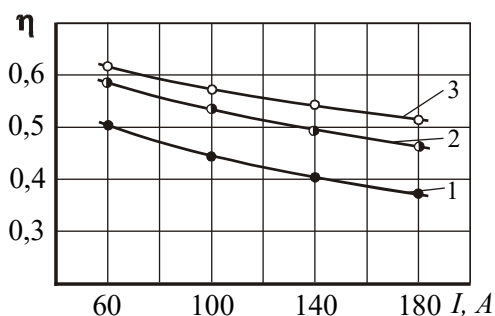


Рис. 3. Зависимость теплового КПД от рабочих параметров: 1 – $1,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 – $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3 – $3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с при $G_1 = G_2$, $G = G_1 + G_2$

Эффективную удельную мощность плазменного нагрева заготовки можно определить по известной зависимости [7]:

$$q_{\text{э}} = 0,235 \cdot \eta \cdot I \cdot U. \quad (1)$$

Эффективный КПД нагрева заготовки плазменной струей:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{q_{\text{э}}}{q}, \quad (2)$$

где q – мощность плазматрона.

В ходе экспериментов изучалось влияние на эффективный КПД и эффективную удельную мощность плазменного нагрева силы тока дуги и расхода плазмообразующего газа.

Было установлено (рис. 4), что изменение силы тока ($I = 60-180$ А) приводит к уменьшению $\eta_{\text{э}}$ от 13,5% до 11,3%, а $q_{\text{э}}$ увеличивается от 1,9 до 3,0 кВт. Это обусловлено повышением мощности струи с ростом тока. Увеличение расхода плазмообразующего газа ($G = (1,3-3,7) \cdot 10^{-3}$ кг/с, где $G_1 = G_2$, $G = G_1 + G_2$) приводит к росту $\eta_{\text{э}}$ от 9,0 до 12,7% и $q_{\text{э}}$ от 2,0 до 3,7 кВт (рис. 5).

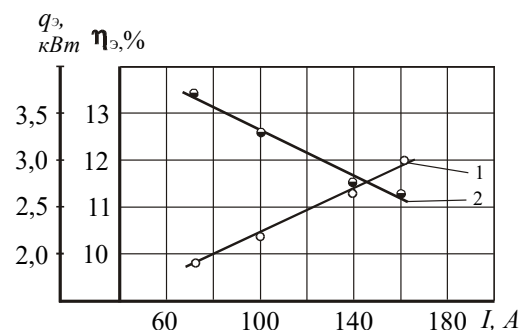


Рис. 4. Зависимости эффективного теплового потока в заготовку (1) и эффективного КПД (2) от силы тока при $G = 2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

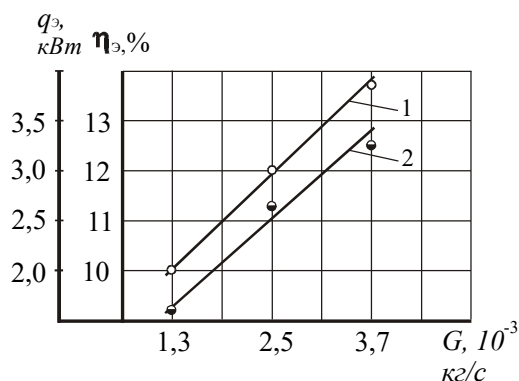


Рис. 5. Зависимости эффективного теплового потока в заготовку (1) и эффективного КПД (2) от расхода газа при $I = 160 \text{ A}$

ПМО осуществлялась на экспериментальной установке состоящей из токарно-винторезного станка модели ИТ-1М, источника питания, систем газо- и водоснабжения и плазматрона, закрепленного в специальном крепежном приспособлении, позволяющее регулировать его положение в пространстве (рис. 6). Обработке подвергались детали из стали ХГС с оплавлением части припуска плазменной струей и удалением нагретого металла резцом и с нагревом до температуры, меньшей температуре плавления материала, и удалением подогретого материала резцом. Наилучший результат обработки был достигнут при оплавлении части припуска (от половины до двух третей) плазменной струей, что позволило уменьшить работу режущего инструмента и обеспечить более глубокий прогрев материала. Режимы обработки с оплавлением или без оплавления заготовки определялись температурой плазменного потока истекающего из сопла плазматрона.

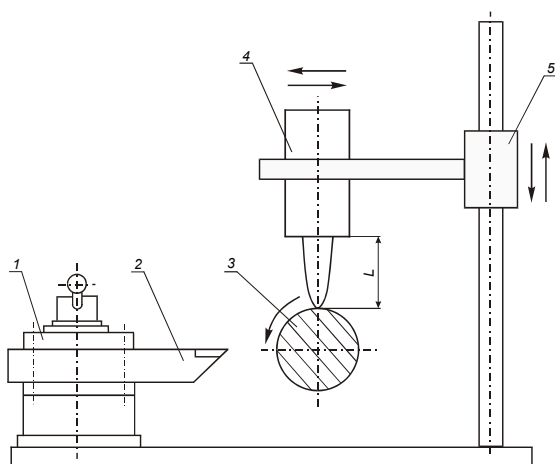


Рис. 6. Принципиальная схема установки для ПМО материалов:

1 – суппорт станка; 2 – резец; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – плазматрон; 5 – крепежное приспособление

Выводы: Экспериментальные исследования разработанного плазматрона доказали его

эффективную и стабильную работу при высоком ресурсе более 50 часов. Разработанный плазматрон можно использовать для нагрева заготовки в широком диапазоне изменения ее температуры при плазменно-механической обработке. Полученные результаты позволяют определить наиболее эффективные технологические режимы плазменно-механической обработки заготовки.

Л и т е р а т у р а

1. Гаврыш В.С., Бранспиз Е. В. Плазменно-механическая обработка заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник ЛНУ им. В.Далы, №3(33), 2020. – С. 83-88.
2. Обработка резанием труднообрабатываемых материалов с нагревом / А.Н. Строшков, Ш.Л. Теслер, С.П. Шабашов, Д.С. Элинсон. – М.: Машиностроение, 1977. – 140 с.
3. Шатерин М.А. Высокопроизводительная плазменно-механическая обработка. – Л.: ЛДНТИ, 1984. – 28 с.
4. Панков А.Е., Полуянов В.С. Плазменно-механическая обработка материалов: Обзор. – М.: НИИмаш, 1981. – 46 с.
5. Шатерин М.А., Попилов А.Л., Медко В.С. Эффективность нагрева заготовки при плазменно-механической обработке // Сварочное производство. – 1982. – №5. – С. 29-30.
6. Гаврыш В.С. Разработка плазменного оборудования для напыления и упрочнения поверхностей ножей мясоперерабатывающей промышленности // Вестник ЛНУ им. В. Дала. – 2020. – №3(33). – С. 83-88.
7. Самотугин С.С., Лещинский Л.К. Плазменное упрочнение инструментальных материалов. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.

Gavrysh V.S.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVE HEAT FLOW TO THE WORKPIECE DURING TURNING WITH HEATING

The article presents the results of a study of the effective heat flow into the workpiece during plasma machining. The influence of heating modes on the main parameters of the process is studied: effective efficiency and effective specific power of plasma heating.

Keywords: plasma torch, heating, workpiece, turning, effective heat flow.

Гаврыш Владимир Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Легкая и пищевая промышленность» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Дала», г. Луганск.
E-mail: gavrysh@bk.ru

Gavrysh Vladimir Sergeevich, PhD, associate professor, associate professor of «Light and food industry» department, «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.тех.н., профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Дала»,

Статья подана 15.12.2023

УДК 614.895.5

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕРМОЗАЩИТНОГО ПАКЕТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ

Дейнека И. Г., Соболева Н. С.

CALCULATION OF THE OPTIMAL THICKNESS OF THE THERMAL PROTECTION PACKAGE FOR THE MANUFACTURE OF SPECIAL CLOTHING

Deineka I. G., Soboleva N. S.

В статье рассмотрены нестационарные процессы теплопередачи в термозащитном пакете и предложена методика расчета оптимальной толщины пакета в зависимости от теплофизических свойств материалов, входящих в пакет.

Ключевые слова: теплозащита, термозащитный пакет

Введение. Проблема теплозащиты является одной из основных в деятельности пожарных, горноспасателей, а также рабочих в цехах термохимических производств черной и цветной металлургии при горячей обработке металлов и в других производствах, связанных с выделением большого количества теплоты от материалов и агрегатов. Опасность указанных работ состоит в том, что они характеризуются высокими термическими нагрузками на человека в результате вредного теплового воздействия на его организм внешней нагревающей среды. Такие условия труда неизбежно связаны с повышенным профессиональным риском для здоровья человека, а порой и для его жизни. Тепловое воздействие на организм может привести к его перегреванию и тепловому удару. Поэтому одной из важнейших задач является разработка средств индивидуальной защиты от высокотемпературного воздействия. Как правило, средства индивидуальной защиты от высокотемпературного воздействия создаются на основе многослойных термозащитных пакетов.

При разработке термозащитных пакетов ведущую роль играет правильный выбор материалов в составе пакета, который базируется на оценке его теплозащитных свойств. Оценка теплозащитных свойств пакета сводится к нахождению зависимости температуры на внутренней стороне пакета от теплофизических свойств материалов, толщины пакета и времени.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследовательские и практические работы в области создания термозащитных пакетов ведутся достаточно давно, они зачастую сводятся к разработке и испытанию новых материалов, что

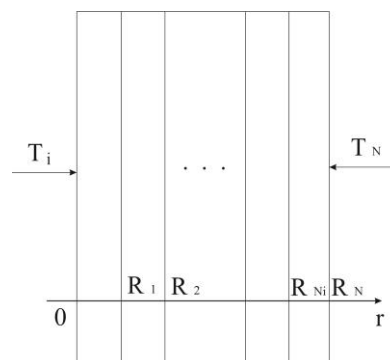
является одним из самых важных фактов, но не единственным, так как за счет лишь свойств материалов невозможно обеспечить весь комплекс требований, предъявляемых к спецодежде.

В настоящее время при разработке новых видов термозащитных пакетов применяются методы оценки теплозащитных свойств пакета в конечных разностях, что приводит к ошибкам в результатах.

Цель исследования. При выборе материалов для термозащитных пакетов необходимо провести серии экспериментов, которые требуют значительных временных и материальных затрат. Методы математического моделирования с использованием компьютерной техники позволяют провести серию экспериментов, меняя параметры термозащитных пакетов. Адекватность математической модели можно проверить экспериментальным путем.

Целью настоящей работы является оптимизация толщин слоев в термозащитном пакете, используя ограничения на массу пакета и ограничения на толщину каждого слоя.

Рассматривается неограниченный плоский термозащитный пакет, состоящий из N прослоек: от 0 до R_1 – первая прослойка; от R_{i-1} до R_i – i -тая прослойка; от R_{N-1} до R_N – N -я прослойка. Высокотемпературное поле TN воздействует справа от пакета, а защищаемый объект слева от него (рис. 1).



Материалы и результаты исследования. В работе [2] получена зависимость температуры термозащитного пакета на внутренней стороне в

зависимости от времени, теплофизических характеристик материалов и толщины пакета (1).

$$V = B_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_{i,n} \sin(\varphi_{i,n}) \cdot e^{-v_n^2} \cdot \sum_{m=1}^N \left(\frac{K_m}{k_m} C_{m,n} \cdot \int_0^{R_m} (T_0 - A_m r_m - B_m) \sin\left(\frac{v_n r_m}{\sqrt{k_m}} + \varphi_{m,n}\right) dr_m \right)}{0,5 \cdot \sum_{m=1}^N \left(\frac{K_m}{k_m} C_{m,n} \left(R_m - \frac{\sqrt{k_m}}{v_n} \left(\sin\left(\frac{v_n R_m}{\sqrt{k_m}} + \varphi_{m,n}\right) \cdot \cos\left(\frac{v_n R_m}{\sqrt{k_m}} + \varphi_{m,n}\right) - \sin(\varphi_{m,n}) \cdot \cos(\varphi_{m,n}) \right) \right) \right)}, \quad (1)$$

где V – температура на внутренней стороне пакета;

$k_i = \frac{K_i}{c_i p_i}$ – температуропроводность i -той

прослойки;

K_i – теплопроводность;

c_i – удельная теплоемкость;

p_i – плотность;

T_0 – начальная температура пакета;

T_1 – температура защищаемого объекта;

T_N – температура на внешней стороне пакета (температура источника);

α_i – коэффициент теплоотдачи защищаемого объекта;

$$A_i = \frac{T_N - T_1}{K_i \left(\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=i}^N \frac{R_k}{K_k} \right)};$$

$$B_i = T_N - \frac{(T_N - T_1) \left(\frac{R_i}{K_i} + \sum_{k=i+1}^N \frac{R_k}{K_k} \right)}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=i}^N \frac{R_k}{K_k} \right)};$$

$$\varphi_{i,n} = \arctg \left(\frac{K_i v_n}{\alpha_i \sqrt{k_i}} \right);$$

$$\varphi_{j+l,n} = \arctg \left(\frac{K_{j+1} \sqrt{k_j}}{K_j \sqrt{k_{j+1}}} \operatorname{tg} \left(\frac{v_n R_j}{\sqrt{k_j}} + \varphi_{j,n} \right) \right);$$

$$C_{l,n} = 1;$$

$$C_{j+l,n} = C_{l,n} \frac{\sin \left(\frac{v_n R_j}{\sqrt{k_j}} + \varphi_{j,n} \right)}{\sin(\varphi_{j+l,n})};$$

v_n – положительные, упорядоченные по

возрастанию корни уравнения $\sin \left(\frac{v R_N}{\sqrt{k_N}} + \varphi_N \right) = 0$.

Для вычислений по формуле (1) составлена компьютерная программа.

В работе [2] используя массовое имитационное моделирование средствами компьютерной техники и переборе различных вариантов расположения слоев, обнаружено, что наилучшие теплозащитные свойства теплоизоляционный пакет приобретает при расположении слоев материалов в порядке возрастания их температуропроводностей от внутреннего слоя, примыкающего к защищаемому объекту, к наружному, контактирующему с источником тепла, чем при ином расположении слоев.

С использованием планирования эксперимента предложена линейная аппроксимация зависимости температуры на внутренней стороне пакета от теплофизических свойств материалов, входящих в пакет, толщины пакета и времени:

$$V = \left(\alpha_0 + \sum_{i=1}^N a_i * r_i \right) * t + \left(b_0 + \sum_{i=1}^N b_i * r_i \right), \quad (2)$$

Выражая время из уравнения (2), получаем

$$t = \frac{V - \left(b_0 + \sum_{i=1}^N b_i * r_i \right)}{\left(\alpha_0 + \sum_{i=1}^N a_i * r_i \right)}.$$

Основной задачей при разработке термозащитных пакетов является увеличение времени комфортного пребывания и работы человека в высокотемпературной среде до достижения температуры 50°C на внутренней стороне пакета.

Выбор оптимальных толщин слоев термозащитного пакета сводится к решению задачи максимизации функции времени

$$t = \frac{V - \left(b_0 + \sum_{i=1}^N b_i * r_i \right)}{\left(\alpha_0 + \sum_{i=1}^N a_i * r_i \right)} \rightarrow \max \quad \text{при следующих}$$

ограничениях:

- вес термозащитного комплекта не должен превышать заданного

$$S \sum_{i=1}^N r_i p_i \leq M.$$

где S – площадь поверхности комплекта.

- толщины каждого слоя термозащитного комплекта должны лежать в определенных пределах

$$\begin{cases} r_1 \leq r_1^1 \\ r_1 \geq r_1^0 \\ \dots \\ r_N \leq r_N^1 \\ r_N \geq r_N^0 \end{cases}$$

Эта задача решается методами нелинейного математического программирования.

При численной реализации рассматривались три материала (табл. 1)

В качестве защищаемого объекта рассматривался человек. Средневзвешенный коэффициент теплоотдачи человека $\alpha_1 \approx 9,1$, средневзвешенная температура человека $T_1 \approx 33^\circ\text{C}$, критическая температура для человека 50°C , температура на внешней стороне пакета $T_N \approx 500^\circ\text{C}$, начальная температура пакета $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$.

Таблица 1

Материалы и их теплофизические характеристики

Код образца	Материал	Ограничения на толщину материала, мм	Теплопроводность, Вт/м*град	Удельная теплоемкость, Дж/кг*град	Плотность, кг/м ³
K _н	Кожа натуральная	[1.7; 1.9]	0,105	1566	1870
K _и	Искусственная кожа	[0.7; 1.1]	0,102	1839	1525
O ₁	Полиуретановое покрытие на нетканом полотне	[0.5; 0.6]	0,07	1422	1250

Температура на внутренней стороне пакета имеет вид

$$V = (0,935 - 240,61r_1 - 157,064r_2 - 82,316r_3)t + (-16,64 + 2488,222r_1 + 1244,356r_2 + 1494,95r_3).$$

На изготовление термозащитного комплекта (комбинезон и куртка) требуется в среднем 3,5 м² материала на каждый слой. Ограничение на вес комплекта 19 кг. Ограничения на толщину каждого слоя $r_1 \in [1,7 \text{ мм}; 1,9 \text{ мм}]$, $r_2 \in [0,7 \text{ мм}; 1,1 \text{ мм}]$, $r_3 \in [0,5 \text{ мм}; 0,6 \text{ мм}]$. Составляем систему ограничений

$$\begin{cases} (1870r_1 + 1525r_2 + 1250r_3) \leq \frac{19}{3,5} \\ r_1 \geq 0,17 \cdot 10^{-2} \\ r_1 \leq 0,19 \cdot 10^{-2} \\ r_2 \geq 0,9 \cdot 10^{-3} \\ r_2 \leq 0,11 \cdot 10^{-2} \\ r_3 \geq 0,5 \cdot 10^{-3} \\ r_3 \leq 0,6 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (3)$$

Составляем целевую функцию времени

$$t = \frac{50 - (-16,64 + 2488,222r_1 + 1244,356r_2 + 1494,95r_3)}{(0,935 - 240,61r_1 - 157,064r_2 - 82,316r_3)}, \quad (4)$$

Максимизируя функцию (4) при системе ограничений (3) методами нелинейного программирования с использованием математического пакета Maple 11, получаем

$$r_1 \approx 0,175 \cdot 10^{-2}, r_2 \approx 0,9 \cdot 10^{-3}, r_3 \approx 0,5 \cdot 10^{-3}, t \approx 183$$

Выводы. Анализ результатов исследования показал, что при использовании материалов из табл. 1 для создания термозащитного комплекта обладающего оптимальными термозащитными характеристиками будет комплект, в котором слои материалов расположены следующим образом:

- внутренний слой – кожа натуральная, толщина 1,75 мм;
- средний слой – кожа искусственная, толщина 0,9 мм;
- наружный слой – полиуретановое покрытие на нетканом полотне, толщина 0,5 мм.

Время достижения температуры 50⁰С на внутренней поверхности комплекта при температуре источника 500⁰С составляет 183 с.

Методика аппроксимации может быть использована при разработке термозащитных пакетов, например, для специальной одежды.

Л и т е р а т у р а

- ГОСТ 11209-2014. Ткани для специальной одежды. Общие технические требования. Методы испытаний.
- Туголуков Е.Н. Решение теплопроводности методом конечных интегральных преобразований: Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб.гос.техн.ун-та., 2005. – 116 с.

Deineka I.G., Soboleva N.S.

CALCULATION OF THE OPTIMAL THICKNESS OF THE THERMAL PROTECTION PACKAGE FOR THE MANUFACTURE OF SPECIAL CLOTHING

The article considers non-stationary heat transfer processes in a thermoprotective package and proposes a method for calculating the optimal thickness of the package

depending on the thermophysical properties of the materials included in the package.

Keywords: *thermal protection, thermal protection package.*

Дейнека Иннеса Григорьевна, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой легкой и пищевой промышленности ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: igdeineka@yandex.ru

Соболева Надежда Сергеевна, старший преподаватель кафедры легкой и пищевой промышленности ФГБОУ ВО «Луганский

государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: sns-a@mail.ru

Deyneka Innesa, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Light and Food Industry, «LSU named after V. Dahl».

Soboleva Nadezhda, senior lecturer of the Department of Light and Food Industry, «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., проф., проректор по научной работе и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана 15.12.2023

УДК 004.852

АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИМ ИГРАМ В КОНТЕКСТЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Клипаков С. А., Таращанский М. Т.

ALGORITHM FOR TEACHING CLASSICAL GAMES IN THE CONTEXT OF REINFORCEMENT LEARNING

Klipakov S.A., Tarashchanskii M.T.

В работе рассматривается задача обучения агентов игре в различные классические игры, такие как шахматы, шашки, нарды и другие, с помощью методов обучения с подкреплением. Авторы предлагают дополненный алгоритм обучения с подкреплением, который сочетает в себе идеи из классического обучения с подкреплением и уже реализованный алгоритм AlphaZero. Будет описана общая концепция использования RL для обучения играм на двоих. Алгоритм также включает в себя механизм начальной обработки весов с использованием имеющейся базы данных «сильных» игроков.

Ключевые слова: обучение с подкреплением, игры на двоих.

Введение. Классические игры, такие как шахматы, шашки, нарды и т.д., являются интересными и сложными объектами для исследования в области искусственного интеллекта. Эти игры имеют четкие правила, большое пространство состояний и действий, и требуют от игроков способности к стратегическому мышлению, планированию и адаптации. Существует много подходов к обучению агентов, способных играть в эти игры на высоком уровне, но одним из наиболее перспективных подходов является обучение с подкреплением (RL).

В последние годы было предложено несколько прорывных алгоритмов обучения с подкреплением для классических игр, таких как AlphaZero, MuZero и Expert Iteration. Эти алгоритмы используют глубокие нейронные сети для аппроксимации стратегии и функции ценности, а также монте-карло поиска для усиления своих решений. Однако, в данной публикации авторами опущена работа с нейронными сетями (см., например, [3-5]), а основной упор сделан на выведении общего алгоритма обучения играм на двоих в контексте обучения с подкреплением. В данной работе поведение агента выражено классической функцией ценности, вместо нейронной сети как, например, в AlphaZero.

Краткий экскурс в обучение с подкреплением. Концепция обучения с подкреплением [1] (далее RL) строится на взаимодействии агента и среды, которое выражено в циклическом обмене: в момент времени t агент получает от среды наблюдение O , отвечает на него действием A и получает награду r , после чего среда меняет свое состояние S , время меняется на $t+1$ и цикл начинается заново. Получив одну или несколько наград, агент меняет свое поведение, увеличивая или уменьшая вероятность выполнения действия A в состоянии S в будущем в зависимости от награды. Схематично взаимодействие агента со средой представлено на рис. 1.

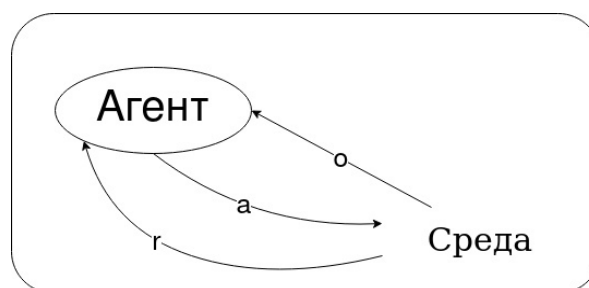


Рис. 1

Математическая модель RL описывается набором параметров $(S, A, P, O, R, \sigma, r)$, где $S = \{s\}$ – множество возможных состояний среды;

$A = \{a\}$ – множество возможных действий агента;

$P_{ss'}^a : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$ – функция перехода, возвращающая вероятность перехода среды из состояния s в состояние s' при совершении агентом действия a ;

$O = \{o\}$ – множество возможных наблюдений агента;

$\sigma(s, o): S \times O \rightarrow [0, 1]$ – функция наблюдения, возвращающая вероятность получения агентом наблюдения O в состоянии S ;

$R = \{r\}$ – множество значений наград;

$r(s, a, s'): S \times A \times S \rightarrow R$ – функция вознаграждения, получаемого агентом при совершении действия a в состоянии S и при переходе среды в состояние S' .

Схематично математическая модель RL представлена на рис. 2.

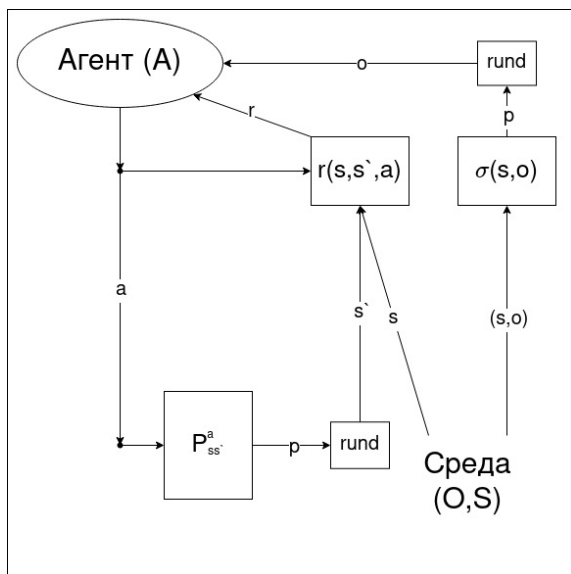


Рис. 2

Статистика уже реализованного алгоритма для обучения в играх шахматы, сёги и го (AlphaZero). С использованием подхода RL созданы обученные агенты, выраженные нейронными сетями, которые показывают сверхчеловеческий уровень в играх шахматы, сёги и го. Также, исходя из статистики, приведенной в работе [2], данные агенты показывают результаты выше, чем программы, использующие другие подходы. Таким образом, имеет место утверждение об универсальности использования методов RL для обучения классическим играм на двоих.

Термины в контексте игр. В качестве обучаемого агента выступает игрок. Под игрой понимается детерминированная эпизодическая дискретная многоагентная среда с полной информацией. Вторым агентом является соперник, которые может не менять свою политику поведения, в ходе обучения игрока. Политика поведения игрока основана на Q-функции.

Игра. Под игрой в данной работе будет пониматься ориентированный граф (E) , вершинами которого являются состояния (S) , а направленными ребрами – действия a . Пример такого графа приведен на рис. 3.

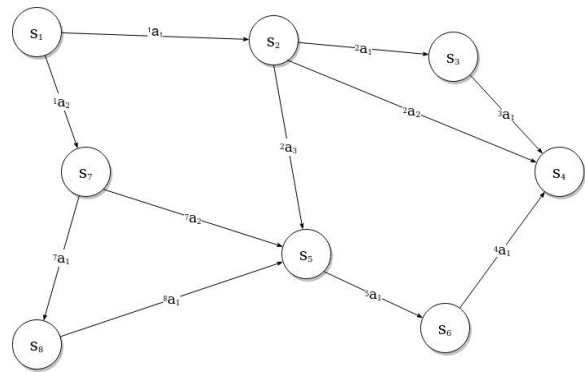


Рис. 3

Таким образом, для каждой игры есть множество состояний $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где $n \in \mathbb{N}$ и множество действий $A = \{A(s_1), A(s_2), \dots, A(s_n)\}$,

где $A(s_i) = \{^i a_m, ^i a_m, \dots, ^i a_m\}$, $m \in \mathbb{N}$. Игроки совершают ходы поочередно.

Обучаемый игрок. Поведение игрока определяет функция ценности хода $Q(a)$, схематично показанная на рис. 4. Q-функция возвращает число в соответствии с парой (состояние, действие). Значение Q-функции отображает количество побед и поражений обучаемого игрока после выполнения действия a в состоянии S (в данной работе верхний левый индекс действия обозначает номер состояния и Q-функция принимает на вход только действия).

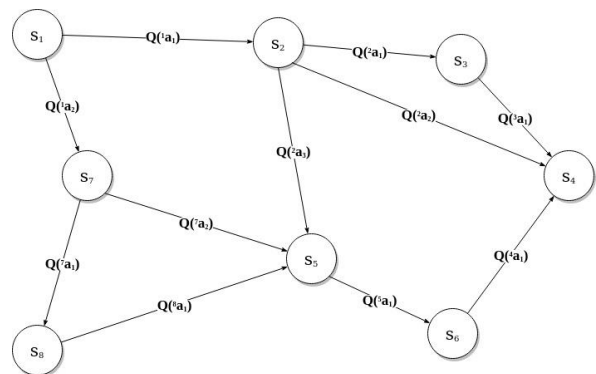


Рис. 4

В начале обучения все значения Q-функции равны нулю и изменяются по мере накопления опыта игроком. Процесс накопления опыта осуществляется посредством изменения весов Q-функции по формуле:

$$Q^{new}(a) = Q^{old}(a) + f(n) \cdot R,$$

где $Q^{old}(a)$ – веса действий игрока до изменения, $Q^{new}(a)$ – измененные веса, $f(n)$ – некоторая

убывающая функция с областью значений $[0,1]$, зависящая от номера хода (для начальных ходов в партии ее значение близко к 0, а в терминальном состоянии 1) и R – награда. Действия в каждом состоянии выбираются как $\max(Q(i,a))$ (максимум среди весов действий в i -м состоянии), если таких максимумов несколько, то выбирается случайный из них.

Оценкой игры для игрока выступает награда R , отображающая исход партии. Например, награда может принимать значения -1 – за поражение, 0 – за ничью, 1 – за победу.

Учитель. Так как в начале обучения все веса графа политики равны нулю, то игрок каждый ход будет совершать случайное действие, и так будет продолжаться до тех пор, пока соперник выводит игрока из известных партий, то есть соперник будет определять качество обучения игрока. Таким образом, имеет смысл искусственно задать некоторые значения функции ценности хода до начала накопления опыта, чтобы игрок до начала обучения имел «хорошие» партии в памяти. Такие партии, например, можно взять в базе данных уже сыгранных игр людей, которые себя хорошо показали в данной игре (например, для шахмат можно использовать игры гроссмейстеров). Таким образом, после задания начальных значений Q -функции при обучении посредством накопления опыта игрок будет совершать ходы, которые, исходя из данной ему базы, чаще приводят к победе, до тех пор, пока соперник не выведет его из множества известных партий.

Соперник. Соперник выступает в роли тренажера для накопления опыта игроком. Соперник также важен для обучения игрока, хотя он не влияет на конечный результат обучения, но от него может сильно зависеть скорость обучения. Соперник, например, может быть выбран из уже существующих программ, произвольным образом или из версий обучаемого игрока. Способ выбора соперника зависит от конкретной игры и способа обучения игрока.

Алгоритм обучения. Основными отличиями обучения играм на двоих от классического обучения являются сложность среды и наличие второго игрока (соперника), к которому обучаемый агент со временем приспособится. Алгоритм обучения играм на двоих состоит из следующих пунктов:

- задание правил игры графом (правила также задают терминальное состояние и награду);
- формирование начальных (учительских) весов Q -функции для ускорения обучения;
- формирование поведения соперника;
- накопление опыта и корректировка Q -функции на партиях с соперником;
- получившуюся политику поведения можно корректировать до получения необходимого результата, изменяя поведение соперника или

дополняя начальные (учительские) веса с помощью новых отобранных данных;

Заключение. В данной работе был описан алгоритм обучения с подкреплением на примере обучения классическим «шахматоподобным» играм на двоих. Основными недостатками данного алгоритма являются время и вычислительные ресурсы, потраченные на обучение, которые зависят от выбора учительской базы данных, функции накопления опыта и соперника. Чтобы алгоритм заработал, может потребоваться много попыток с выбором разных баз данных соперников и функций накопления опыта.

Л и т е р а т у р а

1. Петренко В.И. Классификация задач мультиагентного обучения с подкреплением // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН – 2021. № 3 (101) – С.32-44.
2. David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Arthur Guez, Marc Lanctot, Laurent Sifre, Dharmashan Kumaran, Thore Graepel, Timothy Lillicrap, Karen Simonyan, Demis Hassabis. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play // Silver et al., Science – 2018. 362, P.1140–1144.
3. Seyed Sajad Mousavi, Michael Schukat, and Enda Howley. Deep Reinforcement Learning: An Overview // Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) – 2016. – P.426-440.
4. Бородин Г.Д. Краткий обзор и классификация искусственных нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки - 2021. - Вып. 11 – С.45-53.
5. Судхарсан Равичандиран. Глубокое обучение с подкреплением на Python. OpenAI Gym и TensorFlow для профи. СПб.: Питер, 2019. – 251 с.

Клипаков Станислав Андреевич, магистрант кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: klipakov.ai@yandex.ru

Тарашанский Марк Танкумович, к.т.н., доцент, профессор кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».
E-mail: mark.tarashchanskii@gmail.com

Klipakov Stanislav Andreevich., graduate student in «Applied mathematics» of «LSU named after V. Dahl».

Tarashchanskii Mark Tankumovich, Cand.Sci(Tech.), Prof. in «Applied mathematics» of «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения и инженерного консалтинга» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 19.11.2023

УДК 53:372.8

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Корсунов К. А., Лыштван Е. Ю., Харченко Е. И., Чаленко А. В.

INVESTIGATION OF NONLINEAR OSCILLATORY SYSTEMS BY THE METHOD OF COMPUTATIONAL EXPERIMENT

Korsunov K. A., Lyshtvan E. Y., Kharchenko E. I., Chalenko A. V.

В работе методом вычислительного эксперимента исследованы особенности влияния амплитуды внешней силы на колебательное движение математического маятника с учетом силы трения. Уравнения математической модели решались численно методом Эйлера-Кромера в среде компьютерной математики Matlab. Продемонстрировано существование двух различных режимов движения маятника в зависимости от амплитуды внешней силы – режима регулярных колебаний и режима хаотических колебаний, а также определены условия перехода к хаотическим колебаниям.

Ключевые слова: нелинейные колебания, хаос, хаотические колебания, регулярный и хаотический режимы колебаний, схема Эйлера-Кромера.

Введение. Появление и развитие систем компьютерной математики открывает возможности для проведения различных вычислительных экспериментов с математическими или имитационными моделями, описывающими поведение сложных нелинейных физических систем в некотором промежутке времени. Значительный интерес с этой точки зрения представляют колебательные системы, в которых возможно возникновение таких явлений, как хаотические колебания. Как известно, в 70-х годах XX века было обнаружено новое явление в области нелинейной динамики – хаотические колебания, которые представляют собой возникновение неупорядоченных движений в совершенно детерминированных системах [1-3]. Они были обнаружены даже в простых задачах с одной степенью свободы, таких как колебания маятника. С математической точки зрения существование хаотических колебаний означает, что нелинейные дифференциальные уравнения могут иметь ограниченные непериодические решения, которые ведут себя случайным образом, хотя в этих уравнениях нет случайных параметров. Это способствовало развитию новых математических идей, таких как странный аттрактор, отображение Пуанкаре, фрактальная размерность для того, чтобы описывать и изучать хаотические явления [1]. Таким

образом, тема исследования хаотических колебаний в различных нелинейных системах является актуальной.

Цель работы заключается в демонстрации возможности применения современных систем компьютерной математики к исследованию хаотических колебаний в нелинейных системах методом вычислительного эксперимента.

Математическая модель. В качестве нелинейной колебательной системы выберем математический маятник на жестком стержне длиной l , на который действует сила тяжести mg , сила со стороны стержня T , сила трения, пропорциональная скорости

$$\vec{F}_{mp} = -\alpha \vec{v}, \quad (1)$$

и внешняя периодическая сила

$$\vec{F} = -F_0 \sin(\Omega t) \vec{v} / v. \quad (2)$$

Исходя из рис.1, второй закон Ньютона для вращательного движения запишется в виде:

$$ml^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mgl \sin \varphi - \alpha l \frac{d\varphi}{dt} + F_0 l \sin \Omega t,$$

или

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \varphi - \alpha \frac{d\varphi}{dt} + F_0 \sin \Omega t \quad (4)$$

Это уравнение и есть основное уравнение модели маятника. Оно должно быть дополнено начальными условиями:

$$\varphi(0) = \varphi_0, \varphi'(0) = \omega_0 \quad (5)$$

Уравнение (4) решалось численно в среде компьютерной математики *Matlab* методом Эйлера-Кромера [4].

Значения параметров системы были выбраны следующим образом:

- длина маятника $l = 9,8 м$,
- коэффициент затухания в относительных единицах $\alpha = 0,5$;
- частота внешней силы $\Omega = 2/3 рад/с$;
- начальное значение угла отклонения $\phi_0 = 0,2$;
- начальное значение угловой скорости $\omega_0 = 0 рад/с$.

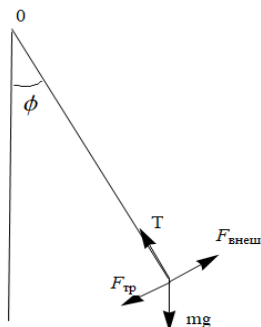


Рис. 1. Диаграмма сил для математического маятника

Уравнение решалось на промежутке времени $tspan = [0, 10] с$, величина шага по времени была взята равной $delta = 0,001$.

В программе имеется одна особенность. Обычно рассматривают колебания маятника в диапазоне углов отклонения $-\pi < \phi < \pi$, т.е. маятник не проходит через верхнее вертикальное положение, однако, для общности картины,

необходимо включить в рассмотрение и такие случаи. При этом после каждого поворота к углу ϕ будет добавляться 2π . Физически положение маятника при углах, отличающихся на угол, кратный 2π , будет одно и то же. Для построения графиков и их анализа удобно удерживать значения угла отклонения в диапазоне $|\phi| < \pi$. Для этого, если на каком-то шаге вычислений величина угла ϕ окажется больше π , она заменялась на угол $\phi - 2\pi$, а если меньше $-\pi$ – то на угол $\phi + 2\pi$. Таким образом, величина угла удерживалась в требуемом диапазоне.

Регулярное и нерегулярное движение математического маятника. Рассмотрим изменение характера движения маятника с возрастанием амплитуды внешней силы. На рис. 2 представлены зависимости угла отклонения маятника от времени для двух значений амплитуды внешней силы. Из их анализа можно сделать следующие выводы. При небольшой величине амплитуды внешней силы $F_0 = 0,5$ одновременно существуют два типа колебаний – затухающие колебания, вызванные начальным смещением маятника, и вынужденные колебания, вызванные действием внешней силы. Частота последних равна частоте внешней силы. Колебания первого типа быстро затухают, и остаются только вынужденные колебания. Их амплитуда определяется балансом энергии, теряемой за счет работы против силы трения, и энергии, получаемой за счет работы внешней силы.

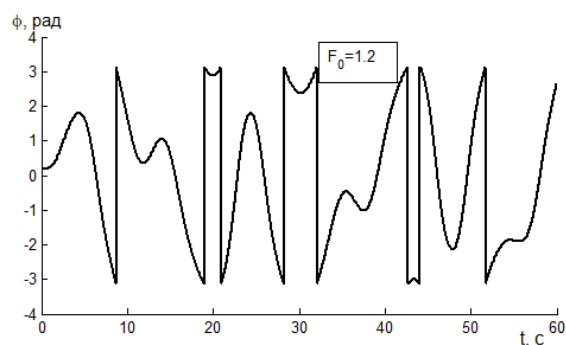
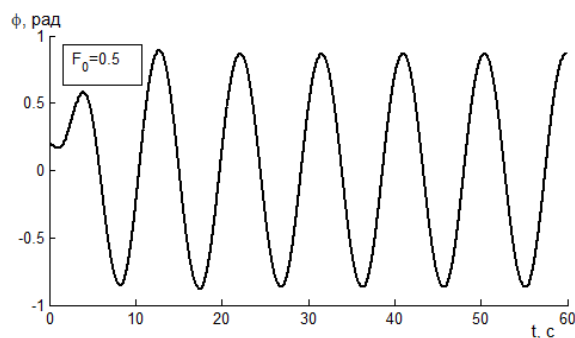


Рис. 2. Зависимость угла отклонения маятника от времени для различных режимов

Поведение маятника существенно изменяется при увеличении значения амплитуды внешней силы. Теперь движение маятника имеет очень сложный вид. Отметим, что разрывы непрерывности на графике связаны с пересчетом углов, а не с характером движения маятника. Движение маятника становится, в отличие от предыдущего случая, совершенно нерегулярным, т.е. в нем отсутствуют какие-либо повторения. Можно было бы подумать, что с течением времени оно станет периодическим, но более подробное исследование показывает, что

этого не произойдет никогда. Именно такое поведение системы и называется *хаотическим*. С физической точки зрения оно представляет наибольший интерес, так как при этом проявляется действие совершенно новых закономерностей.

Причины возникновения хаотических колебаний. Как видно, хаотические колебания, с одной стороны, являются непредсказуемыми, а с другой стороны – получены как решение обычного детерминистского дифференциального уравнения (4) с начальными условиями (5). Чтобы установить

причины появления хаотических колебаний, исследуем устойчивость полученного решения относительно начальных условий, т.е. выясним, как небольшие изменения начальных условий влияют на решение.

Для этого рассмотрим два решения, соответствующие двум близким начальным условиям. Возьмем $\varphi_{01} = 0,2 \text{ рад}$ и $\varphi_{02} = 0,201 \text{ рад}$. Таким образом, в начальный момент времени разность углов для двух колебаний составляет 0,001 рад. Рассмотрим, как эта разность

будет изменяться с течением времени. Для этого построим график зависимости модуля разности углов $\Delta\varphi(t) = |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)|$. Сначала рассмотрим случай внешней силы с небольшой амплитудой $F_0 = 0,5$. Остальные параметры системы такие же, как и в предыдущем случае. Результат расчета приведен на рис. 3. Для удобства анализа по вертикальной оси использован логарифмический масштаб.

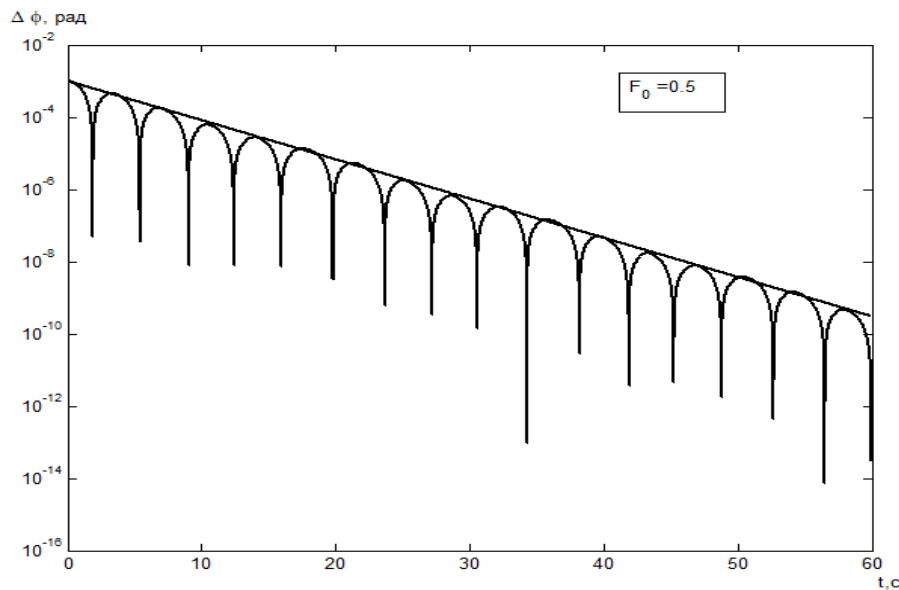


Рис. 3. Зависимость разности двух решений с близкими начальными условиями от времени для небольшой амплитуды внешней силы

Проанализируем полученный результат. Прежде всего, не следует обращать внимание на резкие провалы на графике, которые периодически повторяются. Они происходят в моменты, когда один из маятников проходит точку поворота, т.е. меняет знак скорости. После этой точки траектории двух маятников должны пересечься, т.е. $\Delta\varphi$ станет равным нулю, что и приведет к резкому выбросу на логарифмическом графике. Большой интерес представляет область сравнительно плавного изменения графика. Как видно из графика, разность $\Delta\varphi$ резко уменьшается с возрастанием времени – на шесть порядков за примерно 15 периодов колебаний. Траектории движения двух маятников будут сближаться и, после определенного времени, будут просто совпадать. Движение маятника является полностью предсказуемым. Как известно, такое решение называется асимптотически устойчивым относительно изменения начального условия или асимптотически устойчивым по Ляпунову.

Из анализа данных рис. 3 можно сделать вывод, что в целом зависимость разности углов от

времени в логарифмическом масштабе описывается линейной функцией. Это значит, что в обычном масштабе зависимость является степенной, или экспоненциальной

$$\Delta\varphi = a e^{\lambda t} \quad (6)$$

Показатель экспоненты λ называется показателем Ляпунова [3]. В данном случае $\Delta\varphi$ является убывающей функцией и показатель Ляпунова отрицателен: $\lambda < 0$. Оценка величины параметров зависимости (3) дает результат: $a \approx 10^{-3}$, $\lambda \approx -0,25$. Эта зависимость показана на рис. 3 прямой линией.

На рис. 4 приведена зависимость разности углов отклонения двух маятников от времени при увеличении амплитуды внешней силы до $F_0 = 1,2$. Характер этой зависимости оказывается совершенно отличным от предыдущего случая. Разность углов отклонения двух маятников резко и нерегулярно возрастает с течением времени – примерно на пять порядков за 70 секунд. Траектории маятников расходятся.

В среднем, эту зависимость можно также описать экспоненциальной функцией (6), но на этот раз с положительным показателем Ляпунова. Оценка ее параметров дает значения $a \approx 2 \cdot 10^{-5}$, $\lambda \approx 0,2$. Эта зависимость показана на рис. 4 прямой линией.

Из приведенных данных видно, что при значении амплитуды внешней силы $F_0 = 1,2$ траектории двух маятников с близкими, но не равными начальными условиями, резко расходятся с возрастанием времени. Это значит, что поведение маятника в случае внешней силы $F_0 = 1,2$ является непредсказуемым. Действительно, для расчета движения маятника необходимо задать начальные

условия. Но даже малое изменение этих условий приведет уже к совсем другому движению. Следовательно, для расчета, результаты которого представляли бы практический интерес, необходимо задать начальные условия с бесконечной точностью, что, конечно, невозможно. Такое движение называется *хаотическим*. Оно не может быть периодическим. Действительно, через период начальные условия должны воспроизвестись, движение будет повторяться и т.д. Но начальные условия не могут воспроизвестись абсолютно точно. Поэтому движение после первого ожидаемого периода будет уже другим и периодичности не будет.

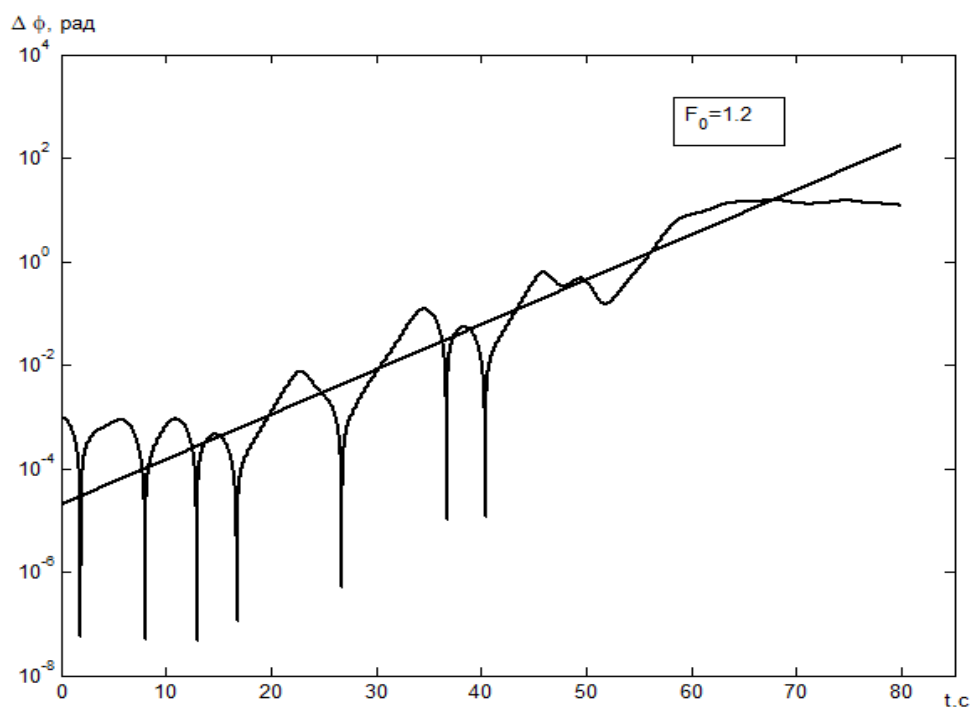


Рис. 4. Зависимость разности двух решений с близкими начальными условиями от времени для большой амплитуды внешней силы

Еще раз отметим, что причиной перехода в хаотический режим является чрезвычайно сильная зависимость решения уравнения движения от начальных условий.

Режим, в котором находится математический маятник, определяется величиной показателя Ляпунова. Так, при $\lambda < 0$ система находится в режиме регулярного движения, при $\lambda > 0$ — в режиме хаотического движения. Значение $\lambda = 0$ соответствует переходу от одного режима к другому.

Дополнительную информацию о движении маятника можно получить при рассмотрении фазовых диаграмм его движения, т.е. зависимостей угловой скорости от угла отклонения $\omega \varphi$. На рис.

5 представлены такие диаграммы для двух различных режимов движения маятника — регулярного $F_0 = 0,5$ и хаотического $F_0 = 1,2$.

Вид диаграммы для регулярного движения легко объяснить. В этом случае в системе существуют два типа колебаний — колебания, вызванные начальным возмущением, и колебания за счет действия внешней силы. Колебания первого типа быстро затухают вследствие действия силы трения. В результате остаются колебания с частотой внешней силы. Их амплитуда определяется балансом потери энергии за счет работы силы трения и получением энергии за счет работы внешней силы. В результате получается регулярная траектория (колебания).

Фазовая диаграмма для режима хаотического движения маятника имеет сложный вид. В ней отсутствуют замкнутые кривые, характерные для регулярного режима. На первый взгляд она кажется

полностью хаотичной, но более подробный математический анализ, который мы здесь не рассматриваем, позволяет выявить в ней определенные закономерности.

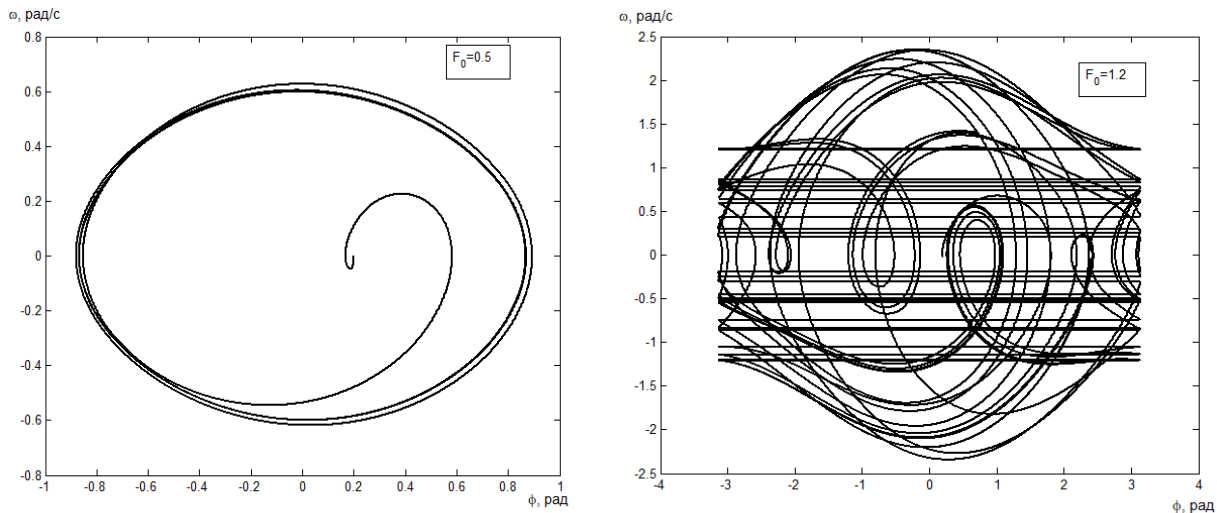


Рис. 5. Фазовые диаграммы маятника для различных режимов

Фазовая диаграмма для переходного режима движения занимает промежуточное положение между рассмотренными выше двумя режимами.

Таким образом, из вида фазовой диаграммы можно сделать заключение о типе движения маятника.

Выводы. Выполненный вычислительный эксперимент в среде компьютерной математики *Matlab* позволил установить влияние величины амплитуды внешней силы на режим колебательного движения математического маятника. При этом исследована зависимость от времени разности траекторий двух маятников с близкими начальными значениями углов отклонения. На ее основе выполнена оценка показателей Ляпунова для регулярного и хаотического режимов. Также получены фазовые диаграммы для различных режимов движения маятника и обсуждены их характерные особенности.

Л и т е р а т у р а

1. Глик Дж. Хаос. Создание новой науки / Дж. Глик. – Изд-во CORPUS, 2008. – 593 с.
2. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
3. Giordano N.J. Computational physics / N.J. Giordano, Nakanishi H. – Pearson Prentice Hall, 2006. – 544 с.
4. Cromer A. Stable solutions using the Euler approximation / A. Cromer // American Journal of Physics, 49, 1981. – pp. 455-459.

Korsunov K.A., Lyshvan E.Y., Kharchenko E.I., Chalenko A.V.

INVESTIGATION OF NONLINEAR OSCILLATORY SYSTEMS BY THE METHOD OF COMPUTATIONAL EXPERIMENT

In the work, the features of the influence of the amplitude of an external force on the oscillatory motion of a mathematical pendulum, taking into account the friction force, are investigated by the method of computational experiment. The equations of the mathematical model were solved numerically by the Euler-Kromer method in the Matlab computer mathematics environment. The existence of two different modes of motion of the pendulum, depending on the amplitude of the external force, is demonstrated – the mode of regular oscillations and the mode of chaotic oscillations, and the conditions for the transition to chaotic oscillations are determined.

Keywords: nonlinear oscillations, chaos, chaotic oscillations, regular and chaotic oscillation modes, Euler-Kromer scheme.

Корсунов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: korsunof@mail.ru

Лыштван Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: lustva_jena@mail.ru

Харченко Евгений Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: kharchenko_ei@mail.ru

Чаленко Анжелика Валериевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: anghiel.anghiel.2014@mail.ru

Korsunov Konstantin, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Lyshtvan Elena, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Kharchenko Evgenyi, candidate of physical and mathematical sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Chalenko Anzhelika, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 01.12.2023

УДК 81-2

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ РЕЧЕВОГО ЭТИКЕТА В АНГЛОЯЗЫЧНЫХ СТРАНАХ

Костина В. С., Лучко А. М.

DISTINCTIVE FEATURES OF SPEECH ETIQUETTE IN ENGLISH-SPEAKING COUNTRIES

Kostina V. S., Luchko A.M.

Проведено сравнение разговорного и делового этикета в Англии, США и Австралии. Выявлены особенности разговорного и делового этикета в Англии, США и Австралии. Обозначено влияние менталитета на построение речи и поведение в разговоре в англоязычных странах.

Ключевые слова: англоязычные страны, деловой этикет, построение речи, речевой этикет, сравнение разговорного и делового этикета в Англии, США и Австралии, страйн, «small talk», специфика в разговоре, этикет англоговорящих стран.

Введение. В современном мире насчитывается более 2500 языков с тысячами собственных диалектов, на которых разговаривает весь мир. Международными языками являются: французский, немецкий, испанский, русский, арабский, португальский и, конечно же, английский.

Английский язык является одним из наиболее распространённых и используется во многих странах. Несмотря на его широкую популярность, в каждой из стран он имеет свои речевые особенности. Это связано непосредственно с национальными особенностями и культурой страны, ее историей, образом жизни людей, их традициями и ценностями. Исторически сложившийся менталитет каждой страны накладывает отпечаток на речь и образует свой уникальный речевой этикет.

Например, американцы отличаются своей вежливостью и дружелюбием. Они открыты в общении, высоко ценят дружбу и семью. В свою очередь, британцы весьма консервативны. Им присуща чопорность, толерантность, невозмутимость и чрезмерная вежливость. Также этот народ славится своим своеобразным юмором, который мало кто понимает. Если рассматривать Австралию, можно заметить черты, присущие как Великобритании, так и Америке. Жители этого островного материка – народ без комплексов. Они всегда с особой доброжелательностью поддержат диалог. Их речевой этикет вовсе не строгий. В общении они ценят естественность и простоту.

Постановка проблемы и актуальность

работы. Изучение этики разговора является особенно актуальным в наши дни. Это связано с тем, что сейчас коммуникация между странами и континентами становится все более доступной. Стало проще не только налаживать деловые отношения, но и с развитием туризма и Интернета каждый человек приобретает возможность пообщаться с представителем той или иной нации. Помимо знания языка своего собеседника, необходимо понимать и особенности речевого этикета, чтобы не показаться грубым или невежливым.

Анализ последних исследований и публикаций. В наши дни этикет составляет неотъемлемую часть нашей жизни. Построение красивой речи показывает не только уважение с вашей стороны, но и делает диалог более продуктивным и приятным. Речевой этикет не является списком ограничений. Эти правила применяются в ежедневном общении, поэтому их необходимо изучать, а также постоянно совершенствовать. Речевой этикет используется во всех аспектах жизни: при знакомстве с людьми, в рабочих отношениях, в общении между членами семьи, в дружеском общении, во взаимоотношениях между одноклассниками и так далее. Разумеется, для каждого случая существует свои нормы разговорной речи [1, 2, 3, 4, 5].

Речевой этикет играет очень важную роль в любом из видов общения. Наибольшую значимость он несет в деловом общении [4, 7, 8], ведь неправильные речевые формулировки, стилистические ошибки и неэтичные нормы, не принятые в деловом обществе, могут раздражать человека, а иногда и вовсе вызывать непонимание с его стороны.

В совокупности речевой этикет – это не только набор определенных разговорных выражений, подходящих для того или иного вида диалога. Он также включает в себя множество факторов, которые сопровождают говорящего [1, 6, 9].

1. Манера общения в разговоре. Следует

всегда проявлять доброжелательность и вежливость по отношению к собеседнику. Также влияние оказывает голос. Тон не должен быть грубым, сильно громким или, наоборот, тихим.

2. Поведение человека играет важную роль. Во время разговора нужно смотреть собеседнику в глаза, но не слишком часто, чтобы не смутить его. Поза должна быть открытой, незажатой. Не нужно держать руки в карманах и совершать лишних покачиваний. Также ни в коем случае нельзя отворачиваться от собеседника.

3. Следует исключить из своей речи нецензурные выражения. Запрещены и резкие, колкие высказывания в сторону собеседника, публичные упреки его в чем-либо. Нельзя делать замечания по поводу его речи, тем более брать во внимание незначительные ошибки или неудачные выражения.

4. Если человек находится в компании, ему не стоит пытаться перекричать остальных. Также положено обсуждать только те темы, которые распространены на всю группу.

Целью исследовательской работы является изучение особенностей и различий характерных черт этикета в разных англоязычных странах.

Изложение основного материала. В речевой этикет входит использование определенных этикетных формул, присущих определенному стилю разговора, которые отражают особенности той или иной страны или народности. В него входят различные обороты речи и словосочетания, диалектизмы, смысл которых имеет особое значение в понимании.

Речевой этикет, как и поведение при разговоре, имеет свои различия в разных странах и культурах. Если вы собираетесь начать общение с представителями другой страны, важно ознакомиться и с их речевым этикетом. Это требуется не только для демонстрации уважения, но и для продуктивности вашего диалога. Также через этикет той или иной местности можно ознакомиться с характером человека, его культурой и статусом в обществе.

В исследовательской работе мы рассмотрим речевой этикет в англоговорящих странах по той причине, что английский язык является одним из самых распространенных по всему миру. В основном все туристы общаются именно на нем. Разумеется, что речевой этикет англоговорящих стран весьма отличается от, к примеру, русского или корейского. Однако он также имеет различия и между странами, говорящими сугубо на английском языке.

Конечно, на это оказывает влияние не сам язык, а в первую очередь исторически сложившаяся культура страны, ее традиции, менталитет и непосредственно сам образ жизни, присущий той или иной территории. Следовательно, даже в одной и той же стране, но в разных ее частях этикет может иметь отличия.

Не исключен тот факт, что в нашем мире существует множество стереотипов, касающихся той или иной национальности. И англоязычные страны являются одними из наиболее распространенных в этом плане. К примеру, Англию принято считать весьма консервативной страной, и может складываться впечатление, что все люди, живущие там, чересчур серьезные, невозмутимые и обладают никому не понятным юмором, а речь их холодна, хотя они и любят злоупотреблять вежливостью. Но стереотипы на то и есть стереотипы, и в статье мы разберем подлинное поведение носителей английского языка и выделим аспекты и традиции общения в таких странах, как Англия, Соединенные Штаты Америки и Австралия.

Относительно делового этикета в вышеупомянутых странах сложились следующие формы общения. В каждой стране люди придерживаются формального стиля общения на различных деловых встречах, в разговоре с вышестоящими людьми и так далее. Каждая из трех стран предусматривает свои стилистические особенности, но в чем-то все они имеют общие черты.

Как в Англии, так и в Соединенных Штатах, и в Австралии деловые встречи планируются заранее, будь то встреча с рабочим партнером или же конференция на работе. Само мероприятие изначально имеет какую-либо цель.

Англичане на деловых встречах традиционно демонстрируют сдержанность. Они предпочитают приводить различные аргументы во время дискуссии, однако эмоции выражать не принято. Проявлять агрессию или вступать в конфликт им также не присуще. Англичане не любят быстрых переговоров. Обсуждение той или иной темы может занять несколько часов.

При представлении участников переговоров важно соблюдать строгую должностную иерархию. Вышестоящим сотрудникам представляют нижестоящих. При знакомстве приветствуется короткое рукопожатие и соблюдение любых формальностей при обращении к собеседнику.

Атмосфера на американских собеседованиях и деловых встречах весьма отличается от английских норм. В основном участники деловых встреч желают построить лаконичный и конструктивный диалог, найти пути решения или заключить сделку как можно быстрее. Для них важно четко придерживаться темы собеседования.

Однако такие мероприятия обычно проходят в довольно разряженной обстановке. Участники часто развлекают переговоры различными шутками. В отличие от Англии, в американских деловых встречах принято вести активное участие в диалоге, проявлять свои эмоции и открыто выражать мнение по тому или иному вопросу.

Что касается Австралии, там деловые встречи имеют сходства как с британскими, так и с американскими. В разговоре ценится сдержанность

в эмоциях и скромность. На переговорах участники не станут демонстрировать свою гордость и успешность, а также им не нравится, когда это делают другие.

В Австралии важным показателем является «командная работа» в связи с отсутствием привычной иерархии. Руководители общаются с сотрудниками на равных. Каждый имеет право на свое мнение. Стоит отметить, что они достаточно прямолинейны, при этом кратки в высказываниях. Как и в США, на деловых встречах приветствуются шутки и неформальное общение.

Несмотря на различные черты делового общения в англоговорящих странах, существует одно правило, которое соблюдается во всех трех. Перед началом формальных переговоров принято провести так называемый «small talk», что подразумевает под собой обсуждение погоды или других нейтральных тем, чтобы разрядить обстановку.

Что же касается разговорного этикета в Англии, США и Австралии, то можно выделить такие особенности. Как было отмечено выше, англичане всемирно славятся своим четким соблюдением общепринятых норм, и общение не является исключением. Их речь отличается особым акцентом, и в целом манера общения является сдержанной. У англичан не принято сильно жестиковать или говорить слишком эмоционально, при этом они славятся своей безграничной вежливостью. Именно в Англии появилось понятие «истинный джентльмен».

Если вы соберетесь начать диалог с незнакомцем или просто задать ему какой-либо вопрос, будьте готовы к тому, что вам окажут необходимую помощь с особой вежливостью и пониманием. А желая познакомиться с представителем Англии, стоит учитывать, что этот народ неохотно заводит общение с иностранцами. Также в стране не принято делать это напрямую, следовательно, в большинстве случаев это происходит через третьих лиц.

Если удалось войти в контакт с англичанином, обычно диалог начинается с вышеуказанного «small talk». Также при знакомстве не принято рассказывать о личных проблемах, а тем более спрашивать об этом. Однако допустимо использование метода «ответ вопросом на вопрос». Но стоит учитывать, что чрезмерное любопытство может считаться грубым тоном.

В Соединенных Штатах также достаточно распространена идея «легкой беседы». По сравнению с англичанами, американцы относятся более непринужденно к общению с незнакомыми людьми. В отличие от первых, они демонстрируют особую дружелюбность и вежливость, подчеркивая это широкой улыбкой.

В США чопорность не пользуется популярностью. Наоборот, этот народ предпочитает простоту и отсутствие формальностей. Они склонны быстро переходить на имена (в нашем понимании – на «ты»), иногда сразу после знакомств.

Американцы ценят четкость и прямолинейность, так что, отвечая на их вопросы, стоит придерживаться конкретной темы без лирических отступлений. Но стоит отметить, что этот народ, в отличие от англичан, весьма любопытный. Они хотят знать о новых знакомых все, поэтому задают большое количество вопросов, в том числе и довольно личных. Однако грубым тоном здесь может считаться информация о своих проблемах, так что с собеседником следует делиться только положительными эмоциями.

Австралийский речевой этикет, хотя и уходит своими корнями в английский, в современном мире больше похож на американский. Даже их язык обладает большим количеством слов из американского лексикона. В быту в свою очередь они используют так называемый «страйн», который не всегда может быть понятен приезжим, так как при этом характерно сокращение или даже соединение слов.

Австралийцев, часто называют народом «без комплексов». Они также не терпят формальностей и ценят простоту в диалоге, будь то близкий человек или незнакомец. Лучший способ знакомства с жителем Австралии – упомянуть тему спорта. При знакомстве австралийцы ведут себя открыто и доброжелательно, также отличаются любопытством и готовностью поделиться какой-либо информацией о себе, за исключением финансового положения или происхождения. Разговоры австралийцев часто наполнены шутками и оптимизмом.

Выводы. Речевой этикет является неотъемлемой частью изучения культуры другой страны. Он используется во всех аспектах жизни человека. Также помимо построения своей речи, необходимо следить за поведением во время разговора, чтобы не показывать дурной тон.

Речевой этикет помогает лучше понять менталитет той или иной страны, потому что он зависит непосредственно от исторически сложившейся культуры. Самым популярным в изучении является этикет англоговорящих стран.

Деловой этикет является самым важным и в каждой из стран имеет свои особенности. В Англии – консервативной стране – деловые встречи проходят предельно формально, в отличие от США и Австралии, где допускается более разряженная обстановка.

В разговорной речи англичане также довольно серьезны и сдержаны. Знакомство с жителями Америки проходит более расслаблено и открыто, так же как и в Австралии. Во всех трех странах в начале разговора принят классический «small talk».

В современной истории изучаемый вопрос и предлагаемые рекомендации имеют практический интерес для широкого круга людей, таких как ученые, политики, бизнесмены, в областях дипломатии, туризма, внешнеторговой деятельности.

Л и т е р а т у р а

1. Особенности английского этикета. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://etikket.ru/geograficheskij-etiket/anglijskij-etiket.html>.
(Дата обращения: 12.09.2023).

2. Национальный этикет Америки. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etikket.ru/geograficheskij-etiket/amerikanskij-etiket.html>. (Дата обращения: 12.09.2023).

3. Этикет в Австралии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.knigge.ru/national_rules_australia.html. (Дата обращения: 12.09.2023).

4. Деловой этикет в Австралии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internationalwealth.info/offshore-business-abroad/business-etiquette-in-australia/>. (Дата обращения: 12.09.2023).

5. Деловой этикет в Британии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skyeng.ru/articles/delovoj-etiket-v-britanii/>. (Дата обращения: 12.09.2023).

6. История этикета. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etikket.ru/interesno-o-etikete/istoriya-etiketa.html>. (Дата обращения: 08.09.2023).

7. Бизнес-этикет и правила делового общения в Великобритании. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.evl-study.ru/blog/detail/delovoy-etiket-v-velikobritanii/>. (Дата обращения: 13.09.2023).

8. Деловой этикет в США. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skyeng.ru/articles/delovoj-etiket-v-ssha/>. (Дата обращения: 13.09.2023).

9. Телефонный этикет - визитная карточка делового человека. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ienglish.ru/articles/common-article/telefonnui-etiket>. (Дата обращения: 14.09.2023).

Kostina V. S., Luchko A.M.
**DISTINCTIVE FEATURES OF SPEECH ETIQUETTE
IN ENGLISH-SPEAKING COUNTRIES**

A comparison of conversational and business etiquette in England, the USA and Australia was carried out. The peculiarities of conversational and business etiquette in England, the USA and Australia are revealed. The influence of mentality in the construction of one's speech and behavior during conversation in English-speaking countries is indicated.

Keywords: *English-speaking countries, business etiquette, speech construction, speech etiquette, comparison of conversational and business etiquette in England, USA and Australia, strain, "small talk", specifics in conversation, etiquette of English-speaking countries.*

Костина Валерия Сергеевна, учитель английского языка, ГУ ЛНР «Гимназия № 36 имени Г. К. Жукова», г. Луганск.

Лучко Алина Максимовна, ученица 11-А класса, ГУ ЛНР «Гимназия № 36 имени Г. К. Жукова», г. Луганск.
E-mail: alibaba2007lg@gmail.com

Kostina S. Valeria - English teacher, State Educational Institution of the LPR "Gymnasium No. 36 named after G. K. Zhukov".

Luchko M. Alina - student of the 11th grade, State Educational Institution of the LPR "Gymnasium No. 36 named after G. K. Zhukov".

Рецензент: Клименко Александр Сергеевич, д-р. филолог. наук, проф., заведующий кафедрой теории и практики перевода германских и романских языков, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 07.11.2023

УДК 53:372.8

ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОДХОД КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ-ФИЗИКОВ

Корсунов К. А., Харченко Е. И., Чаленко А. В.

THE DESIGN AND RESEARCH APPROACH AS A MEANS OF FORMING THE BASIC PROFESSIONAL COMPETENCIES OF PHYSICS STUDENTS

Korsunov K. A., Kharchenko E. I., Chalenko A. V.

В работе рассматривается проектный подход в формировании профессиональных компетенций студентов-физиков в процессе научно-исследовательской работы, позволяющей повысить качество подготовки высококвалифицированных, конкурентно-способных специалистов физиков.

Ключевые слова: научно-исследовательская деятельность, компетенция, проект, проектный метод, исследовательский проект.

Введение. В настоящее время профессиональное образование ставит задачу обеспечения полноценной подготовки специалиста, который способен быстро адаптироваться к изменяющимся условиям профессиональной деятельности, принимать решение при недостатке необходимой информации.

Возрастающие темпы научно-технического процесса, характерные для современной эпохи, обуславливают необходимость поиска и реализации новых форм и новых технологий, которые могут оказывать положительное влияние на развитие страны. Это изменения техники и технологии, в которых реализуются научные знания. На сегодняшний день актуальными становятся такие задачи, как внедрение в образовательный процесс современных инновационных технологий, призванных к формированию творческой личности, способной к активной профессиональной деятельности и к профессиональному саморазвитию.

К таким инновационным технологиям, в первую очередь, относятся компетентностный и проектный подходы.

Изложение основного материала. Студенты специальности «Физика» должны уметь решать такие задачи, как освоение методов научных исследований, теорий и моделей; проведение исследований и обработка их результатов; работа с научной литературой; знакомство с основами организации и планирования физических исследований [1]. Отсюда вытекает необходимость

вовлечения студентов в научно-исследовательскую деятельность, как одно из условий формирования профессиональной компетентности будущего специалиста-физика [1]. Исследовательские умения представляют собой сложную систему практических и интеллектуальных действий, позволяющих выполнять исследовательскую деятельность при наличии соответствующих знаний, умений и навыков. [2].

Проблемам компетентностного подхода в литературе посвящено достаточно работ. В работе [3] приводится список ключевых компетенций и дано их определение. Соотношение видов компетенций и этапов обучения рассматривается в работе [4]. Компетентностные модели бакалавра и магистра в области техники и технологий были предложены в работе [5].

Под проектным подходом к образованию понимается подход, основанный на идее использования проектирования как основы учебно-познавательной деятельности обучающихся. [7]. При реализации проектного подхода к обучению подразумевается использование современных образовательных технологий. Это технологии активного обучения, технологии проблемного обучения, технологии рейтингов оценки и контроля знаний и умений и т.д. [7].

Цель проектного обучения состоит в том, чтобы создать условия, при которых студенты учатся пользоваться приобретенными знаниями для решения познавательных и практических задач; развивают у себя исследовательские умения – умения выявлять проблемы, сбора информации, наблюдения, проведение эксперимента, анализа, построения гипотез, обобщения.

Рассмотрим профессиональные компетенции для студентов магистратуры 03.04.02 Физика:

научно-исследовательская деятельность:

– способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с

использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-1),

научно-инновационная деятельность:

– способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности (ПК-2).

организационно-управленческая деятельность:

– способность использовать навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей (ПК-3).

– способность к педагогической деятельности по проектированию и реализации основных общеобразовательных программ (ПК-4).

Отдельную роль с точки зрения формирования профессиональных компетенций в научно-исследовательской области у студентов физиков играют научно-исследовательские проекты, выполняемые в процессе научно-исследовательской работы (НИР) [6].

Научные исследования в ходе НИР можно разделить на фундаментальные, поисковые и прикладные (табл. 1).

Таблица

Виды научно-исследовательских работ

п/п	Виды исследований	Результаты исследований
1	Фундаментальные	Расширение теоретических знаний. Получение новых научных данных о процессах, явлениях, закономерностях, существующих в исследуемой области; научные основы, методы и принципы исследований
2	Поисковые	Увеличение объема знаний для более глубокого понимания изучаемого предмета. Разработка прогнозов развития науки и техники; открытие путей применения новых явлений и закономерностей
3	Прикладные	Разрешение конкретных научных проблем для создания новых изделий. Получение рекомендаций, инструкций, расчетно-технических материалов, методик и т.д.

Примерный перечень работ на этапах НИР приведен в таблице 2.

Таблица 2

Этапы и состав работ НИР

п/п	Этапы НИР	Состав работ
1.	Предварительный	Студент осуществляет анализ и систематизацию существующих научных подходов и методов к решению поставленной проблемы, анализ и уточнение категориального аппарата исследования, выполняет научное прогнозирование
2.	Теоретический	Студент выполняет разработку рабочих гипотез, теоретической или функциональной модели; проектирование экспериментальной работы; разработку диагностической методики (для проведения констатирующего эксперимента)
3.	Экспериментальный	Студент выполняет подготовка моделей (макетов, экспериментальных образцов), а также испытательного оборудования; проводит эксперименты, обрабатывает полученные данные и сопоставляет результаты эксперимента с теоретическими исследованиями, а также корректирует теоретические модели объекта и проводит при необходимости дополнительных экспериментов. Составляет промежуточный отчет этапа экспериментальной работы; выполняет подготовку текста доклада.
4.	Заключительный	Студент выполняет анализ научных результатов, полученных в процессе теоретического и экспериментального исследования; формулирует выводы из проведенного исследования, осуществляет оценку полноты решения задач и определяет перспективы дальнейшего исследования темы магистерской диссертации.

Научно-исследовательская работа позволяет закрепить умения оценивать и обобщать теоретические знания, использовать современные методы и подходы при решении проблем в области физики. Знания, умения и навыки, приобретенные при выполнении научно-исследовательской работы необходимы для написания выпускной квалификационной работы магистра и в дальнейшей профессиональной деятельности.

Содержание НИР определяется темой магистерской диссертации, ее целями и задачами, ее научной новизной, а также компетенциями, которыми должен овладеть магистрант по

завершении научно-исследовательской работы. Научная новизна и практическая значимость формулируются в начале научно-исследовательской работы и носят предварительный характер. При этом новизна должна быть доказана, т.е. теоретически обоснована, а также подтверждена практически и экспериментально.

В результате прохождения научно-исследовательской работы студенты должны

знать: современные проблемы, концепции и новейшие достижения физики; основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации, основы информационной

безопасности; основные научные направления и концепции в области физики, методы и способы постановки и решения задач физических исследований, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований; разделы физики, необходимые для решения научно-инновационных задач; новые методы и методические подходы в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности в области физики; как планируются и организуются физические исследования, а также научные семинары и конференции.

уметь: использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе; работать с компьютером на профессиональном уровне; использовать компьютерные технологии для решения задач как профессиональной, так и произвольной направленности; преобразовывать информацию в звуковую или зрительную; самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области физики с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий; применять теоретические и экспериментальные навыки для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности; самостоятельно разрабатывать новые методы и методические подходы в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности; планировать и организовывать физические исследования, научные семинары и конференции.

владеть: современными методами исследований в контексте понимания современных проблем и новейших достижений физики; навыками обработки, сохранения, подачи и защиты полученной информации; навыками постановки и

решения задач научных исследований в области физики с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований; разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и умением применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.

С точки зрения формирования профессиональных компетенций в научно-исследовательской области у студентов физиков отдельную роль должны играть научно-исследовательские проекты [6]. Данные проекты должны быть максимально приближены к подлинным научным исследованиям, их целью является получение научного знания, обладающего признаками новизны, практической значимости.

В структуру научно-исследовательских проектов должны входить:

- актуальность избранной темы, формулировка проблемы, определение объекта и предмета исследования;
- постановка цели и связанных с нею задач;
- выдвижение гипотезы решения обозначенной проблемы с последующей ее проверкой;
- описание теоретических и экспериментальных методов исследования,
- обсуждение и оформление результатов исследования, выводы;
- внешняя оценка [7].

Научно-исследовательские проекты студентов – это основной путь воплощения фундаментальных знаний в практические умения, навыки, опыт, в общепрофессиональные и профессиональные компетенции. Организация данной работы позволяет осуществлять одновременно несколько методов анализа, обеспечивает многократное увеличение объема получаемой и перерабатываемой информации и способствует обретению студентами различных общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Результаты научно-исследовательских работ и проектов показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты НИР

п/п	Виды исследований	Результаты исследований
1	Открытие	Расширение теоретических знаний. Получение новых научных данных о процессах, явлениях, закономерностях, существующих в исследуемой области; научные основы, методы и принципы исследований
2	Изобретение	Техническое решение в любой области деятельности, обладающее новизной или существенно отличающееся, дающее положительный эффект;
3	Рациональное предложение	Техническое решение, являющееся новым и полезным для предприятия, которому оно подано.

Полученные результаты. Научно-исследовательская работа студентов магистратуры по направлению подготовки 03.04.02 Физика и магистерской программе «Теоретическая и математическая физика» на кафедре физики ЛГУ им. В.Даля обеспечивается программой, где указаны

виды, этапы научно-исследовательской работы, в которых студент должен принимать участие.

Логически и методически научно-исследовательская работа связана с рядом дисциплин профессионального цикла. Она расширяет, углубляет и систематизирует

теоретические знания, полученные в результате изучения таких дисциплин как «Компьютерное моделирование физических процессов», «Методы анализа экспериментальных данных», «Физика ускорителей», «Ядерная спектроскопия», «Физика газового разряда», «Вычислительные методы в физике».

В процессе осуществления НИР происходит междисциплинарный синтез накопленных теоретических знаний и практических умений, и формирование навыков их использования в практической деятельности. Магистр осваивает современные методы обработки и интерпретации физической информации; приобретает навыки

самостоятельной научно-исследовательской работы и работы в научном коллективе. Результаты научно-исследовательской работы обобщаются и являются основой для магистерской диссертации.

Структура научно-исследовательской работы. Продолжительность научно-исследовательской работы – 16 недель, трудоемкость составляет 24 з.е., 864 часа, во 2, 4 семестрах.

Научно-исследовательская работа магистранта структурируется по семестрам (таблица 4), в каждом из которых осуществляется выполнение действий, ориентированных на решение поставленных задач в соответствии с разработанной программой.

Таблица 4

Содержание НИР студентов направления подготовки 03.04.02 Физика

№ п/п	Разделы (этапы) научно-исследовательской работы	Семестр	Виды работ научно-исследовательской работы, включая самостоятельную работу студента и трудоемкость (в часах)	Формы текущего контроля
1	I этап. Предварительный. (Подготовка раздела 1 магистерской диссертации)	2	1. Анализ и систематизация существующих научных подходов к решению проблемы исследования – 108 ч. 2. Анализ и уточнение категориального аппарата исследования – 52 ч. 3. Подготовка тезисов доклада или научной статьи – 56 ч.	Зачет с оценкой
Всего за семестр 2: 216 ч. / 6 з.е.				
2	II этап. Теоретический. (Подготовка раздела 2 магистерской диссертации)	4	1. Разработка теоретической или функциональной модели – 56 ч. 2. Проектирование экспериментальной работы – 56 ч. 3. Разработка (выбор и адаптация) диагностической методики (комплекс методик) для проведения констатирующего эксперимента – 56 ч.	Зачет с оценкой
3	III этап. Экспериментальный	4	1. Разработка модели формирующего эксперимента и программы формирующего этапа экспериментальной работы – 56 ч. 2. Подготовка доклада – 56 ч. 3. Подготовка тезисов доклада или научной статьи – 56 ч.	
4	IV этап. Заключительный	4	1. Анализ научных результатов, полученных в процессе теоретического и экспериментального исследования – 72 ч. 2. Формулирование выводов из проведенного исследования и определение перспектив дальнейшего исследования темы магистерской диссертации – 108 ч. 3. Оформление магистерской диссертации в соответствии с требованиями – 132 ч.	
Всего за семестр 4: 648 часов / 18 з.е.				
Всего: 864 часов / 24 з.е.				

К исходным требованиям, необходимым для проведения научно-исследовательской работы, относятся знания, умения и навыки, сформированные в процессе изучения специализированных дисциплин направления подготовки 03.03.02 Физика, профиль «Физика» и 03.04.02 Физика, магистерская программа «Теоретическая и математическая физика».

Научно-исследовательская работа позволяет закрепить умения, оценивать и обобщать теоретические знания, использовать современные методы и подходы при решении проблем в области физики. Знания, умения и навыки, приобретенные

при выполнении научно-исследовательской работы необходимы для написания выпускной квалификационной работы магистра и в дальнейшей профессиональной деятельности.

Выводы. В заключении можно сказать, что внедрение проектного и компетентностного подходов в процесс обучения студентов-физиков будет стимулировать научно-исследовательскую деятельность студентов. При этом будет происходить формирование у студентов набора компетенций, соответствующих компетентностной модели специалиста. Это позволит развивать такие исследовательские умения как: умение

анализировать проблемную ситуацию, осуществлять отбор необходимой информации, проводить эксперимент; фиксировать и анализировать результаты, строить гипотезы, обобщать, делать выводы. Все это будет в значительной мере способствовать формированию профессиональных компетенций студентов в области научно-исследовательской работы и проектной деятельности.

Л и т е р а т у р а

1. Дамбуева А. Б. Формирование исследовательских умений студентов-физиков как условие развития их профессиональной компетентности / А. Б. Дамбуева. – Вестник Красноярского государственного педагогического университета имени В. П. Астафьева. – Красноярск, 2012. – №3. – С. 59-63.
2. Федина О. В. Формирование исследовательских умений студентов-физиков младших курсов средствами практикума / О. В. Федина – Вестник Ставропольского государственного университета. – Ставрополь, 2008. – №56. – С. 36-45.
3. Равен Дж. Педагогическое тестирование: проблемы, заблуждения, перспективы / Дж. Равен – Пер. с англ. – М.: Кошто-центр, 1999.
4. Уиддет С., Холлифорд С. Руководство по компетенциям / С. Уиддет, С. Холлифорд. – Пер. с англ. – М.: НІРРО, 2003. – 224 с.
5. Шадриков В.Д., Пузанков Д.В., Федоров И.Б. Двухступенчатая система подготовки специалистов в области техники и технологии. / В.Д. Шадриков, Д.В. Пузанков, И.Б. Федоров. – Методические материалы. Санкт-Петербург, 2004.
6. Лыштван Е.Ю. Формирование профессиональных компетенций в области научно-исследовательской деятельности у студентов направления «Физика» / Е.Ю. Лыштван, Е.И. Харченко, А.В. Чаленко. – Вестник Луганского нац. Ун-та им. В. Даля, №2(4) Ч.1. 2017. С. 289-291.
7. Яковлев Н. Ф. Проектная деятельность в образовательном учреждении [электронный ресурс]: учеб. пособие. – 3-е изд., стер. – М.: ФЛИНТА, 2019. – 144 с.

Korsunov K.A., Kharchenko E.I., Chalenko A.V. THE DESIGN AND RESEARCH APPROACH AS A MEANS OF FORMING THE BASIC PROFESSIONAL COMPETENCIES OF PHYSICS STUDENTS

The paper considers a project approach in the formation of professional competencies of physics students in the process of research work, which allows to improve the quality of training of highly qualified, competitively capable physicists.

Keywords: research activity, competence, project, project method, research project.

Корсунов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: korsunof@mail.ru

Харченко Евгений Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: kharchenko_ei@mail.ru

Чаленко Анжелика Валериевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: anghiel.anghiel.2014@mail.ru

Korsunov Konstantin, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Kharchenko Evgenyi, candidate of physical and mathematical sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Chalenko Anzhelika, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 01.12.2023

УДК 656

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕШЕХОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ В ОБЩЕЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СЛЕДА

Лучко М. И.

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE PEDESTRIAN COMPONENT IN THE TOTAL DURATION OF THE PASSENGER'S MOVEMENT USING A DIGITAL TRANSPORT TRAIL

Luchko M. I.

Приведено теоретический подход и методику расчета показателей пассажирских передвижений, позволяющие определить длительность передвижения (обслуживания, пребывания) пассажира в пассажирской городской транспортной системе, что позволит более точно учесть транспортные параметры и повысить эффективность организации работы системы городского пассажирского транспорта общего пользования.

Ключевые слова: длительность передвижения пассажира, информационные технологии (ИТ) управления, маршрутная сеть общественного транспорта, маршрутное транспортное средство (МТС), остановочный пункт (ОП), пассажирский маршрутный городской общественный транспорт (ПМГОТ), транспортный процесс пассажира, система городских пассажирских перевозок общественного транспорта (СГПП ОТ), цифровой транспортный след

Введение. Информационные технологии управления, применяемые на транспорте, которые включают совокупность методов, процессов и программно-технических средств, объединенных в технологическую цепочку и обеспечивающие сбор, обработку, хранение и распространение (транспортировку) информации с целью снижения трудоемкости процесса управления, а также повышения его надежности и оперативности.

Среди основных функции управления транспортным процессом на основе применения информационных технологий является оперативное планирование и управление перевозочным процессом, которое включает обеспечение получения дотранспортной информации о потоках пассажиров на остановочных пунктах (ОП) и в маршрутных транспортных средствах (МТС), прогнозирование и оценка спроса на перевозки, информирование клиентов о наявности и загрузке маршрутной сети, бронирование транспортных услуг, ориентирование на маршруте).

Задачами, решаемыми с применением

информационных технологий в транспортных системах различной сложности являются:

- получение и обработка информационных потоков в самой системе и в сетях коммуникаций;
- определение стратегии и тактики управления потоками информации в транспортных системах разного уровня сложности;
- управление информационными и материальными потоками;
- оптимизация процессов принятия управленческих решений при использовании информационных технологий в транспортных системах различной сложности.

Постановка проблемы. Как отмечалось ранее [1], установить характер и степень влияния уровня развития маршрутной сети городского пассажирского транспорта на транспортную подвижность населения и оценка показателей пассажирских передвижений – является актуальной задачей в области управления пассажирским маршрутным городским общественным транспортом (ПМГОТ). С применением информационных технологий управления на транспорте этот процесс обретает более оперативные и точные данные для достижения этих целей.

Анализ последних исследований и публикаций. Наличие современных «умных» мобильных устройств связи позволяет эффективно взаимодействовать с населением посредством различных приложений и координировать отдельные его группы [2].

Применение цифровых технологий в пассажирской транспортной системе с применением индивидуальных умных устройств (смартфонов, смартчасов и прочих, имеющих модули глобального позиционирования и связь с сетью интернет или wi-fi) позволит оперативно осуществлять сбор данных индивидуальных и массовых перемещений, поддерживая с ними оперативное информационно-

коммуникационное взаимодействие для оптимизации маршрутов, загрузки МТС и времени перемещений пользователей транспортной сети, на основании цифрового транспортного следа [3].

Длительность передвижения (обслуживания, пребывания) пассажира в транспортной системе является одним из важнейших показателей, который часто подлежит оцениванию и в значительной мере отражает уровень ее развития и эффективности функционирования, а также в известной мере определяет уровень удовлетворения пассажиров предоставленными транспортными услугами. В общем случае эта длительность $T_{\text{тс}}$ может быть выражена аналитической моделью и состоит из трех слагаемых [4, 5, 6]:

$$T_{\text{тс}} = 2 \cdot T_{\text{пеш}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{тр}},$$

где $T_{\text{пеш}}$ – время, которое тратит пассажир на пеший подход с места пребывания к ОП отправки в сети ПМГОТ, мин. При этом расход времени на пешеходное передвижение пассажира от остановки назначения непосредственно к месту назначения на конечном этапе передвижения обычно принимают такими же по значению;

$T_{\text{ож}}$ – время, которое тратит пассажир в ожидании на ОП прибытия МТС и посадки в него, мин;

$T_{\text{тр}}$ – время пребывания пассажира непосредственно в МТС во время поездки, в котором могут быть учтены или не учтены расходы времени на пересадки (изменение маршрута) пассажира по пути следования, мин.

В последнем случае длительность пересадки учитывают добавлением соответствующих расходов времени к длительности пешеходной составляющей части и длительности ожидания пассажира на остановках пересадки.

Актуальная задача заключается в том, чтоб совместить интерактивные данные и аналитические расчеты, проанализировать их, и выработать решения по оптимальному использованию подвижного состава МТС на линии в системе ПМГОТ.

В работе [7] изложен подход, позволяющий определить пределы влияния отдельных факторов на возникновение ситуаций отказов пассажирам в посадке на ОП из-за недостатка свободных мест для пассажиров в МТС и количественно оценить увеличение длительности ожидания пассажира на ОП в условиях действия одного из случайных факторов (регулярность движения, неравномерность поступления пассажиров на ОП, параметры потока свободных пассажиромест в маршрутном транспортном средстве) при детерминированных значениях других факторов.

Цель исследования. Определение длительности передвижения (обслуживания, пребывания) пассажира в транспортной системе пассажирского маршрутного городского

общественного транспорта для точного учета транспортных параметров и повышение эффективности организации работы системы городского пассажирского транспорта общего пользования.

Материалы и результаты исследования. С позиций теории сложных сетей, маршрутные сети пассажирского маршрутного городского общественного транспорта (ПМГОТ) относятся к технологическим сетям. В таких сетях перемещаются потоки МТС и связанные с ними пассажиропотоки. Любую подобную сеть удобно представлять в виде графа. Как известно, граф является совокупностью непустого множественного числа X , элементы которого называются вершинами графа, и множественные числа A упорядоченных пар вершин, элементы которой называются ребрами графа [8].

Остановки ПМГОТ являются центрами тяжести транспортных линий маршрутного пассажирского транспорта и определяют на плане города зоны пешеходной доступности, геометрическая конфигурация которых зависит от планировочной структуры территории, которая прилегает к ней. Границы зон пешеходной доступности определяются принятым максимально допустимым временем подхода к ОП $t_{\text{п.д.макс.}}$ или расстоянием, которое проходит пассажир за это время $l_{\text{п.д.макс.}}$. При таких условиях и в предположении изотропности городского пространства зона пешеходной доступности ОП является кругом радиусом $R_{\text{п.д.макс.}} = l_{\text{п.д.макс.}}$ с центром в ОП [6].

Среднее расстояние подхода пассажира к ОП $l_{\text{п.д.сер.}}$ и среднее время похода пассажира к ОП $t_{\text{п.д.сер.}}$ для зон пешеходной доступности в виде круга могут быть определены по формулам [6]:

$$l_{\text{п.д.сер.}} = \frac{2}{3} k_{\text{нп}} R_{\text{п.д.макс.}} ;$$

$$t_{\text{п.д.сер.}} = \frac{2 k_{\text{нп}} R_{\text{п.д.макс.}}}{3 v_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{нп}}$ – коэффициент непрямолинейности подхода пассажира к ОП;

$v_{\text{п}}$ – скорость пешего движения пассажира (отвечает средней скорости движения пешехода).

В случае, когда зоны влияния отдельных ОП не перекрываются, при условии предположения изотропности городского пространства, задача оценки расходов времени на пешеходные передвижения пассажирами может быть сформулирована следующим образом. Рассмотрим зону пешеходной доступности произвольной формы D , в некоторой точке O которого расположена единственная остановка ПМГОТ (рис. 1).

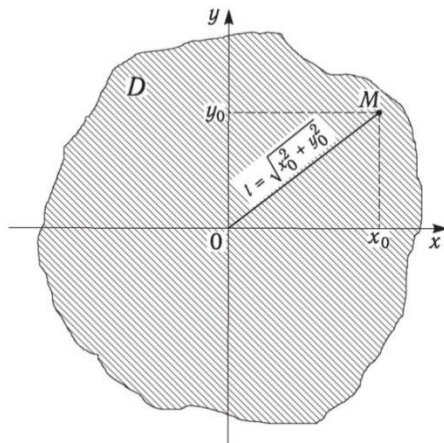


Рис. 1. Расчетная схема определения среднего расстояния подхода пассажира к остановочному пункту

Пусть плотность населения зоны относительно точки расположения ОП задана некоторой функцией $\mu = \mu(x, y)$. Допустим также, что пассажиры могут двигаться от места нахождения к ОП по кратчайшему расстоянию (воздушной линии). Возьмем в зоне D произвольную точку $M(x_0, y_0) \in D$. Расстояние от этой точки к ОП составляет $OM = l(x_0, y_0) = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$. Тогда пешеходная работа (пас-км), которая выполняется пассажирами при подходе с точки M к ОП равняется $F(x_0, y_0) = \mu(x_0, y_0)\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$.

Пешеходная работа, которая выполняется всеми пассажирами зоны при подходе к ОП, может быть вычислена по формуле:

$$V = \iint_D F(x, y) = \iint_D \mu(x, y)\sqrt{x^2 + y^2} dx dy \quad (2)$$

Учитывая, что количество населения, которое находится в зоне пешеходной доступности ОП, составляет $\iint_D \mu(x, y) dx dy$, среднее расстояние подхода пассажиров к этой остановке с учетом коэффициента непрямолинейности подхода выражается формулой:

$$l_{\text{п.д.сер.}} = \frac{k_{\text{нп}} V}{S} = \frac{k_{\text{нп}} \iint_D \mu(x, y)\sqrt{x^2 + y^2} dx dy}{\iint_D \mu(x, y) dx dy}. \quad (3)$$

Предположение изотропности городского пространства предусматривает, что плотность населения зоны есть постоянной величиной $\mu(x, y) = \text{const}$. В таком случае среднее расстояние подхода пассажиров к ОП будет зависеть только от геометрической формы зоны ее пешеходной доступности

$$l_{\text{п.д.сер.}} = \frac{k_{\text{нп}} \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} dx dy}{\iint_D dx dy}. \quad (4)$$

Рассмотрим вычисление среднего расстояния и времени подхода пассажиров к ОП для зон

пешеходной доступности, которые представляют собой элементарные геометрические фигуры (рис. 2.10).

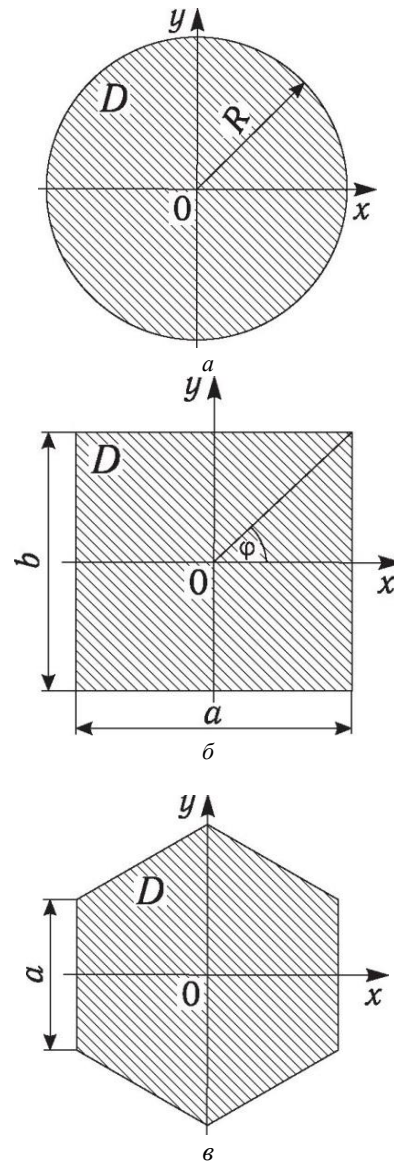


Рис. 2. Схема определения расстояния подхода пассажиров к остановке при разных формах зоны пешеходной доступности ОП

1. Зона пешеходной доступности ОП имеет форму, близкую к кругу радиусом R (рис. 2, а). Переходя в (4) к полярной системе координат имеем:

$$\begin{aligned} l_{\text{п.д.сер.}} &= \frac{k_{\text{нп}} \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} dx dy}{\pi R^2} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R \rho^2 d\rho d\phi}{\pi R^2} \\ &= \frac{\frac{2}{3} k_{\text{нп}} \pi R^3}{\pi R^2} = \frac{2}{3} k_{\text{нп}} R. \end{aligned}$$

2. Зона пешеходной доступности ОП имеет форму, близкую к прямоугольнику со сторонами a и b (рис. 2, б).

3.

$$l_{п.д.сер.} = \frac{k_{нп} \iint_D \sqrt{x^2+y^2} dxdy}{ab} = k_{нп} \frac{4 \int_0^{\arctg \frac{b}{a}} \int_0^{\frac{a}{2\cos\varphi}} \rho^2 d\rho d\varphi + 4 \int_{\arctg \frac{b}{a}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{b}{2\sin\varphi}} \rho^2 d\rho d\varphi}{ab}. \quad (5)$$

Принимая $\varphi = \arctg \frac{b}{a}$, имеем

$$l_{п.д.сер.} = k_{нп} \frac{a^3 \left[\frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi} - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + b^3 \left[\frac{\cos\varphi}{\sin^2\varphi} - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right]}{12ab}. \quad (6)$$

В частном случае $a=b$, $\varphi=\pi/4$ (квадратная форма) имеем

$$l_{п.д.сер.} = k_{нп} \frac{a^3 \left[\frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\cos^2 \frac{\pi}{4}} - \ln \operatorname{tg} \frac{\pi}{8} \right] + a^3 \left[\frac{\cos \frac{\pi}{4}}{\sin^2 \frac{\pi}{4}} - \ln \operatorname{tg} \frac{\pi}{8} \right]}{12a^2} \approx 0,382k_{нп}a. \quad (7)$$

4. Зона пешеходной доступности ОП имеет форму, близкую к правильному шестиугольнику со стороной a (рис. 2, в).

$$\begin{aligned} l_{п.д.сер.} &= \frac{2k_{нп} \iint_D \sqrt{x^2+y^2} dxdy}{3\sqrt{3}a^2} = \\ &= \frac{12k_{нп} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \int_0^{2\sin(\frac{2\pi}{3}-\varphi)} \rho^2 d\rho d\varphi}{3\sqrt{3}a^2} = \\ &= k_{нп} \frac{\frac{a^3}{4} \left[\frac{\cos(\varphi-\frac{2\pi}{3})}{2\sin^2(\varphi-\frac{2\pi}{3})} - \frac{1}{4} \ln \left(\frac{1-\cos(\varphi-\frac{2\pi}{3})}{1+\cos(\varphi-\frac{2\pi}{3})} \right) \right] \Big|_0^{\frac{\pi}{3}}}{3a^2} \approx 0,61k_{нп}a. \quad (8) \end{aligned}$$

При небольшой длине перегонов, которые являются характерными для ПМГОТ, зоны влияния отдельных ОП перекрываются, при этом зону влияния транспортных линий можно считать ограниченной линиями, которые являются параллельными транспортной линии и удаленными от нее на ширину зоны пешеходной доступности $l_{п.д.макс}$ (рис. 3).

Среднее время подхода пассажира к ОП с учетом выбора пассажиром варианта подхода не к ближайшему ОП, а к более отдаленному, но такому, который обеспечивает меньшие общие расходы времени пассажира на передвижение, определяется следующими формулами:

$$t_{п.д.сер.} = \frac{k_{нп}k_{вз}}{v_{п}} \left(\frac{1}{3\delta} + \frac{l_{п}}{4} \right); \quad (9)$$

$$t_{п.д.сер.} = \frac{k_{нп}k_{вз}}{v_{п}} \sqrt{\left(\frac{1}{3\delta} \right)^2 + \left(\frac{l_{п}}{4} \right)^2} \quad (10)$$

где $k_{вз} = 1 + \frac{v_{п}}{v_c}$ - коэффициент выбора остановки, который обеспечивает экономию общих расходов времени на передвижение по сравнению с поездкой от ближайшей ОП;
 v_c - скорость соединения, км/час;
 $l_{п}$ - длина перегона, км.

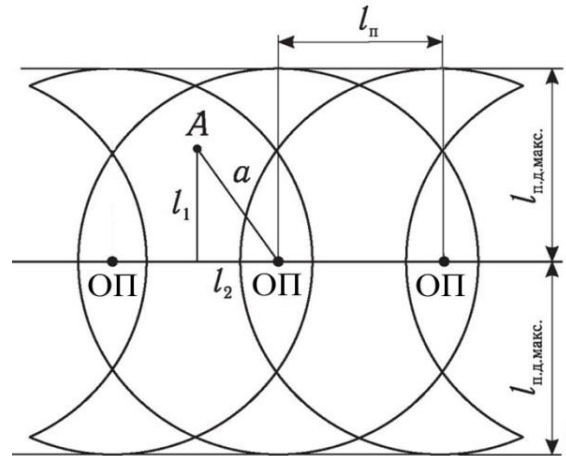


Рис. 3. Схема подхода пассажира к остановке в условиях перекрытия зон влияния остановочных пунктов

Формула (10) отвечает схеме подхода пассажира к ОП, при которой пассажир передвигается от точки A (рис. 3) к транспортной линии по кратчайшему расстоянию, а затем передвигается к ОП вдоль транспортной линии. Формула (11) отвечает схеме подхода пассажира к остановке по кратчайшему расстоянию между точкой A и ОП.

Как известно [9], линии одинакового выигрыша во времени передвижения являются равнобокими гиперболоми (рис. 4). В таком случае зона влияния ОП является геометрической фигурой, которая ограничена двумя гиперболами и двумя прямыми. Среднее время подхода пассажира к ОП для такой формы зоны влияния зависит от длины перегона $l_{п}$, ширины зоны пешеходной доступности $l_{п.д.макс}$ и коэффициента выбора пассажиром ОП $k_{вз}$.

Двойной интеграл, определенный формулой (4), не может быть вычислен для такой формы зоны пешеходной доступности аналитически, потому для его вычисления необходимо применять числовые методы.

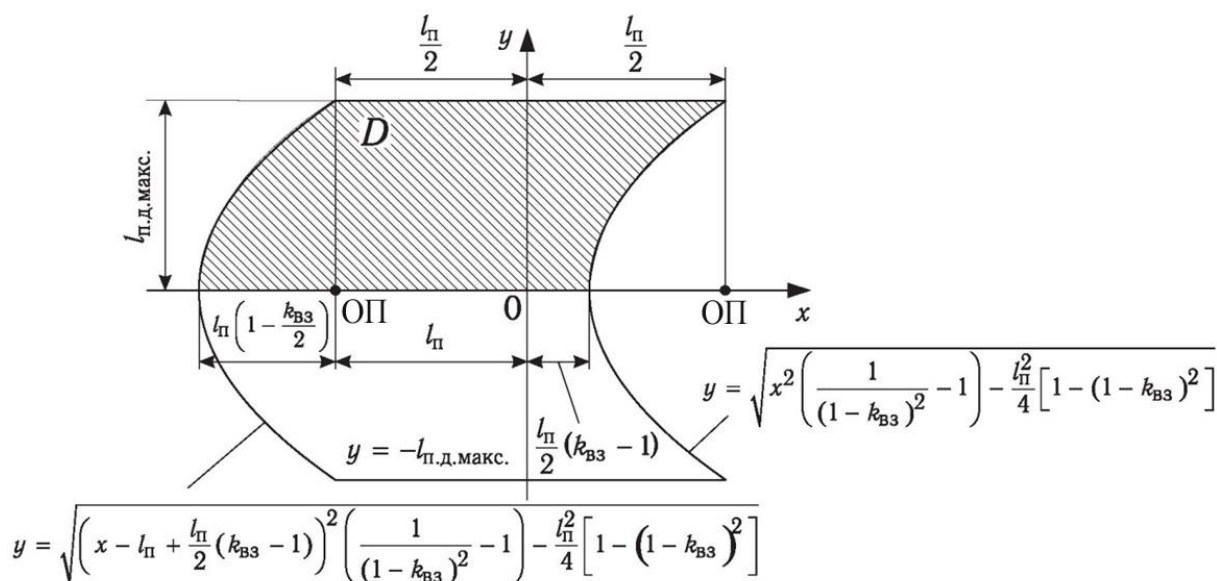


Рис. 4. Схема зоны влияния остановки

Вывод. Приведен теоретический подход расчета среднего времени подхода пассажира. Формулы и графики могут быть использованы для более точной оценки среднего времени, которое тратится пассажирами на подход к остановке ПМГОТ при расчетах сложности в передвижении пассажиров в городах при разной форме зоны пешеходной доступности ОП и с учетом выбора пассажиром ОП.

Литература:

1. Лучко, М.И. Актуальность проблемы мобильности населения. Научные подходы для ее решения / Нечаев Г.И., Лучко М.И. // ВЕСТНИК Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022 – № 9 (63) – С. 252-258.
2. Rheingold H. Net Smart: How to Thrive Online. Cambridge: The MIT Press. – 2012. 336 p.
3. Лучко, М.И. Понятие цифрового транспортного следа в информационных технологиях на пассажирском транспорте // Информационные технологии в экономике: Материалы Международной научно-практической Интернет-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 23-24 марта 2022 года [Электронное издание]. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. – С. 245-249.
4. Кузькин О. Ф., Турпак С. М. Моделирование процессов обслуживания пассажиров на остановочных пунктах в городских транспортных системах // Вестник Донецкого института автомобильного транспорта. - 2009. - № 1. - С. 164-169.
5. Спирин И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 413 с.
6. Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок. – М.: Высшая школа, 1980. – 535 с.
7. Лучко, М.И. Исследование влияния факторов на длительность ожидания пассажира на остановочном пункте методом имитационного моделирования //

ВЕСТНИК Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022 – № 7 (61). – С. 101-105.

8. Харрари Ф. Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 300 с.

9. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках. – М.: Транспорт; 1975. – 344 с.

Luchko M.I.

ASSESSMENT OF THE PEDESTRIAN COMPONENT OF THE TOTAL DURATION OF PASSENGER MOVEMENT USING A DIGITAL TRANSPORT TRAIL

Provides a theoretical approach and methodology for calculating passenger movement indicators, allowing to determine the duration of movement of a passenger in a passenger urban transport system, which will allow for more accurate consideration of transport parameters and improve the efficiency of the organization of the urban public passenger transport system.

Key words: duration of passenger movement, information technology management, route network of public transport, route vehicle, stopping point, passenger route urban public transport, passenger transport process, urban passenger transportation system of public transport

Лучко Максим Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Транспортные технологии», ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». **E-mail:** maxl_dal@mail.ru

Luchko Maxim, C.S. Eng., docent of the «Transport Technologies» Department of «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Тарарычкин Игорь Александрович, д.т.н, проф., заведующий кафедрой транспортных технологий, ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 10.11.2023

УДК 378.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТУДЕНТА ВУЗА

Лыштван Е. Ю., Каменев С. А., Воробьев С. Г.

DESIGNING AN INDIVIDUAL TRAJECTORY OF A UNIVERSITY STUDENT'S PROFESSIONAL DEVELOPMENT

Lyshtvan E. Y., Kamenev S. A., Vorobjov S. G.

В статье рассматривается понятие «индивидуальная траектория профессионального развития» студента вуза и предложена разработка индивидуальной траектории развития личности в период обучения.

Ключевые слова: индивидуальная траектория развития, проектирование траектории профессионального развития студента вуза, индивидуальный образовательный маршрут.

Введение. Современный, быстро меняющийся мир и переход общества на цифровые технологии и скоростные режимы восприятия окружающей действительности предъявляют высокие требования к подготовке специалистов, конкурентоспособных на рынке труда, компетентных и свободно владеющих своей специальностью.

В связи с этим возникает проблема смены ориентиров образования в сторону индивидуализации обучения, что вполне осуществимо при построении и реализации индивидуальной траектории развития обучающихся.

Цель данной статьи – проектирование индивидуальной траектории профессионального развития студента вуза и рассмотрение особенностей понятия «индивидуальная траектория профессионального развития».

Объект – профессиональное развитие будущего специалиста. Предмет – педагогическое проектирование индивидуальной траектории профессионального развития будущего специалиста в образовательном процессе вуза.

Под траекторией профессионального развития следует понимать процесс преобразования, саморазвития и самосовершенствования личности при приобретении профессии, готовность приспосабливаться к меняющимся условиям профессиональной среды. Под индивидуальным образовательным маршрутом будем понимать освоение студентом учебной программы с учетом его уровня индивидуальных потребностей и возможностей, обеспечивающих решение его образовательных проблем потребностей.

Точкой отсчета формирования профессиональной траектории условно можно считать школу, хотя фундамент для формирования будущих компетенций закладывают в раннем детстве в учреждениях дошкольного и школьного образования. Во многом на траекторию профессионального развития ребенка влияют особенности семьи и уровень профессиональной подготовки и знаний родителей.

Изложение основного материала. На траекторию профессионального развития личности играет темп жизни и профессиональная активность, поэтому приходится постоянно актуализировать знания, заниматься саморазвитием, подчас радикально менять сферу деятельности, проходя переподготовку. Данную функцию выполняют вузы, которым отводится роль аккумулятора знаний и поставщика современных и качественных образовательных продуктов [1].

Таким образом, индивидуальная траектория профессионального развития студента – это уникальный маршрут обеспечения собственного развития, реализуемый по авторскому сценарию в условиях непрерывного обучения.

Среди инновационных подходов к организации профессионального развития личности в условиях высшего образования следует назвать и компетентностный подход, разработанный в трудах В.И. Байденко, Э.Ф. Зеера, И.А. Зимней, Ю.В. Фролова, А.В. Хуторского, В.Д. Шадрикова, Дж. Равена и др.

Подготовка в вузах компетентных специалистов, способных к самореализации и самоактуализации в профессиональной деятельности, гармонично сочетающих в себе как личностные, так и профессионально значимые качества – стратегическая цель современного высшего профессионального образования. Образовательный процесс в вузе должен быть ориентирован на формирование активной жизненной позиции студента, на выстраивание индивидуальной стратегии личностного роста и профессионального успеха.

Профессиональная подготовка будущего специалиста с учетом его индивидуальных способностей и потребностей обеспечивается педагогическим проектированием индивидуальных траекторий профессионального развития студента в образовательной среде вуза. Педагогическое проектирование индивидуальной траектории профессионального развития – это взаимодействие студентов и профессорско-преподавательского состава по выстраиванию стратегии профессионального роста студента, предполагающее осмысление индивидуального вхождения в профессию и создание возможностей для выбора изучаемых дисциплин, их углубленного изучения, выбора форм контроля, уровня сложности

отдельных тем, задач, а также включения в различные виды социальной активности, способствующей развитию личностных профессионально значимых качеств студентов [2-3].

Таким образом, педагогическое проектирование – длительный процесс, который охватывает все годы обучения в вузе.

Последовательные этапы педагогического проектирования [4] представлены в табл. 1.

Большое значение на процесс педагогического проектирования имеют внешние и внутренние факторы.

В табл. 2 перечислены и охарактеризованы факторы, влияющие на развития профессиональных качеств будущих специалистов.

Таблица 1

Этапы педагогического проектирования профессионального развития

Этап	Содержание этапа
Поисковый (теоретический)	диагностика, целеполагание, ценностно смысловое самоопределение, исследование (микроисследования) факторов и возможностей проектирования и реализации индивидуальной траектории профессионального развития студентов в образовательном процессе вуза
Моделирующий (методологический)	проблематизация, концептуализация, разработка моделей: выпускника, образовательного процесса; индивидуальной траектории профессионального развития будущего специалиста
Операционально-деятельностный (технологический)	реализация индивидуальных траекторий профессионального развития студентов: технологий, форм, методов и средств обучения, учения, внеаудиторной деятельности студентов и преподавателей на каждом этапе; разработка критериев и показателей для оценки результатов реализации индивидуальных траекторий профессионального развития студентов
Контрольный (рефлексивный)	презентация промежуточных и итоговых результатов, их экспертиза и анализ, самооценка, рефлексия студентов и преподавателей (соответствие результата первоначальному замыслу, качество совместной деятельности и отношений), коррекция содержательных и процессуальных компонентов проектирования на основе обратной связи
Преобразующий (стратегический)	возникновение нового проектного замысла, разработка стратегий дальнейшего профессионального развития специалистов в новых условиях (после завершения обучения в вузе)

Таблица 2

Факторы, влияющие на профессиональное развитие будущего специалиста

Фактор	Сущность фактора	Структурные элементы фактора
Внутренние факторы	Субъективные факторы, представляющие собой отношение индивида к общественным интересам с точки зрения понимания и выполнения им своих учебных и в будущем профессиональных обязанностей.	1. Психологические; 2. Морально-этические характеристики личности: 2.1. Мотивы, интересы, направленность личности; 2.2. Способности, уровень знаний, личностный опыт; 2.3. Ценностные ориентации, ментальность.
Внешние факторы	Факторы, аккумулирующиеся образовательной средой вуза и окружением.	1. Общение; 2. Учебная деятельность и способы ее организации; 3. Научно-исследовательская деятельность; 4. Социальная активность студентов; 5. Студенческий коллектив; 6. Преподаватель и стиль его взаимодействия со студентами; 7. Традиции.

Отметим, что образовательная среда высшего учебного заведения должна быть насыщена самыми разнообразными возможностями для студента: интенсивность обучения, комфортность, возможность индивидуализации обучения, открытость, использование информационных ресурсов и различных образовательных технологий. На всех этапах проектирования индивидуальных траекторий профессионального развития студентов

предлагается применять следующие технологии обучения: 1) модульно-рейтинговая технология; 2) технология вариативного обучения; 3) технология контекстного обучения; 4) технология организации научно-исследовательской работы (НИР) студентов; 5) самостоятельная работа студентов; 6) портфолио-технология; 7) технология позиционного обучения; 8) технология развития творческого и критического мышления и др.

Формами организации учебного процесса выступают лекции, семинарские занятия, организационно-деятельностные игры, тренинги, практикумы, индивидуальные консультации, творческие и научные лаборатории, видеоконференции, научно-практические конференции, круглые столы, проблемные семинары, выездные школы, сборы, практика. В рамках предложенных форм используются следующие методы: 1) метод проектов; 2) дискуссия; 3) игра (ролевая, деловая); 4) диалог; 5) анализ ситуации; 6) кейс-метод.

В век больших возможностей Интернета участники образовательного процесса могут использовать информационно-коммуникационные средства:

- сайты института (факультета), кафедры, группы, отдельных преподавателей, где размещаются электронные ресурсы по дисциплинам, даются задания студентам, на форумах происходит обсуждение отдельных тем, проблем;

- платформы и цифровые ресурсы для дистанционного обучения, прохождения онлайн-тестов по темам изучаемой дисциплины, выполнения домашнего задания;

- электронную почту, чаты телеграм-каналов и др.

- электронные учебники, приложения и программы, которые позволяют самостоятельно пройти ту или иную тему и осуществить самоконтроль.

Задачи современных технологий – обеспечить возможность организации, поддержки и оптимизации образовательного процесса в условиях очного, заочного, очно-заочного или дистанционного формата обучения [5]. Успешно реализовать данные задачи позволяет популярный сервис для проведения онлайн-занятий – «Zoom», обладающий широким спектром образовательных возможностей.

Функционал сервиса «Zoom», позволяющий осуществлять проектирование индивидуальной траектории образовательного процесса, включает в себя:

1. Возможность демонстрации с личного экрана пользователя презентаций, фото- и видеоматериалов, текстовых учебных и справочных материалов. Данная опция удобна при любой форме занятия (лекция, практическое занятие, контроль, защита студенческих работ и другое), так как позволяет предоставлять для обзора материалы всех участников.

2. Комментирование демонстрируемых материалов в онлайн-режиме создает благоприятные условия для живого общения, что позволяет

проводить гибкую корректировку тактики индивидуального подхода.

3. Электронная доска позволяет делать поясняющие записи и рисунки в ходе онлайн-занятия, что оптимизирует подачу информации, делая ее наглядной и своевременной.

4. Удобный мессенджер в «Zoom» обеспечивает возможность записи мгновенных сообщений в общем чате или личным сообщением. Данный функционал позволяет осуществлять командную работу с индивидуальным распределением задач (заданий, материала для ознакомления).

5. Запись трансляции конференции в «Zoom» позволяет создавать материал для ретрансляции материала для отсутствующих или в качестве информационного материала для повторения.

6. Специальные функции (комментарий, стрелка, метка и другие) актуализируют отдельные фрагменты подаваемой информации, создавая акцент внимания и подчеркивая нюансы, рассматриваемого материала. Эта опция позволяет вести слушателей по заданному маршруту информационной траектории без отклонений от логики подачи образовательного материала.

7. Виртуальный фон снимает требования к реальному интерьеру помещения, из которого происходит трансляция и создает необходимую для образовательного процесса атмосферу.

Очевидно, что возможностями сервиса «Zoom» можно решить целую группу образовательных задач.

Следует обратить внимание на внеаудиторную деятельность студентов, в которой способны реализоваться и развиваться личностные интересы студентов, их лидерские и организаторские качества. Данный вид деятельности может быть осуществлен за счет: 1) различных тематических клубов (любителей техники, физики, химии и др.); 2) творческих объединений (ученых, художников, музыкантов и др.); 3) научно-технических кафедральных и университетских кружков; 4) спортивных секций; 5) работы органов студенческого самоуправления, волонтерской деятельности и др.

Практическое осуществление этапов педагогического сопровождения и проектирования профессионального развития студентов можно рассмотреть на примере образовательного процесса по программе бакалавриата направления подготовки 03.03.02 Физика, осуществляемого выпускающей кафедрой авторов. Данный пример приведен в таблице 3 и представляет собой систему образовательных мероприятий сгруппированных и распределенных по курсам бакалавриата.

Таблица 3

**Пример практического осуществления педагогического проектирования
профессионального развития**

Курс	Этап педагогического проектирования	Содержание
1	Поисковый (теоретический)	1. 75% дисциплин курса из модуля гуманитарных дисциплин и модуля естественных дисциплин; 2. 25% дисциплин курса из модуля профессиональных дисциплин; 3. Ознакомление с научными темами выпускающей кафедры; 4. Участие в семинарах и студенческих конференциях в качестве слушателей и участников; 5. Ознакомление с перечнем и содержанием олимпиадных, проектных и конкурсных работ предыдущих лет; 6. Ознакомление с возможностями кафедры и вуза по обеспечению культурного и спортивно-оздоровительного досуга; 7. Участие в мероприятиях кафедры и вуза.
2	Моделирующий (методологический)	1. 62,5% дисциплин курса из модуля гуманитарных дисциплин и модуля естественных дисциплин; 2. 37,5% дисциплин курса из модуля профессиональных дисциплин; 3. Учебная практика; 4. Ознакомление с методическими разработками кафедры. 5. Участие в семинарах и студенческих конференциях в качестве участников в соавторстве со студентами старших курсов; 6. Участие в олимпиадах, проектных и конкурсных работах.
3	Операционно-деятельностный (технологический)	1. 37,5% дисциплин курса из модуля гуманитарных дисциплин и модуля естественных дисциплин; 2. 62,5% дисциплин курса из модуля профессиональных дисциплин; 3. Производственная (педагогическая) практика; 4. Участие в методических разработках кафедры. 5. Участие в семинарах и студенческих конференциях в качестве участников в соавторстве со студентами младших курсов; 6. Участие в олимпиадах, проектных и конкурсных работах. Помощь в подготовке к конкурсным работам младших курсов.
4	Контрольный (рефлексивный)	1. 100% дисциплин курса из модуля профессиональных дисциплин и дисциплин профессиональной направленности; 2. Производственная (педагогическая) практика, преддипломная практика; 3. Участие в научных темах и методических разработках кафедры. 4. Участие в семинарах и студенческих конференциях в качестве участников и наставников студентов младших курсов; 5. Написание тезисов докладов и научных статей в соавторстве с сотрудниками кафедры; 6. Участие в олимпиадах, проектных и конкурсных работах. Помощь в подготовке к конкурсным работам младших курсов; 7. Подготовка выпускной квалификационной работы бакалавра.
-	Преобразующий (стратегический)	1. Подача документов в магистратуру; 2. Сдача вступительных экзаменов.

В табл. 3 сделан акцент только на мероприятия, существенно влияющие на профессиональное развитие студента.

В [4] выделены 5 основных тенденций педагогического проектирования индивидуальных траекторий профессионального развития будущих специалистов в образовательном процессе вуза: 1) персонализация; 2) возрастание субъектности; 3) нелинейность; 4) мобильность; 5) полифункциональность.

По мнению авторов, это означает, что для осуществления успешного проектирования индивидуальных траекторий профессионального развития необходимо учитывать:

1) необходимость гармоничного соотношения индивидуальных свойств личности студента и

профессиональной сферы его будущей деятельности;

2) потребность в самовыражении, профессиональном развитии, успешности и самореализации в личностном и социальном плане;

3) индивидуальность и нелинейность темпов профессионального развития;

4) необходимость формирования навыка мобилизованности в обучении новому и принятия нестандартных решений;

5) возможности преодоления конфликтных точек личностного и профессионального развития и изменения траектории дальнейшего развития.

К преподавателю, как к стороне, играющей значительную роль в проектировании индивидуальной траектории профессионального

развития будущего специалиста, предъявляются следующие требования: 1) креативность; 2) мобильность; 3) психологическая готовность к разноплановой педагогической деятельности (лектора, организатора, консультанта, руководителя проекта и др.). В современных реалиях учебного процесса преподаватель имеет значение не только как транслятор знаний, но и как консультант и помощник, оказывающий студенту педагогическую поддержку [6].

Выводы. На основании вышеизложенного можно выдвинуть несколько значимых тезисов, определяющих фактор успешности проектирования индивидуальной траектории профессионального развития студента вуза:

1. Образовательная среда высшего учебного заведения должна быть насыщена самыми разнообразными технологиями обучения и формами организации учебного процесса.

2. Необходимо учитывать внешние и внутренние факторы, влияющие на профессиональное развитие будущего специалиста.

3. Каждому этапу педагогического проектирования профессионального развития соответствует определенная система действий и образовательных мероприятий.

4. В условиях реалий современности, возможности информационно-коммуникационных средств и электронных приложений являются значимыми средствами в обеспечении возможности организации, поддержки и оптимизации образовательного процесса.

5. Современные тенденции педагогического проектирования индивидуальных траекторий профессионального развития будущих специалистов вызывают необходимость учитывать ряд новых факторов, что видоизменяет роль преподавателя в образовательном процессе вуза.

Л и т е р а т у р а

1. Тактарова С.В., Щетинина Н.Ю. Индивидуальная профессиональная траектория: формирование условий для непрерывного обучения // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. №2 (22). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/individualnaya-professionalnaya-traektoriya-formirovanie-usloviy-dlya-nepretyvnogo-obucheniya>

2. Колесникова И. А. Педагогическое проектирование : учеб. пособие для высш. учеб. заведений / И. А. Колесникова, М. П. Горчакова-Сибирская ; под ред. И. А. Колесниковой. – М.: Академия, 2005. – 288 с.

3. Хуторской А. В. Современная дидактика: учеб. для вузов / А. В. Хуторской. – СПб.: Питер, 2001. – 544 с.

4. Бережная Ирина Федоровна. Педагогическое проектирование индивидуальной траектории профессионального развития будущего специалиста // автореф. на соиск. уч. степ. д. п. н. специальность 13.00.08 Теория и методика профессионального образования, Москва. 2012.

<https://www.dissercat.com/content/pedagogicheskoe-proektirovanie-individualnoi-traektorii-professionalnogo-razvitiya-budushcheysclid=lq5obo5hc3287891090>

5. Горбачева О.А., Горлова Ю.И., Никитина И.В. Виды и возможности интернет-сервисов и платформ для организации дистанционного обучения студентов вузов // Ученые записки ОГУ. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2020. №2 (87). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vidy-i-vozmozhnosti-internet-servisov-i-platform-dlya-organizatsii-distantsionnogo-obucheniya-studentov-vuzov>

6. Бережная, И.Ф. Взаимодействие преподавателей и студентов в процессе проектирования индивидуальной траектории профессионального развития / И.Ф. Бережная // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. – 2012. – №1. – С. 28-32. – URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/educ/2012/01/2012-01-05.pdf>

Lyshtvan E.Y., Kamenev S.A., Vorobjov S.G. DESIGNING AN INDIVIDUAL TRAJECTORY OF A UNIVERSITY STUDENT'S PROFESSIONAL DEVELOPMENT

The article examines the concept of "individual trajectory of professional development" of a university student and proposes the development of an individual trajectory of personality development during the period of study.

Key words: individual development trajectory, designing a university student's professional development trajectory, individual educational route.

Лыштван Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». E-mail: lustva_lena@mail.ru

Каменев Степан Александрович, старший преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». E-mail: neiroxxx@mail.ru

Воробьев Сергей Германович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». E-mail: delfin_lg@mail.ru

Lyshtvan Elena, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Kamenev Stepan, senior lecturer of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Vorobjov Sergey, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Корсунов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 01.12.2023

УДК 51-77:332.133.2

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Малахова В. В., Малахов О. В.

ANALYSIS OF STATISTICAL DATA USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Malakhova V. V., Malakhov O. V.

В статье рассматривается процедура проведения анализа массива статистических данных с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Последовательность действий подробно описана с разбиением на следующие этапы: получение исходной информации, формирование исходных данных, обучение модели кластеризации данных, выполнение анализа данных с использованием библиотек математических функций numpy, sklearn, pandas и seaborn.

Ключевые слова: искусственный интеллект, анализ статистических данных, кластеризация.

Введение. В наше время искусственный интеллект стал неотъемлемой частью поисковых систем, его используют для обработки значительных объемов статистических данных, управления сложными технологическими процессами и автоматизированными системами без вмешательства человека [1].

Владение технологиями искусственного интеллекта стало критерием, который определит переход отдельных стран и народов к новой ступени развития человечества или их пребывание на периферии цивилизации [2].

Постановка задачи. Разработать и описать процедуру проведения анализа массива статистических данных с использованием алгоритмов искусственного интеллекта.

Этап 1. Получение исходной информации. В качестве источника исходной информации используем таблицу «Демографические показатели предприятий по субъектам Российской Федерации в 2023г.» официального сайта Федеральной службы государственной статистики РФ [3]. Поля таблицы содержат текстовую информацию и цифровые данные о количестве предприятий в формате натуральных чисел.

Форма представления статистических данных по столбцам таблицы: территориальное образование; количество активных предприятий с разделением на только созданных и уже существующих от одного года до пяти лет по годам; количество ликвидированных предприятий также с

разделением по годам существования. Каждая строка таблицы содержит информацию по отдельным территориальным образованиям: округам, областям.

Этап 2. Формирование исходных данных.

Целью проведения анализа полученной статистической информации является кластеризация регионов по признаку инвестиционной привлекательности. В качестве критериев оценки инвестиционной привлекательности регионов используем:

- уровень инвестиционного потенциала как отношение количества открытых в период 2023 г. предприятий к общему количеству активных предприятий региона (%);

- уровень инвестиционных рисков как отношение количества ликвидированных в период 2023 г. предприятий к общему количеству активных предприятий региона (%).

Выполняем преобразование исходного файла электронной таблицы в формат CSV – текстовую форму представления электронных таблиц [4]. В документе формата CSV каждая строка таблицы представлена строкой текстового файла с разделителями. В качестве разделителя используем общепринятый символ «запятая» (листинг 1).

```
place,operate,generated,G1,G2,G3,G4,G5,destroyed,D1,D2,D3,D4,D5
Центральный федеральный
округ,956053,112397,102005,66162,51225,55993,49086,100217,197
88,16683,8033,7706,6131
Белгородская
область,20148,1299,1432,1375,1208,1413,1215,1260,42,106,108,155
,112
Брянская
область,10275,495,462,464,454,500,510,566,12,25,32,42,34
Владимирская
область,17349,851,839,794,724,818,808,709,27,36,28,28,43
```

Листинг 1. Представление исходных данных в формате CSV – кода

Для обработки информации средствами языка программирования Python используем библиотеку математических функций с открытым исходным

кодом numpy [5]. Загружаем исходный CSV файл с образованием структуры данных Dataframe библиотеки математических функций numpy (листинг 2).

```
import numpy as np
df = pd.read_csv('Demographic_indicators_of_enterprises.csv')
```

Листинг 2. Загрузка исходного CSV файла в массив средствами библиотеки numpy

Визуализация тестового набора данных, выполненная средствами Python с использованием графической библиотеки matplotlib.pyplot, приведена на рис. 1.

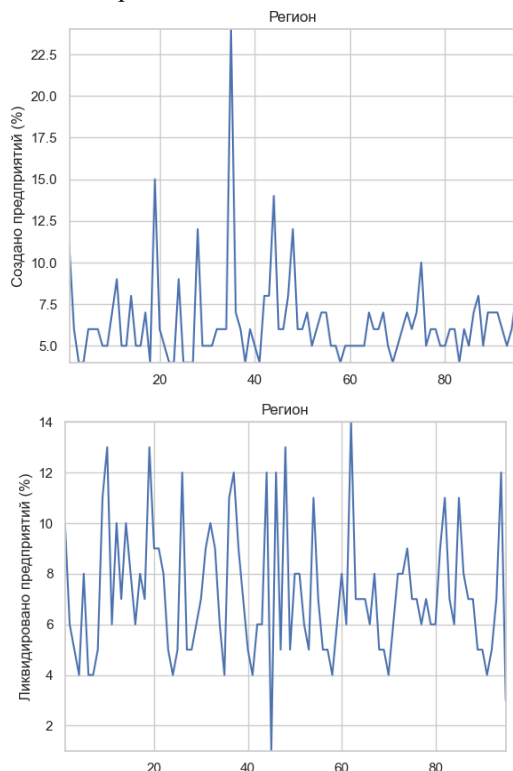


Рис. 1. Визуализация исходных данных

Этап 3. Обучение модели кластеризации данных. Как можно заметить, табличное представление, как и визуализация исходных данных в форме графика, не дают возможности произвести аргументируемую классификацию регионов по их инвестиционной привлекательности. Произведем кластеризацию данных с использованием алгоритмов искусственного интеллекта.

В рамках проводимого исследования выполняем кластеризацию данных, принимая условие, что количество кластеров заранее не известно. Для обучения модели воспользуемся непараметрическим алгоритмом, основанном на методе сдвига среднего (Mean Shift) [6].

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность базового процесса при анализе распределения данных с использованием алгоритма

сдвига среднего, является ширина окна (bandwidth). Узкое окно способствует образованию множества кластеров, тогда как чрезмерно широкое окно может привести к объединению отдельных кластеров в более крупные структуры. Важно отметить, что изменение ширины окна в любую сторону от оптимального значения может снизить информативность результатов кластеризации данных.

Подключаем модуль sklearn.cluster [7] библиотеки sklearn. Ширина окна задается величиной параметра quantile (листинг 3).

```
from sklearn.cluster import MeanShift, estimate_bandwidth
bandwidth_X = estimate_bandwidth(X, quantile=0.25,
n_samples=len(X))
```

Листинг 3. Подключение модуля sklearn.cluster, оценка ширины окна для структуры данных X

Производим обучение модели кластеризации с учетом заданной оценки ширины окна (Листинг 4).

```
meanshift_model = MeanShift(bandwidth=bandwidth_X,
bin_seeding=True)
meanshift_model.fit(X)
```

Листинг 4. Обучение модели кластеризации на основе метода сдвига среднего

Этап 4 – Выполнение анализа данных с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Определяем количество кластеров num_clusters для заданной ширины окна и массив координат их центров cluster_centers (листинг 5).

```
labels = meanshift_model.labels_
num_clusters = len(np.unique(labels))
cluster_centers = meanshift_model.cluster_centers_
```

Листинг 5. Определение количества кластеров и расположение их центров

Результат работы программы в текстовом виде представлен на листинге 6.

```
Количество кластеров = 7
Центры кластеров:
[[ 6.02105257  6.89885662]
 [14.01077003 12.93104111]
 [10.86757979  5.74700038]
 [ 8.19056338  2.97550537]
 [24.36916695  4.52817145]
 [11.7563566  10.48236866]
 [ 5.08935574 14.88261109]]
```

Листинг 6. Результат определения количества кластеров и расположения их центров

Графическое представление результата с использованием библиотеки seaborn приведено на рис. 2.

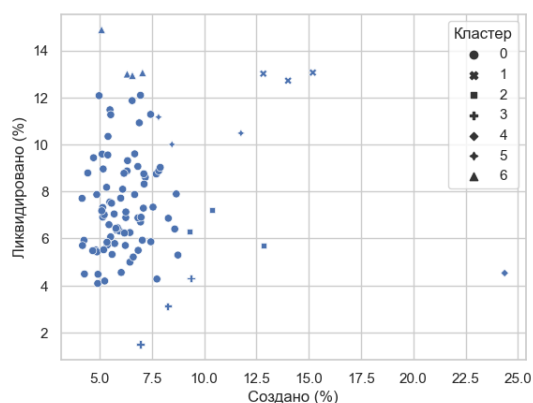


Рис. 2. Графическое представление результата кластеризации данных

Заключение. В работе рассматривается процедура проведения анализа массива статистических данных с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Последовательность действий подробно описана с разбиением на следующие этапы: получение исходной информации, формирование исходных данных, обучение модели кластеризации данных, выполнение анализа данных с использованием библиотек математических функций *numpy*, *sklearn*, *pandas* и *seaborn*.

Применение интеллектуальных алгоритмов при обработке больших объемов информации позволяет классифицировать имеющиеся данные, основываясь как на заранее определенных критериях, так и посредством обнаружения различных, изначально скрытых, показателей сходства.

Литература

1. Киселев, Б. Н. Результат интеллектуальной деятельности, созданный искусственным интеллектом, и результат интеллектуальной деятельности, созданный при помощи искусственного интеллекта / Б. Н. Киселев // Актуальные проблемы науки и практики: Гатчинские чтения-2019 : Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции, Гатчина, 17–18 мая 2019 года. Том 2. – Гатчина: Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, 2019. – С. 123–126. – EDN GDERHR.
2. Гутаревич, В. О. Проблемы и направления совершенствования экологических характеристик горно-транспортных машин с дизельной установкой / В. О. Гутаревич, К. А. Рябко, Е. В. Рябко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – № 1(11). – С. 12–17. – EDN YVNJQN.
3. Росстат. Информационно-аналитические материалы [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium> (дата обращения 24.10.2023).

4. Пример файла CSV. Информационно-аналитические материалы [Электронный ресурс]. URL: https://learn4kid-python.firebaseio.com/python_data_structure/python_csv_al1/#пример-файла-csv (дата обращения 24.10.2023).

5. Библиотека математических функций Python *numpy* [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org> (дата обращения 24.09.2023).

6. Московкин, В. М. Кластерный анализ инновационной активности регионов РФ на основе метода Mean Shift / В. М. Московкин, М. Сизьунго, Н. А. Голиков // Оригинальные исследования. – 2019. – Т. 9, № 6. – С. 117–149. – EDN XZKYSZ.

7. Кластеризация Mean Shift [Электронный ресурс]. URL: <https://pythonprogramming.net/mean-shift-from-scratch-python-machine-learning-tutorial/> (дата обращения 24.09.2023).

Malakhova V.V., Malakhov O.V.

ANALYSIS OF STATISTICAL DATA USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

*The article discusses the procedure for analyzing an array of statistical data using artificial intelligence algorithms. The sequence of actions is described in detail, divided into the following stages: obtaining initial information, generating initial data, training a data clustering model, performing data analysis using libraries of mathematical functions *numpy*, *sklearn*, *pandas* and *seaborn*.*

Key words: artificial intelligence, statistical data analysis, clustering.

Малахова Виктория Владимировна, доцент кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
E-mail: malakhova_viktoria84@mail.ru

Malakhova Victoria Vladimirovna, Associate Professor of the Departments of Applied Mathematics of the Luhansk «LSU named after V. Dahl».

Малахов Олег Владимирович, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
E-mail: oleg_home1@mail.ru

Malakhov Oleg Vladimirovich, Associate Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of the «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Тарашанский Марк Танкумович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 27.10.2023

УДК 4с (англ.)

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА

Мелёхина А. В.

THE ROLE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF LEARNING A FOREIGN LANGUAGE

Melyokhina A. V.

Мировая глобализация предъявляет все более жесткие требования к выпускникам высших учебных заведений. Кроме профессиональных компетенций, включающих определенный набор умений и навыков, современный специалист должен не только ориентироваться в своем деле, но и в соответствии с государственными образовательными стандартами уметь читать зарубежную профессиональную литературу, находить необходимую информацию и надлежащим образом применять результаты иноязычной подготовки в своей профессиональной деятельности. Уровень владения иностранным языком студентами во многом зависит от эффективной методики преподавания и использования информационных технологий. В статье обращается внимание на то, что цифровые технологии стали важным фактором в процессе изучения языка. Электронные коммуникационные устройства, такие как компьютеры, ноутбуки, мобильные телефоны, глобальная система связи, видео- и аудиоконференции, видеотелефония, веб-трансляции и чаты стали неотъемлемой частью изучения языков и их широкого использования в образовании.

Ключевые слова: иностранный язык, информационные технологии, современный метод.

Введение. За последнее десятилетие цифровые технологии стали неотъемлемой частью образовательного процесса. Эта технологическая эволюция человечества стала важной образовательной предпосылкой для нашей страны, чтобы присоединиться к безграничной учебной среде, как для преподавателей, так и для студентов. Сегодня ряд учебных заведений в России все еще испытывают трудности в этом процессе, поскольку определенное количество учебных заведений все еще не обеспечено соответствующими учебными устройствами, такими как проекторы, интерактивные доски, портативные компьютеры и другое соответствующее оборудование. Большинство преподавателей иностранного языка сталкиваются с некоторыми противоречиями: стремлением сделать занятия иностранного языка

более эффективными и интересными с помощью цифровых технологий и отсутствием технических возможностей на рабочем месте; быстрым развитием образовательных технологических возможностей и низким уровнем осведомленности преподавателей об использовании информационных технологий. Таким образом, они остаются с проблемой и снижают уровень мотивации к изучению иностранного языка.

Изложение основного материала.

Иностранный язык является одним из важных элементов, влияющих на эффективную профессиональную деятельность любого специалиста. Студенты в течение обучения должны овладеть основными навыками иностранного языка, такими как аудирование, говорение, чтение и письмо [1, с. 217–220]. Кроме того, большинство ученых считают, что одним из важных элементов обучения является метод или подход, который используется в аудитории, чтобы облегчить процесс изучения языка. Как отметил Беккер, преподаватели, имеющие доступ к компьютеру как к учебному инструменту и обладающие достаточно высокими навыками цифровой грамотности, однозначно имеют преимущество в своей профессиональной сфере и вместе с тем обеспечивают высокое качество образования [2, с. 10–12].

Следует отметить, что в последнее время отечественные ученые также обращают большое внимание на указанную проблему, в результате чего появляется ряд исследований, освещающих проблему использования информационных технологий в образовательном процессе нашей страны. Но, несмотря на глубокую научную работу по применению инновационных технологий в учебно-образовательном процессе, вопрос использования подобных достижений в процессе изучения иностранных языков требует более детальной проработки в контексте современных образовательных тенденций.

Система образования постоянно обновляется, поэтому определяющим фактором образовательных изменений является научно-технический прогресс, который невозможен без применения информационных технологий. Сегодня большое внимание уделяется разработке стандартов информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в образовании благодаря интеграции нашей страны в мировые образовательные процессы и сети. Цифровая часть образовательного процесса стала неотъемлемой частью современного общества. Учитывая, что современный конкурентоспособный специалист должен быть развитой личностью, обладающей всеми необходимыми для эффективной профессиональной деятельности компетенциями, он еще должен уметь усваивать учебный материал, используя инновационные образовательные технологии.

Технологии всегда были важной частью образовательного процесса. Особенно актуальными они стали в начале XXI века, когда доступ к компьютерным технологиям и всемирной сети Интернет получили практически все жители цивилизованных стран. Цифровые технологии стали неотъемлемой частью преподавательской деятельности, с помощью которой они расширяют свои возможности и облегчают студентам процесс изучения иностранного языка.

В отечественной и зарубежной научной литературе все чаще можно наблюдать актуальность термина «инновационная педагогическая технология», который предполагает целенаправленное, систематическое и последовательное внедрение в практику оригинальных, новаторских способов, приемов, педагогических действий и средств, охватывающих целостный учебно-образовательный процесс от определения его цели до ожидаемых результатов [3, с. 338].

Основными источниками и составными частями инновационных педагогических технологий являются:

1. Социальные изменения и, как следствие, появление нового педагогического мышления.
2. Научные достижения в педагогике, психологии, социологии и так далее.
3. Поиск передового перспективного опыта.

Применение технологий существенно изменило методы преподавания многих дисциплин, в частности иностранного языка. Инновационные педагогические технологии или электронное обучение предлагают множество альтернатив, как сделать обучение более интересным и продуктивным с точки зрения совершенствования образовательного процесса.

Традиционный образ учителя или преподавателя, стоящего перед классом/аудиторией, читающего лекцию или объясняющего новый материал, должен трансформироваться с учетом развития современных технологий. Ученые

отмечают, что использование технологий может создать учебную атмосферу, которая сосредоточена вокруг ученика, а не вокруг учителя, что, в свою очередь, создает позитивные изменения. Они подчеркивают, что с помощью компьютерных технологий изучение иностранного языка становится активным местом, наполненным значимыми задачами, где учащиеся становятся центром учебного процесса. Некоторые зарубежные ученые утверждают, что использование компьютерных технологий свидетельствует о высоком уровне цифровой грамотности как преподавателей, так и студентов [4, с. 175]. Технологии поощряют учащихся к индивидуальному обучению и приобретению ответственного поведения. Самостоятельное использование технологий дает учащимся возможность самостоятельно ориентироваться в учебном материале и определять свои сильные и слабые стороны в процессе изучения языка. Развитие знаний и навыков учащихся, использующих компьютерные технологии, обеспечивает равные возможности независимо от происхождения и места жительства.

Исследуя дидактические возможности информационных технологий, ученые отмечают, что они способствуют лучшему усвоению знаний; активизируют развитие различных типов умений и навыков, касающихся владения языком (аудирование на основе адаптированных и аутентичных аудио- или видеофайлов, монологическое и диалогическое говорение, перевод и реферирование текстов по специальности, чтение с использованием материалов сети Интернет; обогащение активного и пассивного словарных запасов; понимание и использование современной лексики, которая отражает актуальное состояние иностранного языка в той или иной стране; креативность и развитие нестандартного мышления во время изучения языка и многое другое). Неоднократно подчеркивается необходимость индивидуализации и дифференциации работы студентов, поскольку каждый из них при использовании современных технологий в процессе изучения иностранного языка способен выбрать свой собственный темп и объем учебного материала, уровень его сложности и в конечном итоге метод контроля и оценки.

Процесс использования информационных технологий в процессе обучения иностранному языку имеет определенные преимущества, которые следует учитывать при планировании занятий: мгновенная обратная связь между преподавателем и студентом при использовании цифровых технологий, архивное хранение больших объемов информации с возможностью их передачи, автоматический перевод с помощью компьютерных переводчиков, автоматический перевод с помощью компьютерных словарей, автоматическое упоминание и аннотирование материалов [5, с. 56–

57]. Таким образом, основываясь на собственном опыте и научных достижениях многих ученых, следует отметить, что студенты действительно очень активно и мотивированно участвуют в занятиях, во время которых используются передовые технологии. Мин Пун в своей статье отметил следующие положительные моменты в процессе обучения иностранному языку с помощью цифровых технологий: 1) мотивирует учеников/студентов учить иностранный язык; 2) развивает коммуникативную компетентность учащихся/студентов; 3) расширяет знания учащихся/студентов о культуре иностранного языка; 4) улучшает эффективность обучения; 5) улучшает взаимодействие не только между преподавателем и студентами, но и между всеми участниками выбранной учебной среды; 6) предоставляет возможности для преподавания иностранного языка вне аудиторий.

Однако ученый также отмечает, что чрезмерное и неправильное использование информационных технологий преподавателями может привести к обманчивой симуляции учебного процесса [4, с. 32–33]. Мин Пун отмечает, что, как правило, о недостатках использования информационных технологий в процессе изучения иностранного языка говорят учителя среднего и старшего возраста. Среди наиболее распространенных называют: 1) вероятность отвлечения студентов и отхода от основной темы занятий; 2) неправильное или неэффективное использование информационных учебных технологий; 3) неосознанное чрезмерное использование технологий студентами; 4) определенный разрыв между традиционными и современными методами обучения.

Раскрыв некоторые теоретические аспекты использования цифровых технологий в процессе изучения иностранного языка, следует обратить внимание и на практические. Отметим, что новейшие информационные технологии типа Google Meet, ZOOM, Microsoft Teams, Skype и др. успешно используются преподавателями во время дистанционного обучения на уроках иностранного языка. Они значительно расширяют аудиторию студентов, предоставляя возможность учиться не только в нашей стране, но и за ее пределами. Дистанционное обучение, которое стало вынужденной формой получения знаний со времен COVID-19, заставляет преподавателей выбирать методы и принципы обучения, которые были бы эффективны в виртуальной образовательной среде.

Одна из таких форм дистанционного обучения называется Flipped Learning. Она может рассматриваться как один из методов онлайн-обучения, который обеспечивается за счет информационных технологий и помогает преподавателям переформатировать существующие занятия в новую образовательную структуру.

Этап 1. Подготовительный. Преподаватель определяет содержание обучения, создает видеолекции и предоставляет их студентам, а также организует учебную работу, связанную с видеолекциями, готовит материалы для занятий по иностранному языку.

Этап 2. Проверка. Преподаватель проверяет понимание учащимися видеоурока, теоретического материала и наблюдает за процессом обучения.

Этап 3. Самообучение. Студент учится самостоятельно в своем собственном темпе, просматривая видеолекции.

Этап 4. Практический. Во время освоения материала студенты используют знания, полученные из видеолекции, и выполняют практические задания.

Далее преподаватель проверяет и анализирует уровень понимания, знаний студентов, полученных в ходе занятий, с помощью Zoom-конференций, концентрируется на более сложных задачах. Кроме того, в этом подходе особое внимание уделяется образовательным технологиям и обучению, основанному на деятельности студентов, как основным компонентам структуры урока. Основные ценности флип-обучения можно классифицировать как деятельность, ориентированную на ученика, индивидуальное обучение и лидерство.

Чтобы сделать подобные формы обучения более доступными и эффективными, учебное заведение должно быть готово к определенным технологическим усовершенствованиям:

1. Инфраструктура для записи лекций. Это должно быть определенное программное обеспечение для записи лекций, установленное на компьютере каждого преподавателя, отдельная студия записи лекций или же оборудованные аудиолaborатории в учебном заведении.

2. Система управления обучением. В этом случае это должен быть веб-портал, где студенты могут получить доступ к контенту курсов, на которые они зачислены, отправлять задания, просматривать свои оценки и т.д. Подобные системы (платформы) могут содержать инструменты для управления и предоставления образовательного видеоконтента. Среди наиболее популярных в образовательной среде систем следует назвать Google Classroom, Acorn, Blackboard Learn и Moodle.

3. Система управления учебными материалами – это веб-портал, который используется для хранения, управления и распространения видеоконтента. Развертывание одного из них является обязательным для образовательных учреждений, которые работают в режиме онлайн и создают много видеоконтента. Многие системы управления контентом включают в себя такие функции, как захват фрагментов с экрана, редактирование видео и аналитические инструменты, которые предоставляют

практическую информацию о том, как студенты взаимодействуют с видеоконтентом.

Результаты исследования. В статье рассмотрены некоторые важные вопросы, связанные с использованием технологий в процессе изучения иностранного языка. Обзор литературы показал, что технологические ресурсы не могут гарантировать эффективность изучения языка без систематической профессиональной деятельности преподавателя и желания и мотивации студентов. Статья раскрывает некоторые важные вопросы, связанные с использованием технологий в изучении и преподавании иностранного языка: определение соответствующих теоретических основ, определяющих методы и принципы работы цифровых технологий в образовательном процессе, предварительные исследования по использованию технологий для совершенствования навыков изучения иностранного языка и рекомендации по использованию новых.

Выводы. Важным условием эффективного использования цифровых технологий в процессе обучения иностранному языку является непосредственная цифровая грамотность как преподавателей, так и студентов. Им необходима поддержка и обучение, чтобы интегрировать технологии в преподавание и изучение языка. Опрос показал, что если технология используется правильно, она может принести много преимуществ как преподавательскому составу, так и студенческому сообществу. Кроме того, сделан вывод, что использование технологий играет ключевую роль в процессе индивидуализации изучения иностранного языка, руководствуясь собственными потребностями студента и его темпом усвоения материала. Это, в свою очередь, создает высокий уровень мотивации и желания изучать иностранный язык.

Л и т е р а т у р а

1. Grabe W., Stoller, F.L. Teaching and researching reading. New York : Pearson Education, 2011. 291 p.
2. Becker H.J. Findings from the teaching, learning, and computing survey: Is Larry Cuban right? *Education Policy Analysis Archives*. 2000. № 8(51).
3. Bull S., Ma Y. Raising learner awareness of language learning strategies in situations of limited resources. *Interactive Learning Environments*. 2001. № 9(2). P. 171–200.
4. Pun M. The use of multimedia technology in English language teaching: a global perspective. *Crossing the Border: International Journal of Interdisciplinary Studies*. 2014. № 1(1). P. 29–38.

6. Сысоев П. В. Информационные и коммуникативные технологии в лингвистическом образовании / Павел Викторович Сысоев. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 264 с.

Melyokhina A.V.

THE ROLE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF LEARNING A FOREIGN LANGUAGE

World globalization puts increasingly strict demands on graduates of higher education institutions. In addition to professional competencies, which include a certain set of abilities and skills, a modern specialist must not only navigate his business, but also, in accordance with state educational standards, be able to read foreign professional literature, find the necessary information and properly apply the results of foreign language training in his professional activities. The level of students' mastery of a foreign language directly depends on effective teaching methods and the use of information technologies. The article draws attention to the fact that digital technologies have become an important factor in the process of language learning. Electronic communication devices such as computers, laptops, mobile phones, global communication system, video and audio conferencing, video telephony, webcasting and chats have become an integral part of language learning and their widespread use in education.

Key words: foreign language, information technology, modern method.

Мелёхина Алла Владимировна, старший преподаватель кафедры общинженерных дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.
E-mail: alla150972@gmail.com

Melyokhina Alla Vladimirovna, senior lecture of the Department of General engineering disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Рецензент: Авершин Андрей Александрович, кандидат психологических наук, доцент, директор Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.

Статья подана: 15.10.2023г.

УДК 621.9.048.6

ОТДЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СУЩНОСТИ, НАЗНАЧЕНИИ И ПРИМЕНЕНИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКАХ МЕТОДА ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНОЙ АБРАЗИВНОЙ СРЕДОЙ

Мицык В. Я., Покинтелица Н. И., Чесноков А. В.

SEPARATE PROVISIONS ON THE NATURE, PURPOSE AND APPLICATION AT THE PRODUCTION SITES OF VIBRATION TREATMENT OF PARTS WITH A FREE ABRASIVE MEDIUM

Mitsyk V. Ya., Pokintelitsa N. I., Chesnokov A. V.

Приведена статистика применения отделочно-зачистной обработки. Указаны операции виброобработки и дефекты поверхности обрабатываемых деталей. Приведены анализ и сущность виброобработки с позиций достижения её эффективности и качества. Представлены характер и особенности планировок производственных участков виброобработки. Дана принципиальная планировка трех вибростанков и перспективная компоновка участка виброобработки деталей массового производства. Описан регламент работы участка, обязанности и количество обслуживающего персонала. Указано, что участок обслуживается транспортными и ремонтными рабочими, отделом технического контроля и другими службами цеха.

Ключевые слова: отделочно-зачистная обработка, свободная абразивная среда, виброобработка, обрабатываемые детали, производственный участок, массовое производство, регламент работы участка.

Введение и статистика промышленного применения отделочно-зачистной обработки. С ростом объема производства и требований к качеству изделий машиностроительных предприятий отмечается возрастание объемов отделочно-зачистной обработки, большинство методов которой выполняется с применением малопроизводительного ручного труда и средств малой механизации [1].

Широкое развитие металлообрабатывающих отраслей промышленности, таких как электро- и радиотехническая, электронная, приборостроительная, авиационная, автомобилестроительная и др., а также увеличение производства товаров народного потребления и повышение требований к товарному виду изделий в условиях рыночной экономики привели к резкому росту процента очистных, доделочных, шлифовальных, полировальных, упрочняющих и стабилизирующих операций в производственных

процессах изготовления деталей и изделий упомянутых отраслей промышленности.

Анализ состояния выполнения перечисленных финишных операций, проведенный на ряде предприятий, показал следующее:

- очистные операции при обработке сравнительно небольших и мелких металлических деталей составляют примерно 8%, причём более половины их приходится на ручную доработку;

- отделка поверхностей металлических деталей под различные виды лакокрасочных и гальванических покрытий занимает в общей трудоёмкости их изготовления до 25%, из которых примерно 60% приходится на ручные методы отделки.

Трудоёмкость изготовления этих деталей в среднем составляет около 6% от общего объема работ по производству машин, аппаратов и приборов, при производстве товаров народного потребления до 30...40%

На основании отечественного и зарубежного опыта металлообработки известно, что на современном этапе доля отделочно-зачистных операций достигает 10...20% общей трудоёмкости изготовления изделий. Также известно, что количество деталей машиностроительных производств, подвергаемых отделочно-зачистным операциям, составляет 85...95% от общего количества изготавливаемых деталей. В связи с возрастающими требованиями к качеству выпускаемых изделий есть основание полагать, что процент деталей, подвергаемых отделочно-зачистным операциям, будет ещё более высоким. Сейчас упомянутые операции на 60% и более выполняются с применением маломеханизированного ручного труда, что делает проблему интенсификации отделочно-зачистной обработки весьма современной для технического и технологического перевооружения отечественной промышленности [2].

При анализе промышленного применения отделочно-зачистной обработки выявлена следующая статистика: обработка во вращающихся барабанах – 22%; струйная абразивная обработка – 17%; ленточное шлифование – 10%; обработка полировальными кругами и металлическими щётками – 4%; обработка потоком уплотнённого абразива – 3%.

В механосборочных цехах, на которые приходится свыше 60% общей трудоёмкости отделочно-зачистных операций предприятия, трудоёмкость различных видов операций отделочно-зачистной обработки распределена следующим образом: немеханизированная слесарная обработка – 25%; отделочно-полировальная обработка – 2%; дробемётная и электрохимическая обработка – 0,7%.

Основное содержание отделочно-зачистных операций механосборочных цехов состоит в снятии заусенцев и скруглении острых кромок после формообразующих операций, общая трудоёмкость которых составляет 10...15% от общей трудоёмкости механической обработки.

Решение задачи по эффективной механизации очистных и отделочных операций позволяет высвободить десятки тысяч рабочих от однообразного и утомительного труда, резко повысить производительность обработки и качества изделий.

Из статистики применения существующих способов механизации выполнения отделочно-зачистных операций следует, что наибольшее распространение получила обработка деталей во вращающихся барабанах.

Однако в барабанах возможна очистка и отделка деталей только простой формы. Неэффективна также обработка в барабанах деталей с недостаточной жёсткостью, так как при этом наблюдается искажение их геометрической формы, а на обрабатываемых поверхностях появляются вмятины и забоины. Операции шлифования и полирования в барабанах требуют длительного цикла обработки. Так, например, для шлифования деталей необходимо до 30 часов машинного времени, для полирования – дополнительно до 24 часов. В результате выполнения этих двух операций чистота обработанной поверхности повышается на 2...3 класса.

Недостаточное снижение шероховатости, достигаемое при обработке деталей во вращающихся барабанах, вызывает необходимость их последующей ручной доработки войлочными или фетровыми кругами.

Таким образом, ограниченная область использования вращающихся барабанов, низкая производительность и недостаточное качество обработки не позволяет эффективно решать задачу по механизации отделочно-зачистных операций.

Изыскание способов механизации отделочно-зачистных операций привело к созданию

узкоспециализированного, дорогостоящего оборудования, пригодного для обработки одного - двух наименований деталей. При этом необходима их предварительная обработка. Даже для массового производства такое специализированное оборудование оказывается не всегда эффективным.

В связи с изложенным выше в настоящее время для механизации очистных и отделочных операций в отечественной и зарубежной практике металлообработки начали применять принципиально новый технологический процесс – отделочно-зачистную виброобработку и её разновидности [3].

Цель работы. Изучение сущности и закономерностей виброобработки свободной абразивной средой, позволяющих оценить её возможности при выполнении финишных операций в производственных процессах изготовления деталей и изделий.

Характеристика операций виброобработки и описание дефектов поверхностей обрабатываемых деталей. По своим классификационным признакам виброобработка объединяет группу технологий, преследующих своей целью удаление различного рода дефектов поверхности деталей, полученных операциями обработки лезвийным инструментом, а также различными методами литья, горячей и холодной штамповкой [4].

Среди других операций отделочно-зачистной обработки к новым развивающимся технологиям, широко распространённым в мировой практике, следует отнести обработку свободными средами, возбуждаемыми различными видами энергетического воздействия, из которых в силу укоренившихся традиций вибрационное воздействие считают достаточно разработанной и сформировавшейся областью техники. Это далеко не соответствует реальности, так как в настоящее время происходит обновление парка виброобрабатывающих технологий и оборудования, задействованных в металлообрабатывающих производствах. Такие технические реформы обусловлены в первую очередь научными достижениями в области физики, механики, механохимии, компьютерной техники и технологий [2].

Операции виброобработки, решая поставленные задачи с точки зрения получения требуемого технологического результата, по своему физическому содержанию существенно отличаются от традиционных операций обработки на металлорежущих станках. Такой нетривиальный подход к металлообработке позволяет создать технологические процессы новых разновидностей виброобработки, характеризующиеся высокой эффективностью, оригинальными качественными показателями, а также способствующими проектированию экологически чистых ресурсосберегающих технологий, из которых можно

выделить: виброшпиндельную обработку;
 вибромеханическую обработку;
 виброэлектрохимическую обработку;
 вибромеханохимическую обработку;
 виброэлектрофизическую обработку;
 вибромагнитноабразивную обработку;
 виброцентробежную обработку;
 виброэксцентриковую обработку.

К технологическим операциям виброобработки можно отнести:

- удаление заусенцев, облоя, грата, скругления острых кромок, зачистка поверхности от окалины, коррозии, остатков формовочной смеси с поверхности отливок;
- отделка, то есть шлифование и полирование поверхности с целью снижения шероховатости, придание блеска или оттенка и др.

Практически каждая деталь в своём изготовлении проходит обработку на одной или нескольких упомянутых операциях, из которых наиболее сложной и трудоёмкой является удаление заусенцев, представляющих собой дефект механической обработки [5].

Негативную роль заусенцев можно представить в виде следующих производственных аспектов:

- функциональном, состоящем в усложнении сборки деталей в изделие, их базировании и позиционировании, появлении и ускорении коррозионных процессов, а также снижении усталостной прочности и др.;
- экономическом, состоящем в увеличении затрат на подгоночные работы, в повышении опасности травматизма на производстве и др.;
- эстетическом, состоящем в снижении потребительской стоимости и улучшении внешнего вида изделий.

Следует также учитывать, что заусенцы должны удаляться полностью и на всех элементах обрабатываемой детали. При удалении заусенцев кромки детали следует закруглять согласно радиусу, указанному технической документацией. Кроме того, не должно возникать негативных вторичных дефектов, а именно:

- образование новых заусенцев;
- засорение пазов и отверстий в конструкции детали;
- шаржирование и царапание поверхности;
- удаление с поверхности детали излишнего металла.

Процесс удаления заусенцев с толщиной у основания до 0,2 мм представляет определённые трудности вследствие большого многообразия форм деталей, необходимости удаления материала на небольших участках их поверхности, не затрагивая при этом основной части материала. Удаление заусенцев указанного размера возможно только при использовании грубых режимов обработки и гранул рабочей среды крупной грануляции. Указанные условия приемлемы для обработки сравнительно грубых с достаточно прочными элементами

конструкции деталей. При обработке тонкостенных деталей могут быть поломки рёбер, стенок, сколы по краям и т.д.

Величина сил микроударов гранул, необходимая для разрушения заусенцев, может быть определена из уравнения [5]: $P = \frac{\sigma_n \cdot a \cdot b^2}{6 \cdot l \cdot c}$, кгс, где σ_n – предел прочности обрабатываемого материала при изгибе, кгс/мм²; а, b – толщина заусенца, приходящаяся на периметр одной гранулы, мм; l – расстояние от точки приложения силы до опасного сечения, мм; c – коэффициент, учитывающий одновременность действия гранул рабочей среды.

Характеристика деталей, подлежащих виброобработке. Из всей проблемной с точки зрения виброобработки номенклатуры деталей можно выделить значительную группу корпусных деталей приводных и распределительных механизмов, деталей типа тела вращения, таких как диски, втулки, катушки, шкивы, зубчатые колёса и др. Такие детали в своём большинстве имеют симметричную форму и центральные сквозные отверстия, которыми можно воспользоваться для базирования и закрепления в приспособлениях рабочих органов при обработке на вибростанках. Такие детали сейчас успешно подвергаются операциям виброшлифования и виброполирования с применением мультиэнергетических вибрационных технологий [2].

Также к проблемной для виброобработки номенклатуре следует отнести детали энергомашиностроения, такие как лопасти турбинных колёс, а также множество мелкогабаритных плоскостных деталей авиационной, приборостроительной, автомобильной, медицинской и других отраслей промышленности, при обработке которых происходит образование сводов деталей и слипание их в пакеты, что вызывает появление исправимого и неисправимого брака [6].

Что касается корпусных деталей, то их форма классифицируется как сложная, объёмная, образованная сочетаниями цилиндрических, конических и других криволинейных поверхностей. Конструкции таких деталей имеют ниши, карманы, уступы, локальные переходы элементов поверхности с малыми радиусами сопряжения, а также глухие и сквозные отверстия различного диаметра.

Формообразование упомянутых конструктивных особенностей связано с операциями обработки лезвийным инструментом на металлорежущих станках, а именно точением, фрезерованием, сверлением, что влечёт за собой появление дефектов поверхности в виде заусенцев, острых кромок, повышенной шероховатости, удаление которых необходимо согласно требованиям последующей сборки и эксплуатации.

Детали большой длины типа труб, прутков, профилей также составляют особую группу в технологиях виброобработки. Специфика формы обрабатываемых деталей накладывает определённые ограничения на формы и размеры оборудования и оснащения. Виброобработка деталей большой длины также представляет определённые трудности. Создание и применение для этих целей вибростанков с резервуарами большой длины не всегда может быть приемлемым и целесообразным, в связи с этим логично рассмотреть возможность виброобработки деталей большой длины с использованием вибростанков обычного типа.

Сложность и многообразие форм соответствующих элементов поверхностей деталей затрудняет создание универсальных кинематических схем необходимого оборудования и инструментов. В этом случае гибкий инструмент в виде свободно абразивной среды с точки зрения формообразования является наиболее приемлемым, а участие в обработке одновременно большого количества режущих и деформирующих гранул абразивной среды создаёт условие для высокой производительности виброобработки.

Анализ промышленного применения отделочно-зачистной обработки и сущность метода виброобработки. Для осуществления операций отделочно-зачистной обработки в отечественной и мировой практике разработано большое количество методов, использующих свободные абразивные среды и процессы микрорезания и поверхностного пластического деформирования. В табл. 1 дана классификация методов отделочно-зачистной обработки по сущности процесса и виду применяемого инструмента.

Исследования промышленного применения существующих методов обработки показывает, что наиболее перспективным из них является метод виброобработки с использованием свободной абразивной среды.

На рис. 1 показано устройство для виброобработки деталей. Сущность метода состоит в том, что в покоящийся на упругих связях колеблющийся резервуар вибростанка загружают гранулы свободной абразивной среды и обрабатываемые детали, выполненные из материалов с различными физико-технологическими свойствами. Далее резервуару сообщаются колебательные движения согласно определённому закону, и в результате относительного перемещения и взаимного давления гранул среды и деталей происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, что приводит к удалению дефектного слоя металла с поверхностей деталей и улучшению её чистоты [5].

Характер механических и физико-химических явлений при виброобработке определяется:

- физическими свойствами абразивных гранул среды;
- характеристикой материала обрабатываемых деталей;
- динамическими параметрами процесса, отражающими режим обработки;
- составом, свойствами и количеством химически-активного раствора в резервуаре вибростанка;
- условиями ведения обработки, то есть соотношением объёмов рабочей среды и обрабатываемых деталей;
- степенью загрузки резервуара вибростанка и др.

Таблица 1

Классификация методов отделочно-зачистной обработки



Наряду с некоторой аналогией метода виброобработки с другими методами отделочно-зачистной обработки её отличают следующие особенности:

- зёрна абразивных гранул нагружаются равномернее и глубина внедрения каждого из них более стабильна;
- имеет место чередование условий работы зерна материала гранул вследствие прерывистого характера и их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью;
- наличие вибраций уменьшает силы трения на контактных поверхностях зёрен гранул;
- благодаря незначительным размерам абразивные гранулы надёжно пропитываются

химически-активным раствором и обеспечивают его подвод в зону обработки;

- обеспечивается снижение сил микрорезания и контактной температуры.

Таким образом, виброобработка представляет собой процесс, включающий комплекс взаимосвязанных явлений, в которых участвуют микрорезание, упругопластическая деформация, активизация поверхностного слоя металла, образование и разрушение вторичных структур, повторяющихся с частотой действия возмущающей силы.

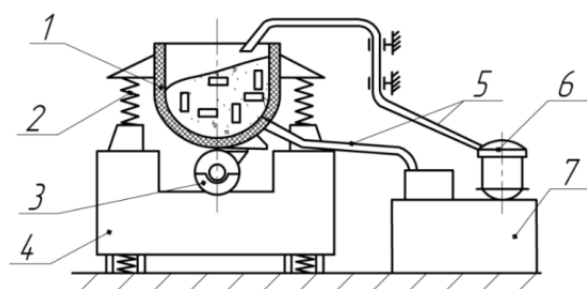


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для виброобработки деталей:

1 – резервуар; 2 – упругие связи; 3 – вибратор; 4 – корпус; 5 – трубопроводы; 6 – насос; 7 – бак отстойник

Исследование состояния выполнения отделочно-зачистных операций показало следующее [4]:

- объём очистных операций при виброобработке сравнительно небольших и мелких металлических деталей составляет в общей трудоёмкости их изготовления в среднем 8%, причём более половины его приходится на ручную доработку;

- отделка поверхностей при виброобработке деталей под различные виды лакокрасочных и гальванических покрытий занимает в общей трудоёмкости их изготовления до 25%, из которых примерно 60% приходится на ручные методы отделки. Трудоёмкость изготовления таких деталей в среднем составляет 6% от общего объёма работ по производству машин, аппаратов и приборов, при производстве товаров народного потребления – до 30...40%;

- в последние годы в мировой практике технологий изготовления деталей всё большее внимание уделяется созданию методов, основанных на использовании свободной абразивной среды, шлифпорошков и других полирующих сред. Их развитие связано с поиском путей автоматизации и интенсификации отделочно-зачистной обработки.

Таким образом, свободная абразивная среда с точки зрения формообразования деталей является наиболее приемлемой для проведения отделочно-

зачистной обработки, а участие в обработке одновременно большого количества режущих и деформирующих гранул абразивной среды создаёт условия для обеспечения высокой производительности процесса. Этими свойствами и возможностями характеризуется метод виброобработки деталей.

Характер и особенности планировок производственных участков виброобработки. Зависит от масштабов производства, конструкции и количества выпускаемых деталей, а также количества требующихся для выполнения программы вибростанков [1].

При небольшой программе выпусков деталей в большинстве случаев необходим только один или два вибростанка, расположенных в цехе, в зависимости от конкретных условий работы. Если вибростанок предназначен для обработки одного наименования деталей, то его целесообразно включать в соответствующий участок или поточную линию. В тех случаях, когда на одном вибростанке предполагается проводить обработку деталей нескольких наименований, изготавливаемых на различных участках, его следует располагать таким образом, чтобы объём транспортных работ был наименьшим [4].

Обслуживание отдельно стоящего вибростанка в части подготовки абразивов, загрузки и разгрузки резервуара, частично по подвозке необработанных и отправке на последующие операции обработанных деталей поручается рабочему, непосредственно выполняющему вибрационные операции. В случае небольшого объема работы ему может быть поручено выполнение и других операций на рядом стоящем оборудовании.

При значительных количествах обрабатываемых деталей, когда требуется использование двух, трех и большего количества вибростанков, как показал опыт, рекомендуется создание специализированных участков вибрационной обработки. Это не исключает случаев установки отдельных вибростанков в поточных линиях, если масштабы производства обеспечивают необходимые условия для их рационального использования.

На рис. 2 и 3 приведены планировки участков виброобработки в механических цехах, имеющих от трех до двадцати вибростанков с объемом резервуаров по 100 дм³. В первом случае предусмотрено глянцевание окончательно обработанных деталей, во втором – эта операция вынесена за пределы участка.

На участке с тремя вибростанками детали поступают по стрелке А на склад заготовок СЗ. Абразивы в подготовленном для работы виде хранятся в контейнерах 1.

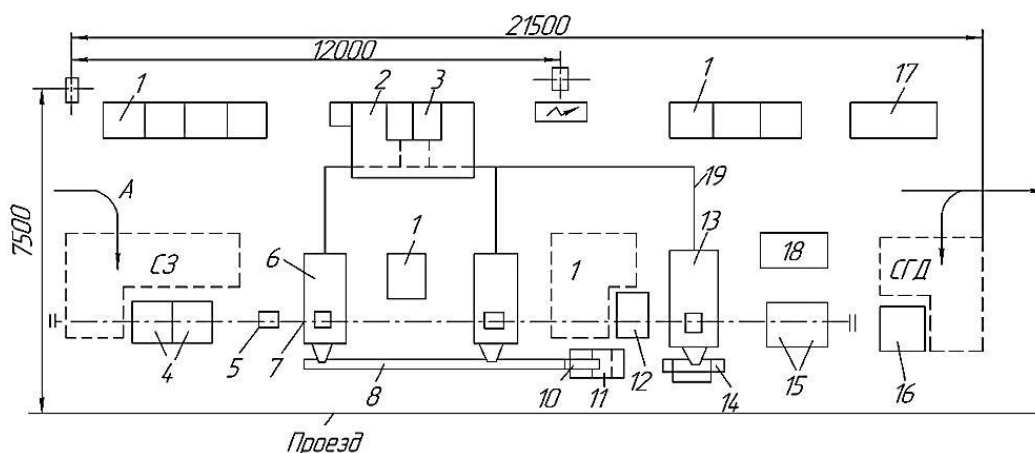


Рис. 2. Планировка участка трех вибростанков:

1 – резервуары; 2 – площадка для приготовления химически-активных растворов; 3,9 – емкости; 4, 12, 15 – ванны; 5 – тельфер; 6,13 – вибростанки; 7 – монорельс; 8 – транспортер; 10 – сепаратор; 11 – тележка; 14 – вибросито; 16 – сушильный шкаф; 17 – шкаф; 18 – отстойник; 19 – трубопроводы

Приготовление химически-активных растворов производится на установке, которая представляет собой площадку 2 с установленными на ней емкостями 3 для приготовления необходимых растворов и их хранения до передачи по мере необходимости в резервуары вибростанков 6 и 13 по трубопроводам 19. Под площадкой 2 на уровне пола размещен склад для хранения в закрытых шкафах или контейнерах двух-, трехдневного запаса химикатов.

Поступившие на склад СЗ детали предварительно проходят обезжиривание в ваннах 4, после чего подаются к резервуарам вибростанков с помощью тельфера 5, передвигающегося по монорельсу 7. Обработанные детали из резервуаров вибростанков выдаются на транспортер 8, который направляет их на сепаратор 10 для отделения от абразива.

Отсепарированные детали подаются в сетчатые корзины, установленные на тележке 11, которые подают их на нейтрализацию к ваннам 12. После нейтрализации детали, в зависимости от обстановки на участке, направляются на промежуточный склад ПС или непосредственно на вибростанок 13 для глянцеваания в среде стальных закаленных шариков.

Окончательно обработанные детали из резервуара вибростанка 13 выгружаются вместе с шариками в вибросито 14, где происходит их разделение.

Далее детали подаются к ваннам 15 для пассивирования, в сушильный шкаф 16 и на склад СГД готовых деталей. Реактивы для вибростанка 13 и ванн 15 хранятся в шкафу 17. На участке также имеется емкость 9 для слива из вибростанков отработанных растворов с дальнейшим спуском их в канализацию и отстойник 18 для раствора.

Примерный штат отделения без работников ОТК и ПРБ цеха, которые обслуживают его лишь периодически, состоит из четырех человек в смену, из них обслуживают: вибростанки – 1 рабочий; склады СЗ, ПС, СГД – 1 рабочий; приготовление растворов, прием и отpravку деталей – 1 рабочий; транспортные работы – 1 рабочий.

Один из работающих, наиболее квалифицированный, назначается бригадиром с подчинением сменному мастеру участка цеха без освобождения от работы на оборудовании. На рис. 3 показана компоновка участка виброобработки небольших деталей, выпускаемых в массовом количестве.

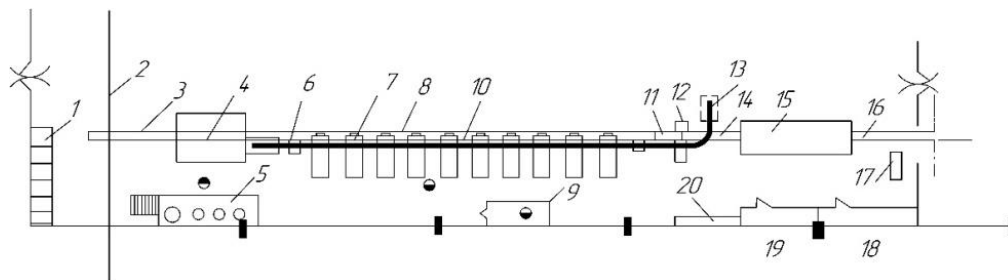


Рис. 3. Компоновка участка виброобработки деталей, выпускаемых в массовом количестве:

1 – емкость; 2 – подвесной транспортер; 3, 14, 16 – резервуары; 4 – моечная камера; 5 – смесительная установка; 6 – тельфер; 7 – вибростанки; 8 – ленточный транспортер; 9 – пульт управления тельфером; 10 – монорельс; 11 – сепаратор; 12 – канава; 13 – площадка; 15 – моечно-сушильный агрегат; 17 – стол контролёра; 18 – кладовая; 19 – помещение для бригадира; 20 – верстак

Годовая производственная программа, ориентировочно составляющая 60 миллионов деталей соответствующих цехов, включает в себя изготовление пяти наименований деталей автомобильной фурнитуры весом от 50 до 300 граммов каждая. Для её выполнения необходима организация участка цеха с двумя полуавтоматическими поточными линиями. Одна из них в упрощенном виде, но с достаточной детализацией для ясного представления идеи, заложенной в компоновку, изображена на рис. 3. Выбор полуавтоматических линий вместо автоматических сделан на основании экономических расчетов. Работа предусматривается двухсменной [4].

Регламент работы участка виброобработки. Детали автомобильной фурнитуры поступают на участок по подвесному транспортеру 2 в решетчатых корзинах, имеющих автоматически открывающееся дно. Корзины устанавливаются транспортером 2 на конвейер 3, который подает их в моечную камеру 4 для обезжиривания. После этого корзины автоматически подхватываются тельфером 6, передвигающимся по монорельсу 10.

Управление тельфером 6 производится с пульта 9. По команде тельфер 6 загружает один из десяти вибростанков 7. Опорожненные корзины подаются по команде из того же пульта 9 на площадку 13, откуда автопогрузчиком отвозятся на штамповочный участок.

Подача химически активного раствора в резервуары машин 7 производится по специальному трубопроводу от установки 5. Установка, как и предыдущем случае, представляет собой площадку, на которой размещены баки и оборудование для приготовления и хранения трех-, четырехразового запаса химически-активных растворов. Под площадкой находится склад химикатов, которые содержатся в герметически закрытых емкостях [7].

После окончания вибрационной операции рабочий, находящийся при вибростанках, выдает содержимое резервуаров на ленточный транспортер 8. Детали и абразивные гранулы подаются этим транспортером к сепаратору 11. Абразивные гранулы сбрасываются в емкости, находящиеся в канаве 12, которые после наполнения извлекаются тельфером для передачи их содержимого в резервуар одного из вибростанков.

Конструкцией канавы для бесперебойного принятия абразивных гранул, непрерывно движущихся на транспортере 8, предусмотрена замена удаленной емкости другой. Отсепарированные детали передаются на конвейер 14 моечно-сушильного агрегата 15, который производит их вторичную мойку, пассивирование и сушку. Затем детали по конвейеру 16 направляются на соседний участок для проведения последующих операций, которыми могут быть глянецвание, сборка, упаковка и др. в зависимости от выполняемого технологического процесса.

У конвейера 16 предусмотрен стол 17 контролера ОТК, который с использованием необходимых приборов проверяет качество обработки.

Запасные части для всех устройств участка виброобработки хранятся в кладовой 18. Рядом находится помещение 19 для бригадира участка, учетчика, а также для хранения приборов и документов. Верстак 20 предназначен для текущего ремонта отдельных деталей оборудования. Емкости 1 в виде ящиков с открывающимися торцевыми стенками служат для хранения абразивов.

К участку прикреплен автопогрузчик, который может работать в нем постоянно и периодически. Он производит ряд неавтоматизированных работ, таких как: загрузка емкостей 1; передача абразивов из емкости 1 в резервуары вибростанков; возвращение емкостей в канаву 12; передачу корзин с места их складирования на штамповочный участок.

Штат производственных рабочих каждой смены участка из двух полуавтоматических линий, описанной конструкции, может состоять из шести рабочих: бригадир, одновременно слесарь и кладовщик – 1 рабочий, оператор по приготовлению химически-активных растворов – 1 рабочий; операторы вибростанков – 2 рабочих; операторы пульта управления – 2 рабочих.

Приведенный участок обслуживается транспортными и ремонтными рабочими, отделом технического контроля и другими службами цеха.

Для упрощения компоновки участка виброобработки в нем не показаны некоторые второстепенные устройства. К ним, например, относятся дозаторы для химически-активных растворов, имеющиеся при каждом вибростанке и др.

Выводы. 1. Современные высокопроизводительные процессы формообразования позволяют приблизить форму и размеры заготовки к форме и размерам детали. Поэтому в настоящее время существенно снижается объём лезвийной обработки и возрастает роль отделочных процессов. В связи с этим разработка новых технологий виброобработки является одной из актуальных задач машиностроения. Эта задача имеет непосредственное отношение к технологии отделочно-зачистной обработки, в которой доля ручного труда наиболее высока.

2. Анализ технологических возможностей и опыт внедрения виброобработки подтверждает эффективность её использования для совершенствования финишных операций производства деталей машин и приборов.

3. Изучение состояния отделочно-зачистной обработки на машиностроительных предприятиях показало её отставание по уровню автоматизации и механизации от формообразующей обработки, что подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования отделочно-зачистных операций на этапах современного развития металлообрабатывающих производств.

4. Наиболее эффективные результаты достигаются на тех предприятиях, где вибростанки сконцентрированы на специальных участках. Такая концентрация позволяет полнее загрузить

вибростанки, организовать их обслуживание и ремонт, лучше использовать рабочие среды, применять универсальные разделительные устройства, использовать постоянный обслуживающий персонал, обладающий требуемой квалификацией.

Литература

1. Бабичев А. П., Бабичев И. А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1998. – 624 с.
2. Мицык А. В., Федорович В. А. Пути интенсификации отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №6 (83).
3. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А. Отделочно-зачистная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
4. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И. Н. Карташов, М. Е. Шаинский, В. А. Власов, Б. П. Румянцев, П. С. Банатов, Е. С. Кислица – К.: Высшая школа, 1975. – 188 с.
5. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспы, Г.А. Прокопец, С.Н. Худолей, Д.Н. Кравченко; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
6. Рубаненко В.Ю. Развитие технологий отделочно-зачистной и упрочняющей обработки мелкогабаритных плоскостных деталей свободными средами в вибрирующих резервуарах / В.Ю. Рубаненко, В.Я. Мицык, А.Н. Кирсанов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля – Луганск, 2020. – №1 (31). – С. 113-117.
7. Берещенко А.А. Виброхимическая обработка углеродистых и легированных сталей: Дис. ...канд. техн. наук: 05.17.03. – К., 1980. – 132 с.

Mitsyk V. Ya., Pokintelitsa N. I., Chesnokov A. V.
SEPARATE PROVISIONS ON THE NATURE, PURPOSE AND APPLICATION AT THE PRODUCTION SITES OF VIBRATION TREATMENT OF PARTS WITH A FREE ABRASIVE MEDIUM

The statistics of the application of finishing and grinding processing are given. The vibration treatment operations and surface defects of the processed parts are indicated. The analysis and nature of vibration treatment from the standpoint of achieving its efficiency and quality are given. The characteristic and features of the layouts of the vibration treatment production sites are presented. The basic layout of three vibration machines and the perspective layout of the

vibration treatment site of mass-produced parts are given. The regulations of operation of the site, duties and number of maintenance personnel are described. It is indicated that the site is serviced by transport and repair workers, the technical control department and other services of the shop.

Key words: finishing and grinding processing, free abrasive medium, vibration treatment, processed parts, production site, mass production, site operation regulations.

Мицык Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга ФГБОУ ВО «Луганский государственный университета имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: tm.univer@yandex.ru

Покинтелица Николай Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры пищевых технологий и оборудования ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.
E-mail: ni3178rambler.ru

Чесноков Алексей Викторович, доктор технических наук, профессор инженерного центра «Высокотемпературные композиционные материалы» ФГБОУ ВО «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, лётчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королёв, Московская область.

Mitsyk Vladimir Yakovlevich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of Mechanical Engineering Technology and Engineering Consulting, «LSU named after V. Dahl».

Pokintelitsa Nikolay Ivanovich, doctor of Technical Sciences, professor of the department of Food Technologies and Equipment of the Sevastopol State University, Sevastopol.

Chesnokov Alexey Viktorovich, doctor of Technical Sciences, professor of the Engineering Center "High-temperature Composite Materials" of the Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Moscow region.

Рецензент: Гутько Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного литья ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 05.12.2023

УДК 621.314.222.017:621.316.1(470+571) + 504.7

**К ВОПРОСУ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И
ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВОГО ГАЗА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОТ РЕЖИМОВ
ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕМЕНТАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10(6) КВ ГУП ЛНР
«РЕСПУБЛИКАНСКАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ» РОССИИ ПРИ
ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ**

Парсентьев О. С.

**ON THE ISSUE OF MINIMIZING OF ACTIVE ELECTRICITY AND GREENHOUSE
EMISSIONS INTO THE ENVIRONMENT FROM HIGHER HARMONIC MODES IN
ELEMENTS OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS WITH A VOLTAGE OF
10(6) KV OF THE SUE LPR «REPUBLICAN GRID COMPANY» OF RUSSIA DURING
THE TRANSPORTATION OF ELECTRICITY TO CONSUMERS**

Parsentev O. S.

В работе проанализирована динамика глобального спроса на электроэнергию в 2023 – 2025 годах, а также отечественное и зарубежное крупносерийное производство понижающих двухобмоточных силовых трансформаторов сухого исполнения с литой изоляцией.

Установлено, что вынужденный рост потребления электроэнергии на Ближнем Востоке приведет к увеличению выбросов парниковых газов выше нормируемого значения, регламентированного Межправительственной группой экспертов по изменению климата ООН.

На примере потенциальной экономии при эксплуатации энергоэффективного трансформатора доказано, что за 20 лет эксплуатации силовой трансформатор (СТ) серии Green T.HE обеспечит сокращение выбросов парникового газа более чем на 112 тонн. Проанализировано влияние режимов высших гармоник на потери активной электроэнергии в существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4кВ (СТ – 10(6)/0,4кВ), эксплуатируемых в распределительных электрических сетях напряжением 10(6) кВ (РЭС – 10(6) кВ) ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания». По результатам анализа установлено, что потери активной электроэнергии в существующих СТ – 10(6)/0,4 кВ в ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания» от влияния режима высших гармоник при предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения многократно превышают нормируемое значение потерь электроэнергии, утвержденное Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2022 года за №1272.

Для минимизации потерь активной электроэнергии и выбросов парниковых газов в окружающую среду от влияния режимов высших гармоник в работе предусмотрены варианты технического перевооружения существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «Республиканская сетевая компания» на классы

напряжения: 10; 15; 20 и 35 кВ с установкой энергоэффективных двухобмоточных СТ сухого исполнения отечественного и зарубежного производства.

По результатам рассмотрения для РЭС ГУП ЛНР «РСК» рекомендованы классы напряжений и серии энергоэффективных СТ сухого исполнения отечественного и зарубежного производства, обеспечивающие низкий уровень потерь электроэнергии и выброс парниковых газов.

Предложены мероприятия, направленные на минимизацию и подавление дополнительных потерь активной электроэнергии от влияния спектра гармоник.

Ключевые слова: *двухобмоточный силовой трансформатор, парниковый газ, сухое исполнение, литая изоляция, класс напряжения, распределительные электрические сети, техническое перевооружение, несинусоидальность напряжения, спектр высших гармоник, потери активной электроэнергии, сочетание напряжений, потери холостого хода, напряжение короткого замыкания, потери короткого замыкания, централизованный парк, единые национальные (общероссийские) электрические сети, бросок намагничивающего тока.*

Введение. По оценке Международного энергетического агентства, (МЭА) глобальный спрос на электроэнергию в 2023 – 2025 годах будет расти на 3% в год. Эта цифра также приводится в докладе Electricity Market Report. По мнению исследователей МЭА, незначительный рост на 2% в 2022 году был вызван энергетическим кризисом и сильно варьировался в зависимости от региона. В частности, потребление значительно выросло в Индии, устойчиво росло в США. В Китае рост был сдержанным. В Европейском Союзе (ЕС), наоборот, зафиксировано падение спроса на электроэнергию

на 3,5% – эксперты МЭА связывают это с теплой зимой и снижением потребления промышленности.

Аналитики МЭА считают, что более 70% роста спроса на электроэнергию в ближайшие три года обеспечат Китай, Индия и Юго-Восточная Азия. Например, Китаю пророчат новый рекорд – до трети спроса в мировом потреблении электроэнергии в 2025 году. Производство электроэнергии на природном газе в Европе, по прогнозам агентства, в ближайшие годы будет снижаться, однако его рост на Ближнем Востоке частично компенсирует это снижение и также будет приводить к увеличению выбросов парниковых газов [1].

Учитывая вышесказанное, межправительственная группа экспертов ООН по изменению климата (МГЭИК) в конце марта 2023 года выпустила отчет, в котором обратилась ко всем жителям планеты с призывом ограничить глобальное потепление на уровне 1,5°C.

В МГЭИК отмечают, что в отчете впервые ставится цель сократить к 2035 году глобальные выбросы парниковых газов на 60% по сравнению с уровнем 2019 года, чтобы достичь цели по ограничению потепления на уровне 1,5°C. В предыдущем отчете МГЭИК был установлен показатель сокращения выбросов парниковых газов к 2030 году на 43% по сравнению с уровнем 2019 года. По данным МЭА, глобальные выбросы углерода, связанные с энергетикой, в 2022 году выросли почти на 1%.

Высшие гармоники напряжения и тока в единых национальных (общероссийских) электрических сетях ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» (ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети») общего назначения являются частью проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС).

Порядок их обеспечения, в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» [2], должен определяться общим техническим регламентом по ЭМС. Допустимые величины напряжений высших гармоник в сетях общего назначения для разных номинальных напряжений определяются по ГОСТ 13109, а величины токов – стандартами эмиссии помех от искажающих нагрузок.

В соответствии с законом «Об электроэнергетике» [3] работа ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» с нарушением регламента не допускается. Выполнение требований национального стандарта к качеству электрической энергии является обязательным для всех электросетей общего назначения.

Как известно, распределительные электрические сети напряжением 10(6) кВ (РЭС – 10(6) кВ) ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» используются для электроснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

К этим электросетям подключено большое количество мелких потребителей энергии, в том числе и с искажающими нагрузками – телевизоры, компьютеры, освещение, городской транспорт, станки с числовым программным управлением и другие объекты. Для РЭС данного класса напряжений характерны высокие уровни высших гармоник, значительное количество нагрузок и наличие серийно выпускаемых устройств по обеспечению качества электрической энергии, связанного с высшими гармониками напряжения.

Во многих узлах этих электросетей в настоящее время превышены допустимые значения показателей, установленных в ГОСТ 13109 – 97.

Таким образом, возникает необходимость точной оценки и минимизации потерь активной электроэнергии в СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ, эксплуатируемых в протяженных РЭС – 10 (6) кВ ГУП ЛНР «РСК» от влияния режимов высших гармоник.

В настоящей работе проводится решение актуальной народно-хозяйственной проблемы по минимизации суммарных годовых потерь активной электроэнергии в элементах РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» от влияния режимов высших гармоник, путем реализации вариантов технического переоснащения этой электросети на классы напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ с установкой энергоэффективных двухобмоточных СТ с литой изоляцией, с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ отечественного и зарубежного производства.

Снижение энергопотребления трансформатора означает уменьшение выбросов парниковых газов в окружающую среду. В примере потенциальной экономии при эксплуатации энергоэффективного трансформатора установлено, что за 20 лет эксплуатации трансформатор серии Green T.HE (high efficiency) обеспечит сокращение выбросов парникового газа более чем на 112 тонн [4]. Это важное экологическое преимущество превращается в экономическую выгоду в странах с торговлей квотами на выбросы углекислого газа. В этих странах компании, превысившие выделенные им квоты на выбросы парниковых газов, должны оплачивать подобное превышение. В то же время компании, которые ответственно относятся к окружающей среде и не расходуют свои квоты полностью, не будут нести эти дополнительные расходы, а, наоборот, смогут продать последние, получая выгоду [4].

В напряжениях фаз ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» практически всегда имеются слагающие высших гармоник, обусловленные намагничивающими токами СТ, нелинейными характеристиками вентильных преобразователей и других элементов, а при наличии генераторов, работающих на сеть, и гармониками в их э.д.с [5].

Кроме этого, при возникновении однофазного короткого замыкания на землю несимметрия, определяющая напряжение между нейтралью системы и землей, вызывает токи высших гармоник, проходящие по емкостям элементов системы и в месте пробоя. Токи высших гармоник в поврежденной фазе поврежденного участка много больше токов в неповрежденных фазах, что принципиально может быть использовано для выполнения защит [6].

Поэтому для получения технического эффекта от эксплуатации энергоэффективных СТ с литой изоляцией в РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» необходима точная оценка уровня активных потерь электроэнергии от влияния спектра высших гармоник в этих трансформаторах.

Наличие больших бросков намагничивающего тока (БНТ) определяется тем, что при включении под напряжение в неблагоприятный момент по напряжению и наличию остаточного потока Фост, совпадающего по знаку с переходным потоком, амплитуда результирующего потока (в переходном режиме) в пределе приближается к $2\Phi_m + \Phi_{ост}$ [7, 8]. Сталь магнитной системы СТ насыщается и обуславливает большое кратковременное возрастание тока намагничивания. Типичные кривые БНТ для трех фаз характеризуются следующим:

- максимальные значения бросков достигают $I_m = (6 \div 8) I_{н. ном.}$;
- броски ограничиваются сопротивлением питающей системы и параметрами защищаемого трансформатора и обычно остаются меньшими максимальных переходных токов внешних коротких замыканий;
- бросок может содержать большую апериодическую слагающую, а также значительный процент высших гармоник (прежде всего второй);
- затухание БНТ происходит медленнее, чем тока короткого замыкания;
- для трехфазных элементов броски в одной из фаз, достигая значений близких, а иногда и больших номинального тока, могут не содержать апериодической слагающей.

Проведенный гармонический анализ намагничивающего тока I_m в трехфазных трансформаторах выявил практически известную и ранее возможность появления в одной из фаз периодического тока I_m , не содержащего периодической слагающей, но имеющего значительную вторую гармонику. Максимальное значение I_m значительно меньше, чем у однополярных бросков, и обычно не превышает $(1 \div 2) I_{ном.т.}$, в пределах каждого периода имеются также некоторые «бестоковые паузы» [7].

Также следует учитывать, что в СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ, эксплуатируемых в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК», и номинальной мощностью до 630 кВА и более обмотки в большинстве случаев соединены по схеме звезда – звезда, поэтому фазные э.д.с. и напряжения несинусоидальны и содержат третьи гармоники э.д.с., величина которых может быть значительной, а в трехстержневых трансформаторах появляются добавочные потери от вихревых токов [8,9].

Для определения суммарных дополнительных годовых потерь активной электроэнергии от несинусоидальности фазных э.д.с, напряжений, БНТ, выделяемых в группах масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ РЭС Луганской Народной Республики, вызванных спектральным составом гармоник, а также суммарных дополнительных годовых потерь электроэнергии от влияния последних в группах номинальной мощности СТ сухого исполнения с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ при внедрении классов напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ в РЭС ЛНР используется метод расчета, суть которого и допущения изложены в [9 –12, 16].

В качестве исходных данных расчета используются паспортные данные на двухобмоточные СТ с сочетанием напряжений (6; 10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ общепромышленного назначения [10 – 18].

При расчете делаем допущение о том, что:

- на существующие двухобмоточные масляные СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ, эксплуатируемые в ГУП ЛНР «РСК», приходится нагрузка, $K_3 = 0,7$ и $1,0$;
- на двухобмоточные СТ с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ сухого исполнения приходится нагрузка, т.е., $K_3 = 0,7$;
- за расчетную температуру, к которой приводятся потери и напряжение короткого замыкания, принимаем 75°C для всех масляных и сухих СТ;
- нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при техническом перевооружении РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 и 20 кВ составляет $K_u = 1,16$; предельно допустимое значение $K_u = 1,19$.

Итак, годовые дополнительные потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности СТ от искажения кривых фазных э.д.с., напряжений и БНТ, вызванных наличием высших гармоник в их составе, определяются по формуле (ТВТч) [11; 12].

$$\sum W_{\text{годо.дон.мп}}^{(n-\text{гap})} = \frac{m \cdot T \cdot \left(P_{XX} \cdot (K_u)^{2(\alpha-1)} \cdot \sum K_U^2 + \frac{0,6 \cdot P_{K3} \cdot K_3^2}{U_{K3}^2} \cdot \sum \left(K_U^2 \cdot \frac{1}{n \cdot \sqrt{n}} \right) \right)}{10^{12}}, \quad (1)$$

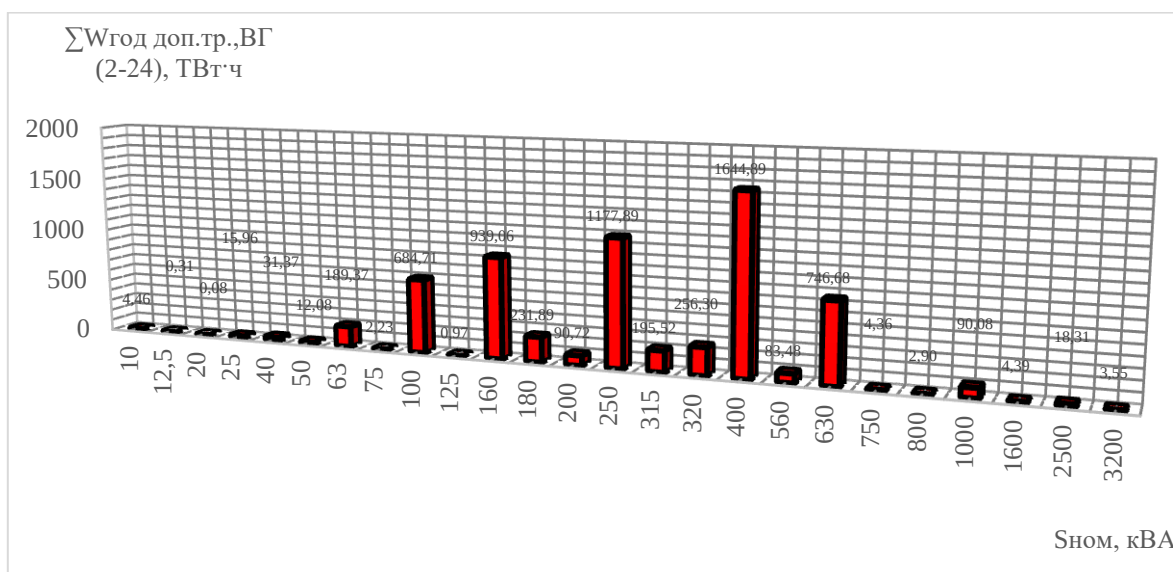
где $P_{ХХ}$ – мощность потерь холостого хода, Вт;
 $P_{КЗ}$ – мощность потерь короткого замыкания, Вт;
 $U_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания СТ, %;
 T – время работы СТ в РЭС ГУП ЛНР «РСК», ч,
 $T=8760$ ч;
 K_U – коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, принимается в (%) по [6];
 K_3 – коэффициент загрузки СТ;
 $\alpha=1,56$ по [10];
 K_u – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения [6];
 m – количество одинаковых по мощности СТ, шт;
 n – порядок гармонической составляющей, $n=1, 2, 3, \dots$

При расчете дополнительных потерь электроэнергии, вызванных наличием высших гармоник, значение коэффициента K_U будет определяться по [6] для следующего спектрального состава высших гармоник:

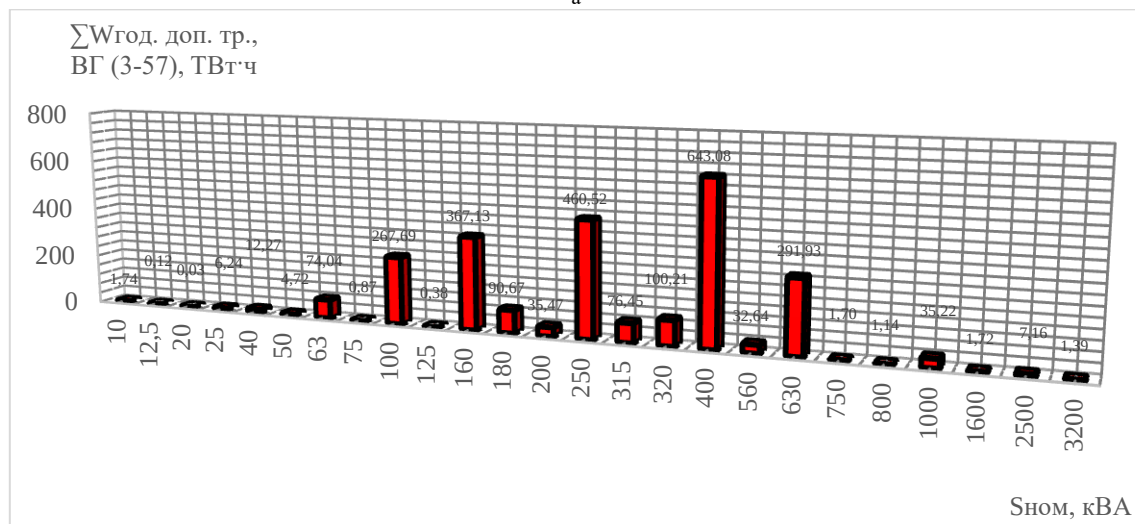
- четных ($n=2 \dots 24$);
- кратных трем ($n=3 \dots 57$);
- обратной последовательности ($n=5 \dots 31$).

Существующий централизованный парк СТ РЭС – 10(6) кВ ЛНР России состоит из масляных двухобмоточных трансформаторов с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ. Число и номинальная мощность СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ, эксплуатируемых в РЭС, представлен в работах [10, 11, 12 и 16].

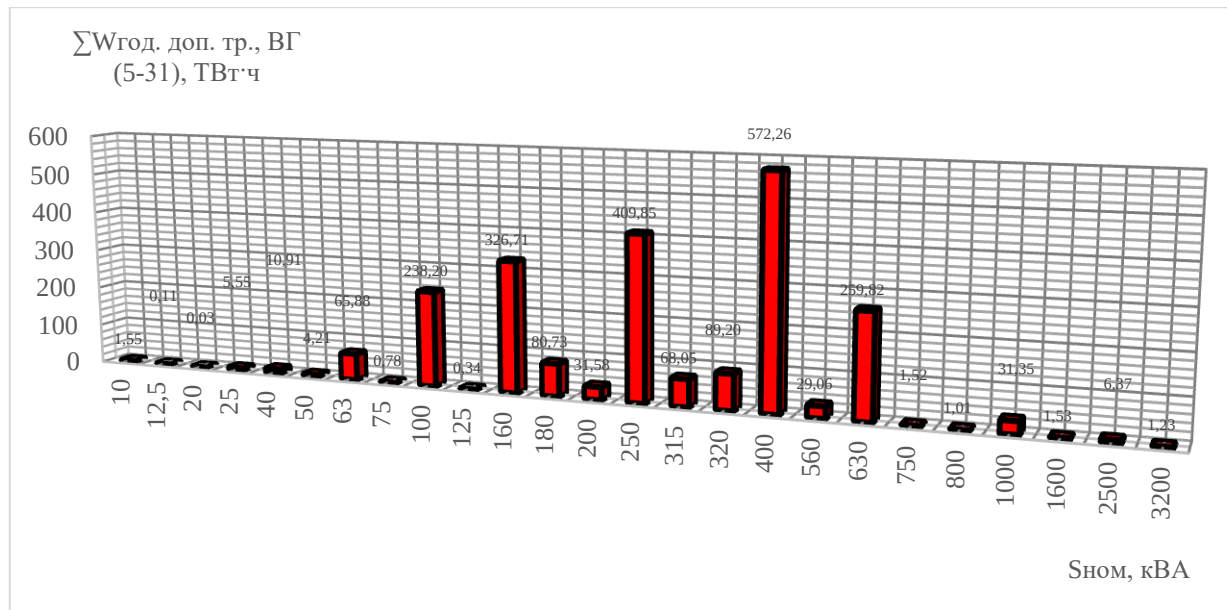
На рис. 1 – 4 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованные высшими гармониками в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3 = 0,70$ и $1,0$, построенные при нормально допустимом и предельно допустимом значении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.



а



б



в

Рис. 1. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованные высшими гармониками в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3 = 0,70$, построенные при нормально допустимом значении коэффициента искажения

синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник,

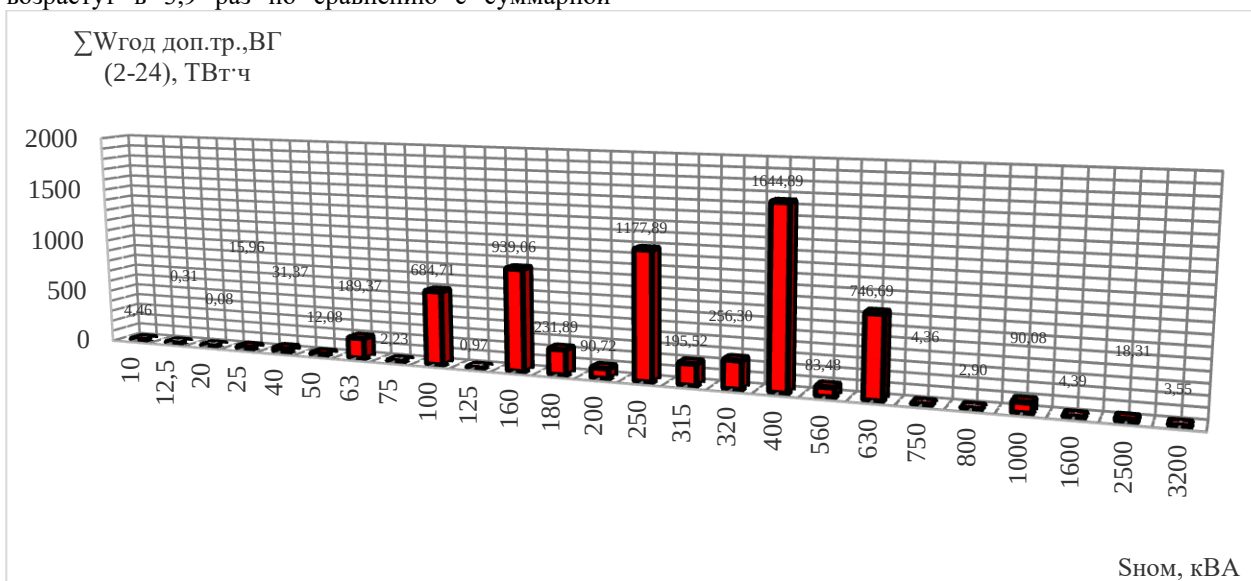
кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис. 1 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,70$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 11,30 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 4,4 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 3,9 раз по сравнению с суммарной

величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» (570471533,80 тыс. кВт·час), утвержденной в Приказе Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2022 года за № 1272 для филиалов ЕНЭС России (далее – Приказе), и многократно превысят регламентируемые нормативные потери электроэнергии при транспортировке ее потребителям (далее – регламентируемый норматив потерь электроэнергии) [19].



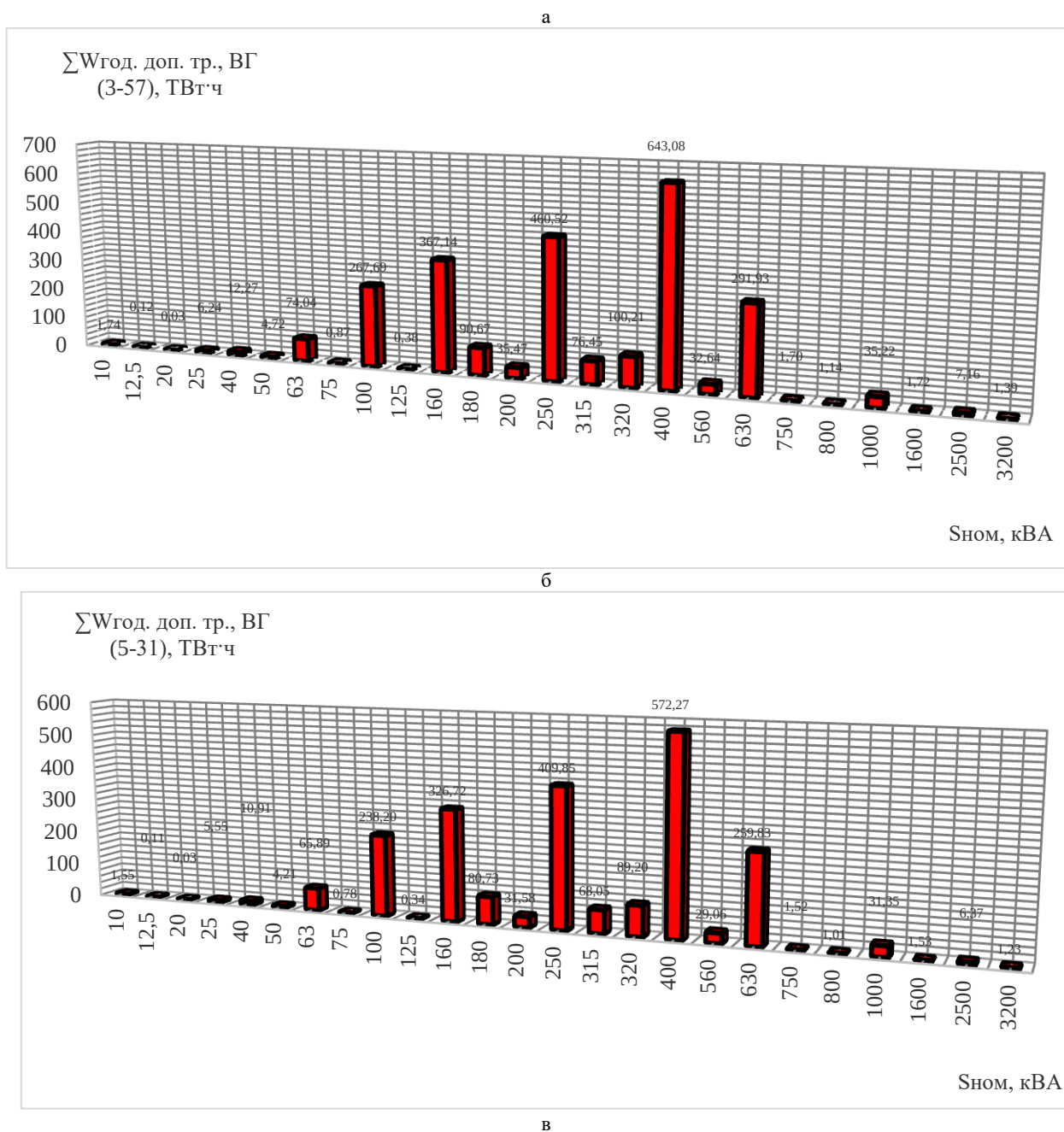


Рис. 2. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованные высшими гармониками в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3 = 0,70$, построенные при предельно-допустимом значении коэффициента искажения

синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}})$; б – гармоник,

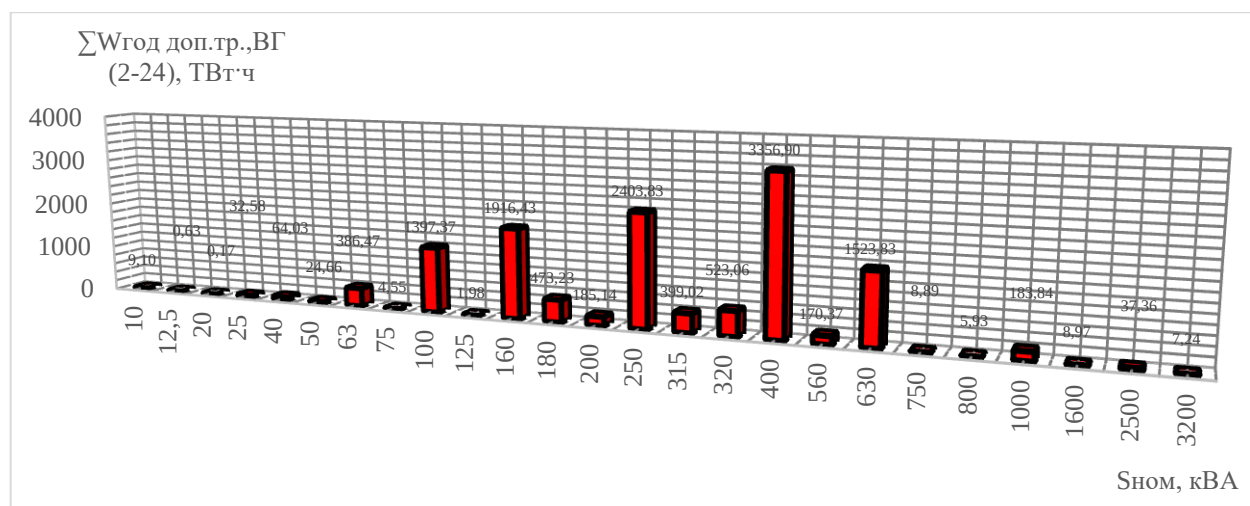
кратных трем $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}})$; в – гармоник обратной последовательности $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$

Анализ рис.2 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,70$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

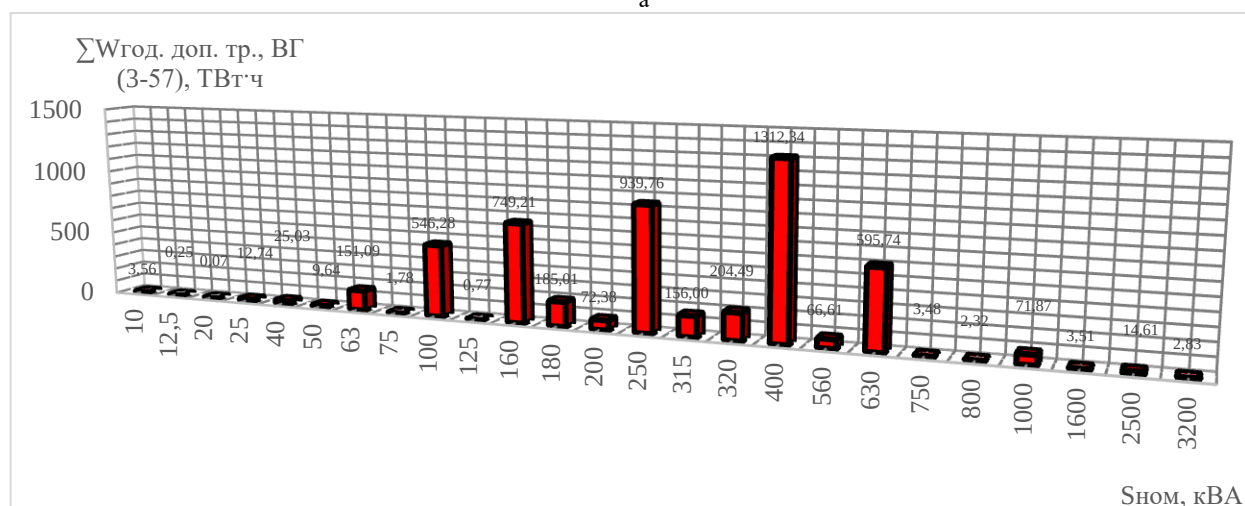
– четного спектра (2–24) возрастут в 11,3 раза;

– кратных трем (3–57) возрастут в 4,4 раза;

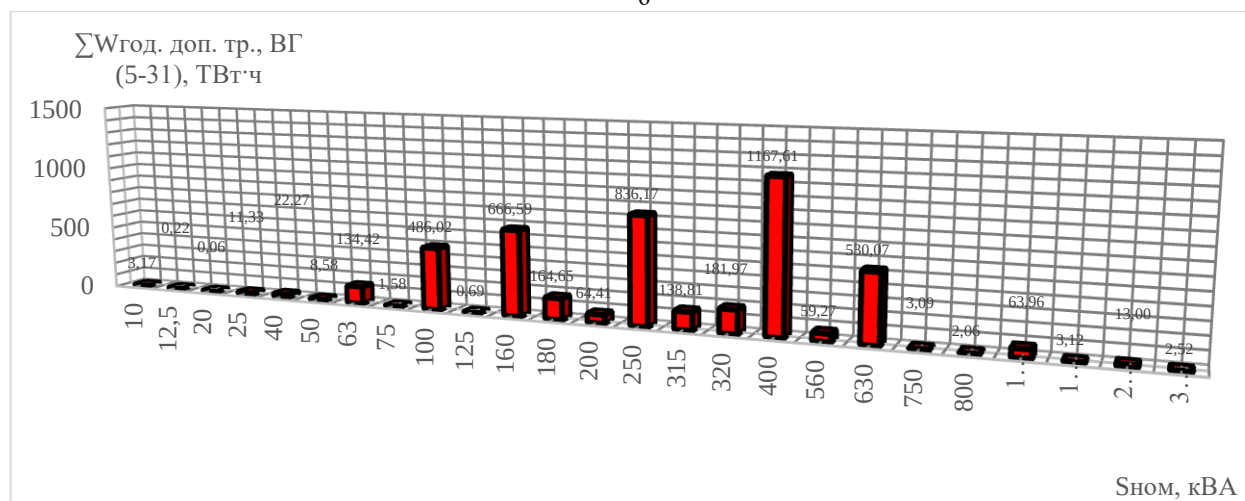
– обратной последовательности (5–31) возрастут в 3,9 раз по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 3. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованные высшими гармониками в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3=1,0$, построенные при нормально допустимом значении коэффициента искажения

синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}})$; б – гармоник,

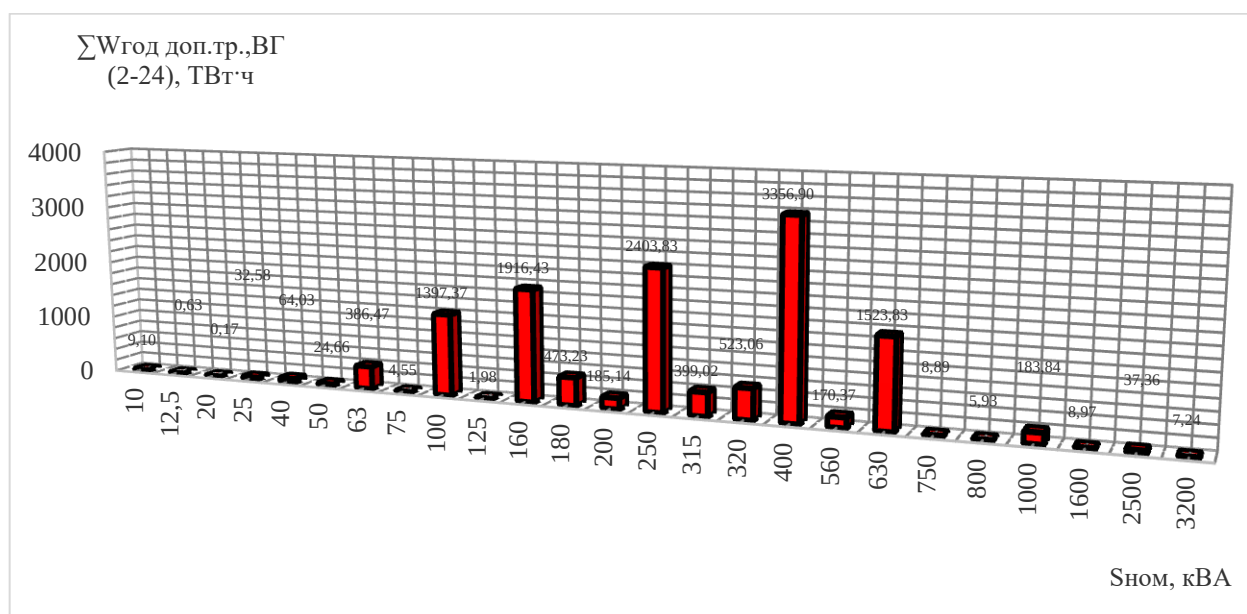
кратных трем $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}})$; в – гармоник обратной последовательности $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$

Анализ рис. 3 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=1,0$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

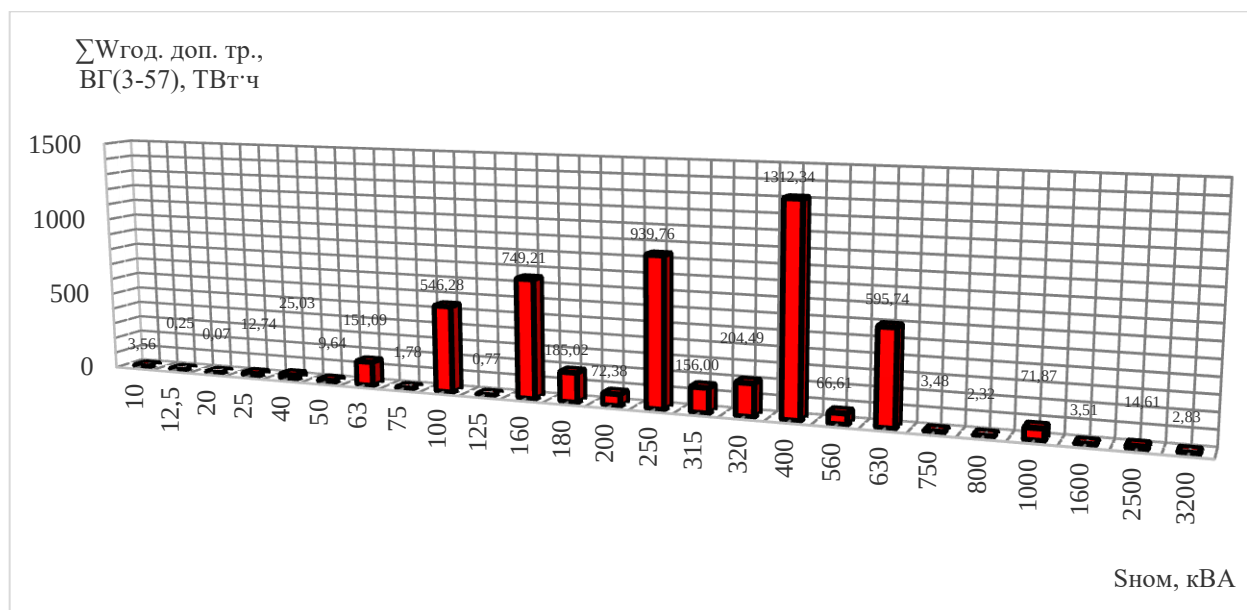
– четного спектра (2–24) возрастут в 23,0 раза;

– кратных трем (3–57) возрастут в 9,0 раз;

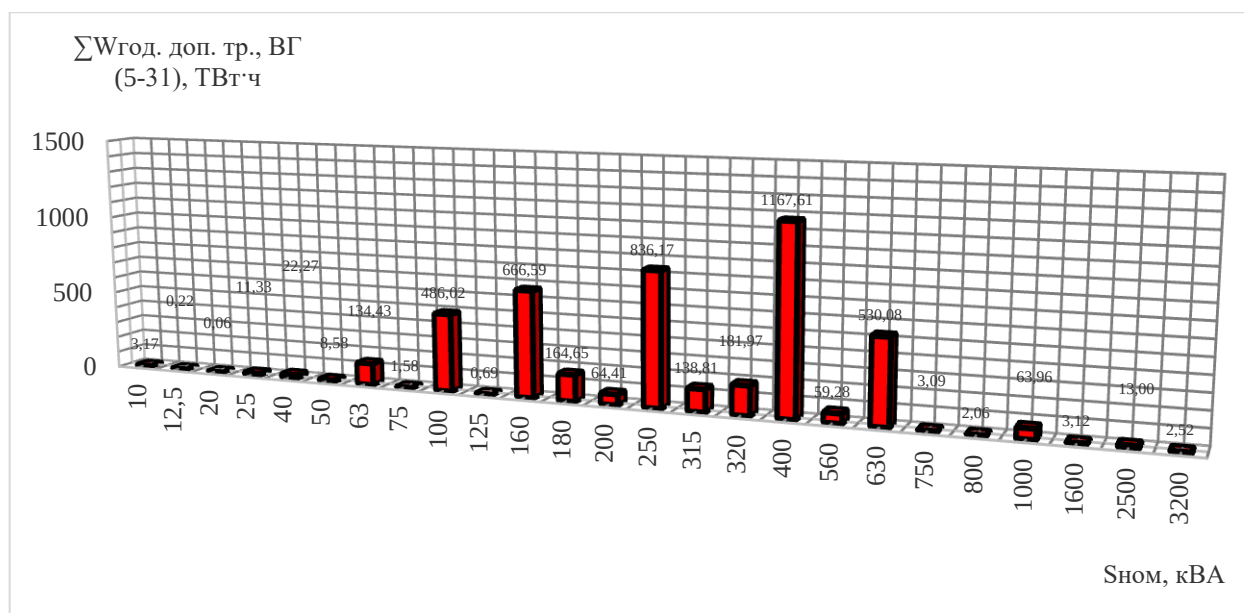
– обратной последовательности (5–31) возрастут в 8,0 раз по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 4. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованные высшими гармониками в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3=1,0$, построенные при предельно допустимом значении коэффициента искажения

синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник,

кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис.4 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=1,0$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 23,0 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 9,0 раз;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 8,0 раз по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Таким образом, для минимизации потерь активной электроэнергии и снижения вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду, вызванных влиянием спектрального состава высших гармоник, целесообразно рассмотреть в проекте варианты технического переоснащения существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на один из классов напряжения 10; 20 и 35 кВ с заменой морально устаревших СТ мощностью 12,5; 20; 50; 75; 125; 180; 200; 560; 750; 800; 1600; 2500 и 3200 кВА на СТ сухого исполнения с сочетанием напряжений (10; 15; 20; 35 /0,4 кВ), спроектированные в соответствии с основными отраслевыми стандартами: ГОСТ 9680 – 77; ГОСТ Р 52719 – 2007; ГОСТ Р 54827 – 2011; ГОСТ 16772 –

77; IEC 60076 – 11; IEC 60726 и IEC 61378 – 1, CENELEC HD 464 – HD 538.

Для определения варианта с малыми потерями активной электроэнергии в трансформаторах от режима высших гармоник в настоящей работе будут сопоставлены технические характеристики двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ, эксплуатируемые в РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» по состоянию на 01.01.2007 года, с техническими характеристиками двухобмоточных СТ сухого исполнения с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35/0,4 кВ), предназначенные для установки в РЭС – 10(6) кВ после технического переоснащения на один из классов напряжения 10; 15; 20 или 35 кВ [10, 11, 12, 16].

Так как в ГОСТ 14209 – 85 коэффициент допустимой перегрузки силового масляного трансформатора, стоящего в двухтрансформаторной подстанции, составляет 1,40, то дальнейший расчет потерь активной электроэнергии в двухобмоточных СТ сухого исполнения с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35/0,4 кВ) при осуществлении технического переоснащения РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на классы напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ будет проводиться при коэффициенте загрузки $K_3=0,7$ для СТ, работающих в нормальном режиме.

Для установки в РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» используются технические характеристики двухобмоточных СТ сухого исполнения с сочетанием напряжений (10; 15 20 и 35)/0,4 кВ следующих заводов изготовителей:

1. ABB, Швейцария [13];
2. Schneider Electric, Франция [14];
3. ELETTROMECCANICA COLOMBO, Италия [15];
4. «РосЭнергоТранс» – дочернее предприятие Группы «СВЭЛ», Россия [16];
5. ОАО «Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова», Республика Беларусь [17];
6. Компания SEA SpA, Италия [18].

Сравнительные результаты вариантов технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» Российской Федерации для минимизации дополнительных потерь активной электроэнергии, вызванных несинусоидальностью напряжения и высшими гармониками, приводятся ниже.

Вариант 1. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на классы напряжения 12 и 24 кВ с установкой двухобмоточных СТ с изоляцией из эпоксидной смолы, армированной стекловолокном, типа RESIBLOC® (Шведско-швейцарская транснациональная Компания ABB, Швейцария) [13]

Анализ технической информации, представленной в [13] позволил сделать заключение о том, что выпускаемые двухобмоточные СТ типа RESIBLOC® на классы напряжения 12 и 24 кВ имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 630 до 3150 кВА, что делает невозможным дальнейшую реализацию плана по техническому переоснащению РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на классы напряжения 10 или 20 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные СТ типа RESIBLOC®.

Вариант 2. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ с установкой двухобмоточных СТ с литой изоляцией серии Thrial производства компании Schneider Electric (завод France Transfo, Франция) [14]

Анализ технической информации, представленной в [14], позволил сделать заключение о том, что выпускаемые двухобмоточные СТ серии Thrial на классы напряжений 6; 10 и 20 кВ имеют широкую линейку номинала мощности СТ от 100 кВА до 15 МВА. Однако это не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжением 10(6)/0,4 кВ номинальной мощностью до 63 кВА в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ серии Thrial при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на классы напряжения 10 или 20 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшую реализацию плана по техническому переоснащению РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на классы напряжения 10 или 20 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные СТ серии Thrial.

Вариант 3. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ с установкой двухобмоточных СТ с литой изоляцией «Номекс» производства компании ELETTROMECCANICA COLOMBO (Masero, Италия) [15]

Анализ технической информации, представленной в [15], позволил сделать заключение о том, что выпускаемые двухобмоточные СТ компании ELETTROMECCANICA COLOMBO на классы напряжения 6; 10; 17,5; 20 и 35 кВ имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 100 до 3150 кВА, что не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ номинальной мощностью до 63 кВА в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на классы напряжения 10; 15; 20 или 35 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшую реализацию плана по техническому переоснащению РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на классы напряжения 10; 15; 20 или 35 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией.

Вариант 4. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ с установкой энергоэффективных двухобмоточных СТ серии ТС сухого исполнения производства «ГРУППА СВЭЛ» (Екатеринбург, Россия) [16]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии ТС с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ.

При техническом переоснащении существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ количество и суммарная номинальная мощность двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ будут такими, как представлено в табл. 1.

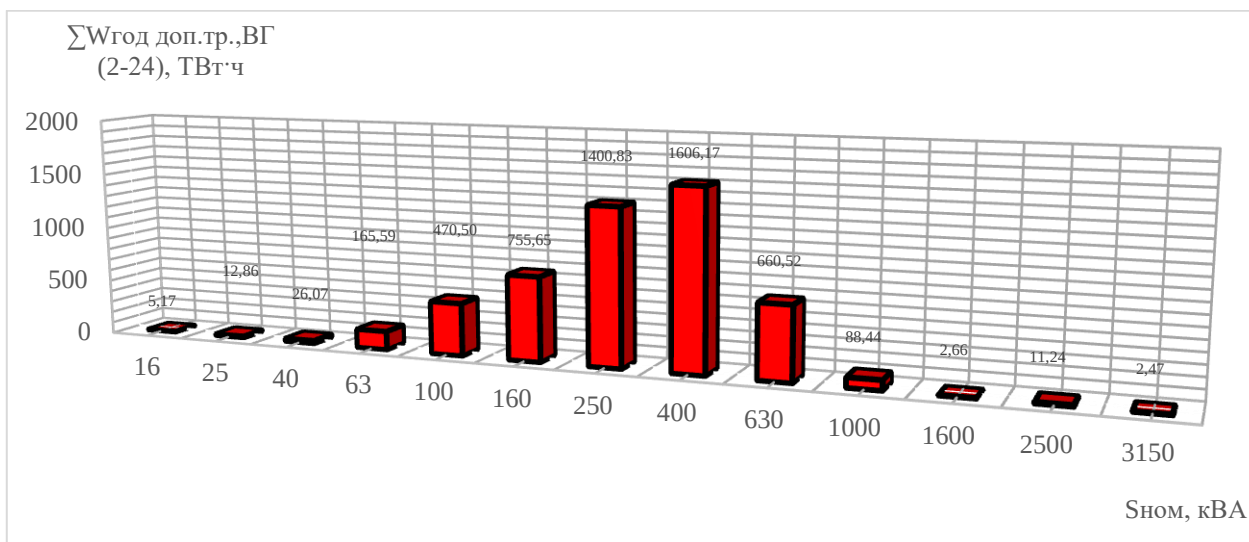
По результатам расчета на рис. 5 и 6 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТС, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра:

а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.мп}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник кратных трем $\sum W_{год.доп.мп}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.мп}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.

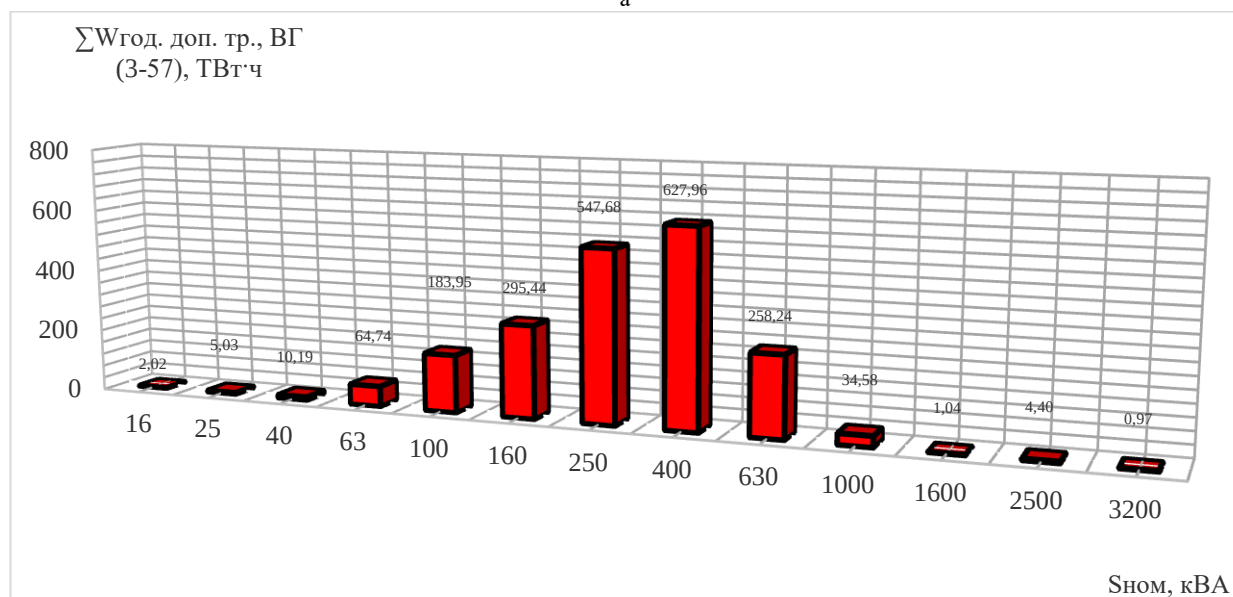
Таблица 1

Число и номинальная мощность двухобмоточных СТ сухого исполнения серии ТС с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ

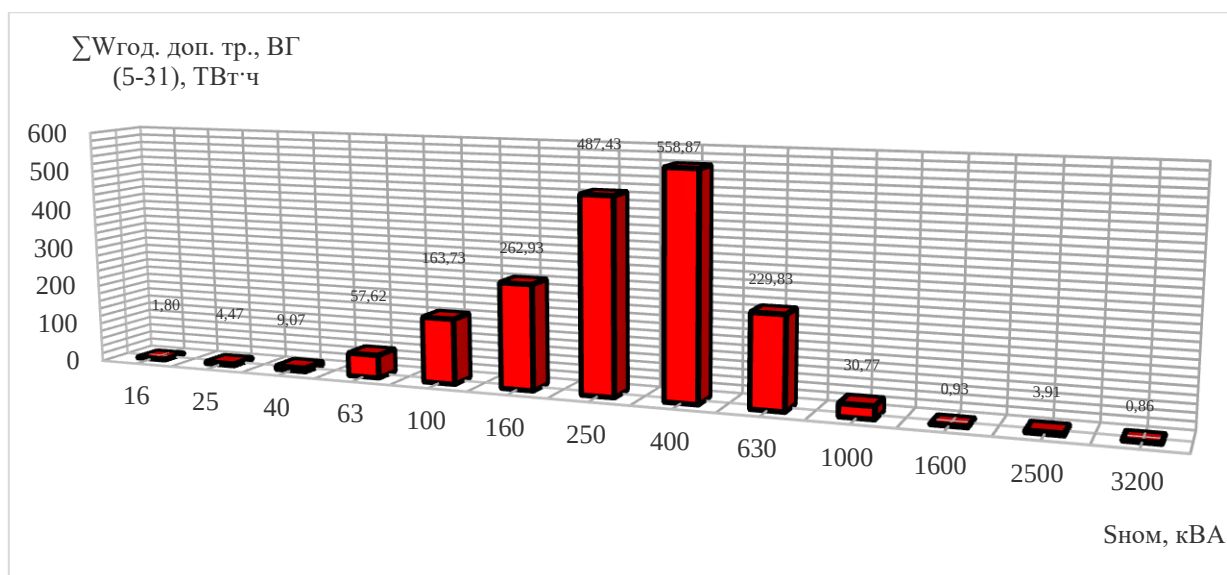
Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, кВА	$\Sigma S_{ном}$
16	77	1232	
25	163	4075	
40	239	9560	
63	977	61551	
100	2124	212400	
160	2124	339840	
250	3150	787500	
400	2486	994400	
630	900	567000	
1000	93	93000	
1600	2	3200	
2500	6	15000	
3150	1	3150	
Всего:	12342	3091958	



а



б



в

Рис. 5. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТС, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжений 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра:

а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$;

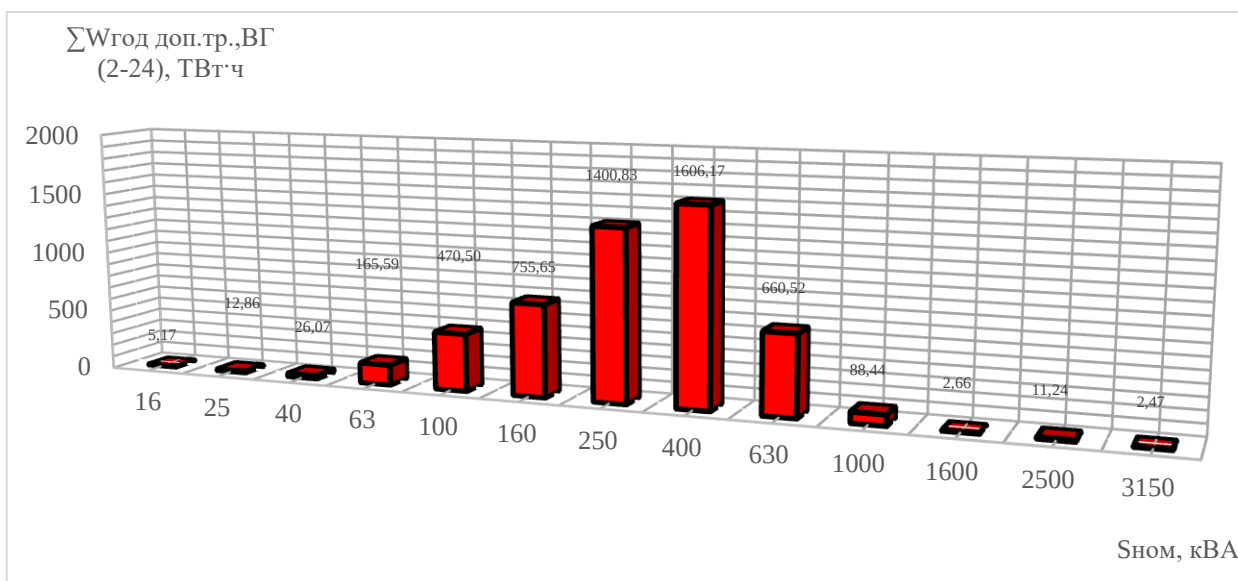
в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис. 5 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения серии ТС с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

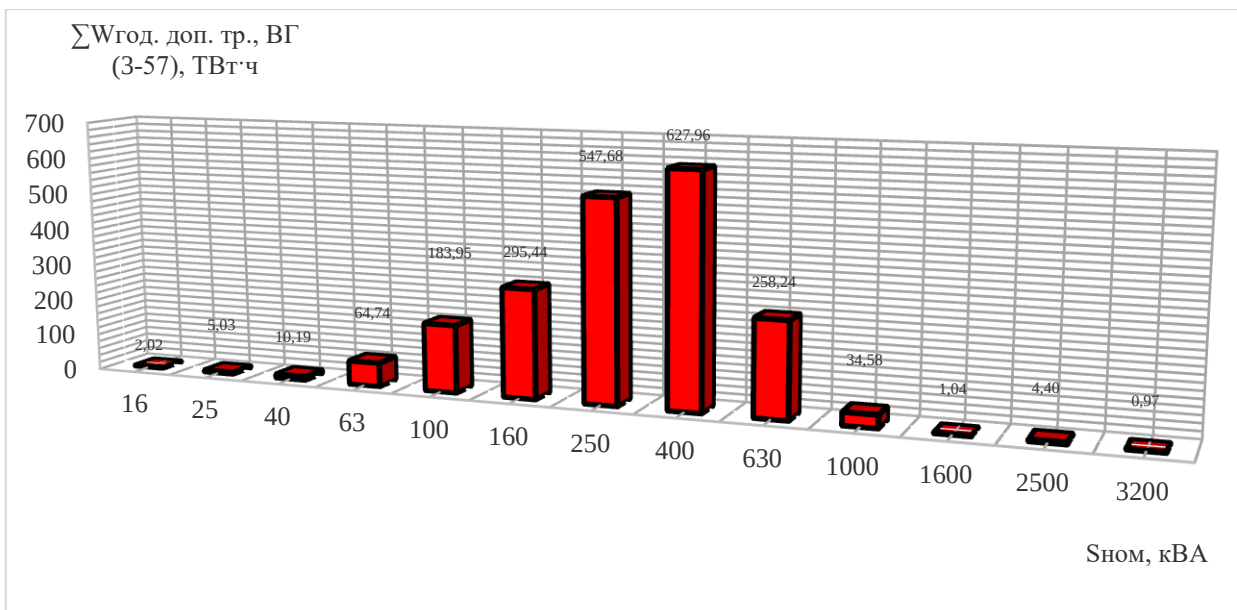
– четного спектра (2–24) возрастут в 9,1 раза;

– кратных трем (3–57) возрастут в 3,6 раза;

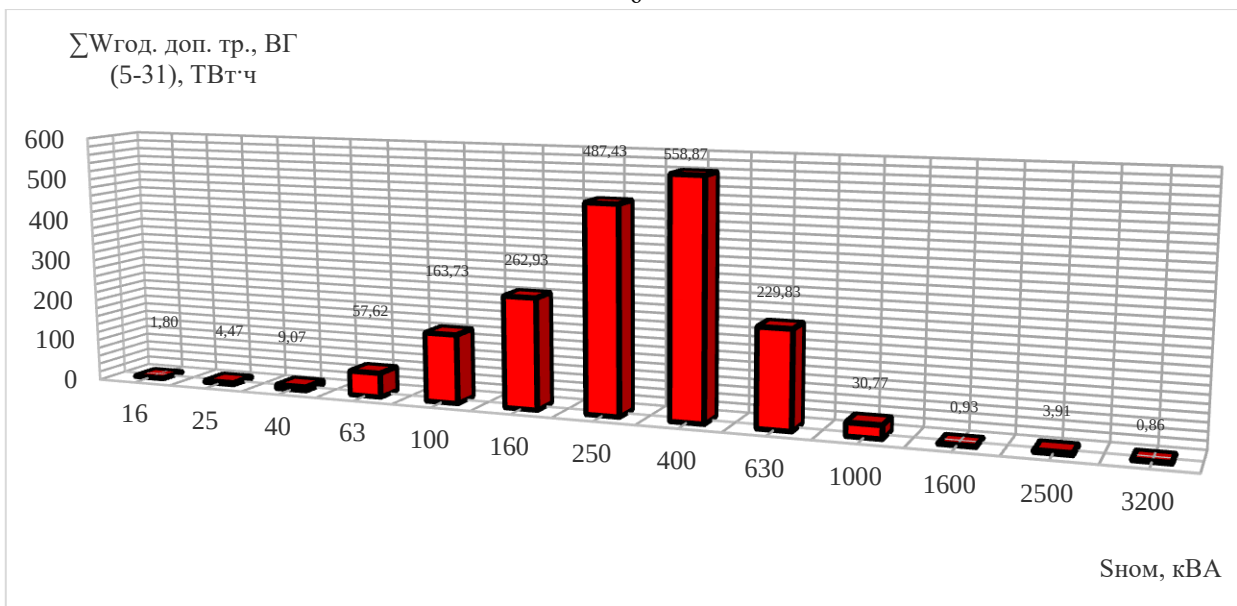
– обратной последовательности (5–31) возрастут в 3,2 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 6. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТС, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}})$; б –

гармоник, кратных трем $\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}})$; в – гармоник обратной последовательности

$$\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис. 6 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения серии ТС с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и предельно – допустимом

искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 9,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 3,6 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 3,2 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС

ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 5. Техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ с установкой энергоэффективных двухобмоточных СТ серии ТСЛ и ТСГЛ сухого исполнения производства ОАО «Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова», (Минск, Республика Беларусь) [17]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии ТСЛ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ, литой изоляцией обмоток, номинальной мощностью от 25 до 100 кВА, а также СТ серии ТСГЛ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ с геафольевой литой изоляцией обмоток, номинальной мощностью от 160 до 2500 кВА. Трансформаторы серии ТСЛ комплектуются обмотками фирмы «ТМС», а трансформаторы серии ТСГЛ – обмотками фирмы «Siemens», класса нагревостойкости F. Для

изоляции обмоток используется эпоксидный компаунд с кварцевым наполнителем (геафоль). Дополнительно обмотки усилены стеклотканью, что исключает возникновение трещин в эпоксидном компаунде даже при перегрузке СТ. Геафоль не оказывает вредного влияния на окружающую среду, не выделяет токсичных газов даже при воздействии дуговых разрядов. Благодаря такой изоляции обмотки не требуют технического обслуживания.

Трансформаторы данных серий могут работать в сетях, подверженных грозовым и коммутационным перенапряжениям, имеют низкий уровень шума и высокую термическую и динамическую устойчивость к токам короткого замыкания.

При техническом перевооружении существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ количество и суммарная номинальная мощность двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ будут такими, как представлено в табл. 2.

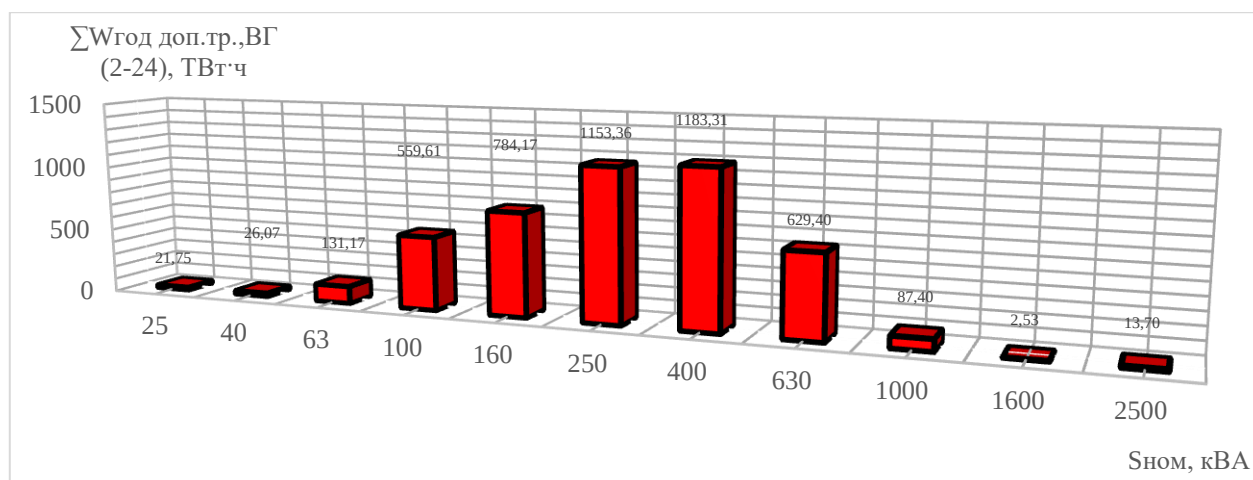
Таблица 2

Число и номинальная мощность двухобмоточных СТ сухого исполнения серии ТСЛ и ТСГЛ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ после технического перевооружения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ

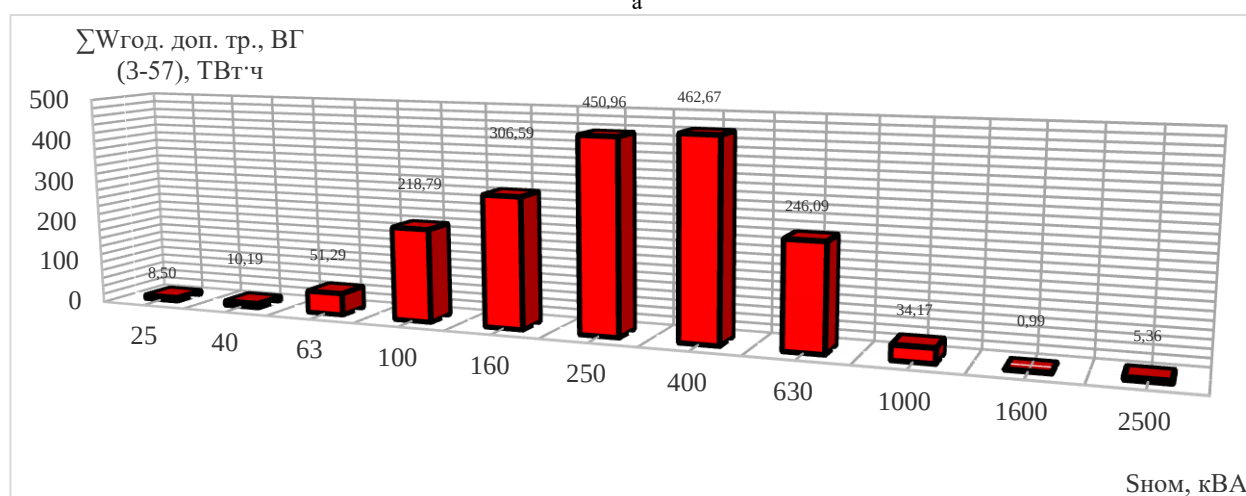
Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\sum S_{\text{ном}}$, кВА
25	240	6000
40	239	9560
63	977	61551
100	2124	212400
160	2124	339840
250	3150	787500
400	2486	994400
630	900	567000
1000	93	93000
1600	2	3200
2500	7	17500
Всего:	12342	3091951

По результатам расчета на рис. 7 и 8 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТСЛ и ТСГЛ, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10

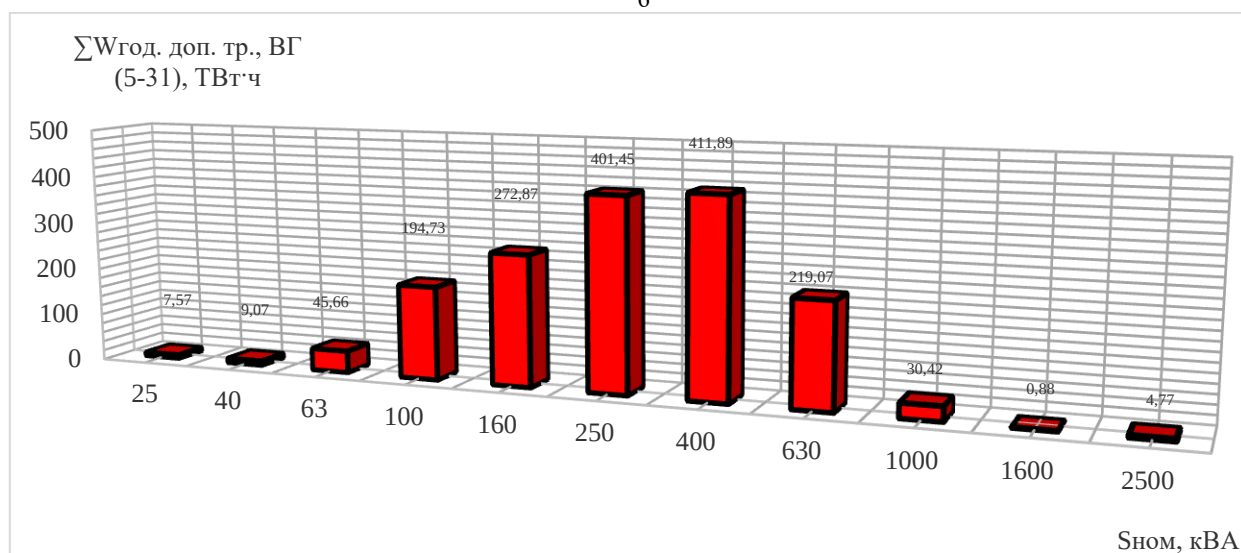
кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$.



а



б



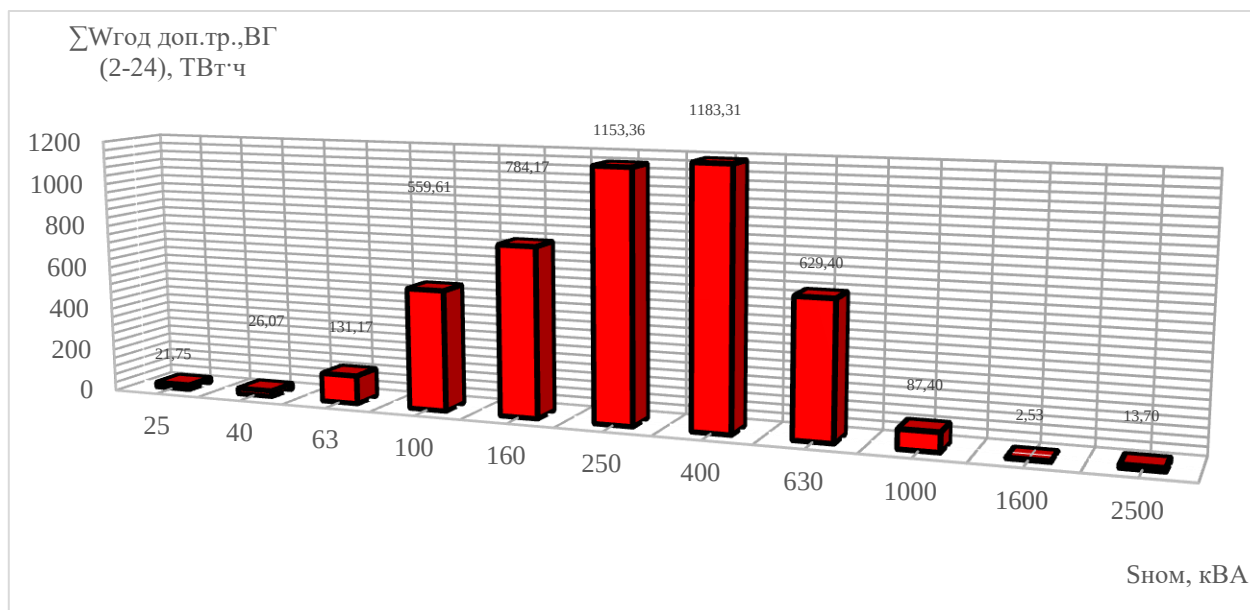
в

Рис. 7. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТСЛ и ТСГЛ, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра:

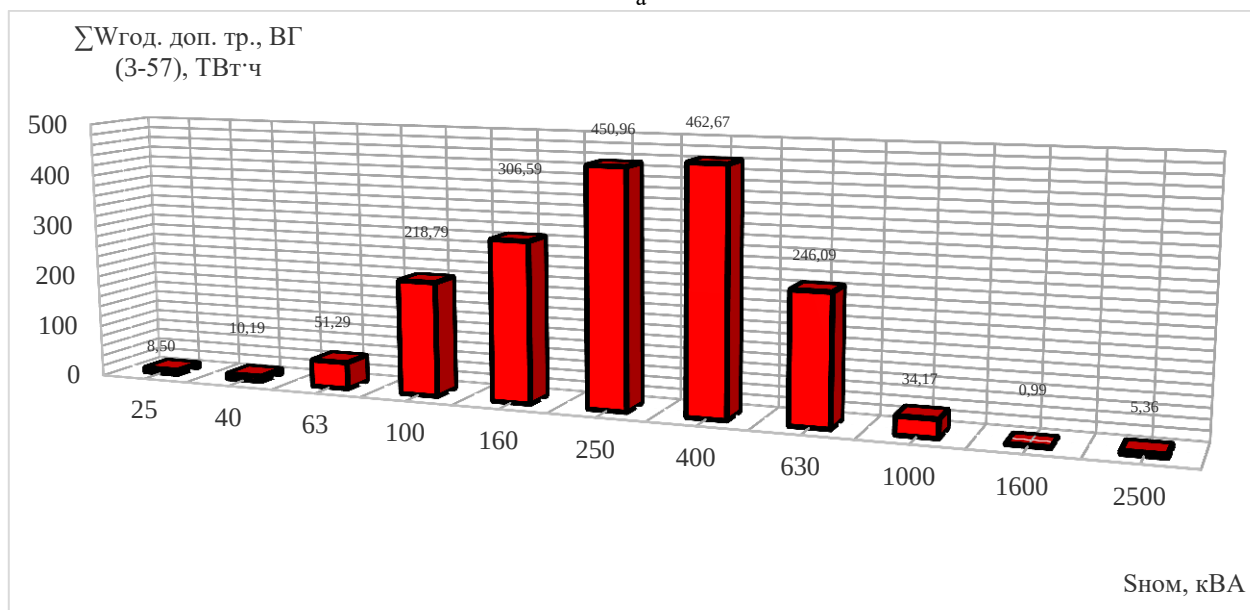
а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис. 7 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения серии ТСЛ и ТСГЛ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

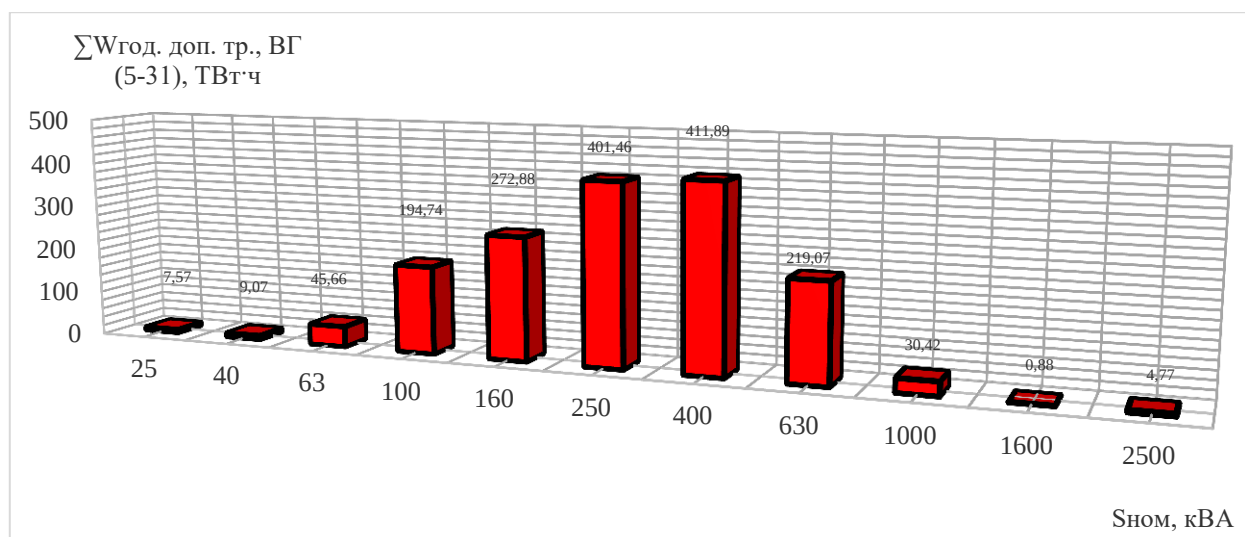
- четного спектра (2–24) возрастут в 8,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 3,1 раза;
- обратной последовательности (5–31) возрастут в 2,8 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 8. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТСЛ и ТСГЛ, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом предельно допустимого значения

коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис. 8, позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения, серии ТСЛ и ТСГЛ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 8,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 3,1 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 2,8 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Варианты № 6 – 13 предусматривают реализацию плана по техническому перевооружению РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на классы напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – А, В, С и D ЕСО+Р производства компании SEA, Италия), удовлетворяющих требованиям Этапа I Европейской Нормы № 548/2014 [18]

Трансформаторы серии TTR – трансформаторы сухого исполнения с литой изоляцией, которые являются альтернативой традиционным масляным трансформаторам. Трансформаторы серии TTR

стандартного и нестандартного исполнений (рис. 9 и 10) предназначены для эксплуатации как в городских электросетях, так и в электроснабжении ответственных узлов крупных промышленных предприятий [18].

Благодаря инновационным конструкторским решениям, универсальности применяемых компонентов и современному оборудованию, использование трансформаторов данной серии обеспечивает следующие преимущества:

- используемые материалы являются самогасящимися и в случае возникновения пожаров не выделяют ядовитых газов;
- сокращение времени и объемов периодических осмотров и операций по обслуживанию;
- максимальный контроль качества на всех этапах производства.

Эти преимущества особенно ценны там, где к оборудованию предъявляются жесткие требования в отношении пожаробезопасности и надёжности электроснабжения. Например, при строительстве больниц, социокультурных объектов, аэропортов, метрополитенов, угледобывающих шахт, нефтедобывающих платформ, атомных электростанций, в судостроении и т.д.

Согласно действующим ПУЭ, строительство встроенных и пристроенных трансформаторных подстанций выполняется только с применением сухих трансформаторов.



Рис.9. Стандартная модель СТ серии SEA



Рис.10. Нестандартная модель СТ серии SEA

Технология производства

Магнитная система. Низкий уровень магнитных потерь в трансформаторах серии TTR обусловлен применением высококачественных материалов с ориентированным направлением прокатки стали с высоким значением магнитной проницаемости, изолированных между собой карлитом. Изоляция и окраска сердечника соответствует диапазону температурного класса «F». Особая форма исполнения сердечника позволяет создавать соединения, называемые «STEP – LAP», которые обеспечивают низкий уровень шума и потери холостого хода.

Обмотка высшего напряжения. Обмотка изготавливается на автоматизированных линиях и состоит из набора катушек, выполненных из ленточного алюминия. Межвитковая изоляция выполняется с помощью полиэфирной пленки. Катушки армируются стекловолокном, подвергаются глубокой сушке и в последствии заливаются в вакууме эпоксидной смолой класса «F», смешанной с кварцем и тригидрооксидом алюминия. Таким образом, обеспечивается низкий уровень частичных разрядов, достигаются превосходные механические характеристики и соответствие классам C1 и C2 нормативной документации CENELEC, надежность и продолжительность срока службы. Выводы регулировки напряжения ($\pm 2 \times 2,5\%$) выполнены непосредственно по центру обмотки, контактные соединения осуществляются с помощью латунных перемычек, фиксируемых болтами.

Обмотка низкого напряжения. Обмотки выполняются из медной или алюминиевой фольги, изолированные диэлектрической пленкой класса «F». Сборка обмоток выполняется по технологии «pre – preg» с сушкой в печи. Выводы обмоток

выполнены из набора алюминиевых пластин, сваренных в инертной среде и жестко закрепленных к каркасу при помощи опорных изоляторов. Такая конструкция обеспечивает:

- повышенную стойкость к влажности и агрессивной промышленной среде;
- большую диэлектрическую прочность;
- высокую электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания.

Трансформаторы серии TTR соответствуют классам сред E0, E1 и E2. Способность СТ выдерживать особые условия эксплуатации и влажности признана удовлетворительной. Центром CESI успешно проведены испытания, удостоверяющие соответствие классам:

- E1, E2, сертификаты AT-96/014963 и AT-97/011469;
- C1 и C2, сертификат AT-97/006808.

Вариант 6. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – A AoBk ECO+P [18]

Анализ технической информации, представленной в [18], позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 10 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 50 до 630 кВА, что не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на класс напряжения 10 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ

с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные серии **TTR – А АоВк ЕСО+Р** с напряжением 10/0,4 кВ.

Вариант 7. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р [18]**

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р** с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50Гц, эксплуатационные характеристики которых удовлетворяют требованиям нормы ЕВ № 548/2014 – Tier I [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ

следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ, с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии **TTR – А Ао Ак ЕСО+Р** номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл. 3.

Таблица 3

Число и номинальная мощность СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ**

Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, Σ Sном, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895

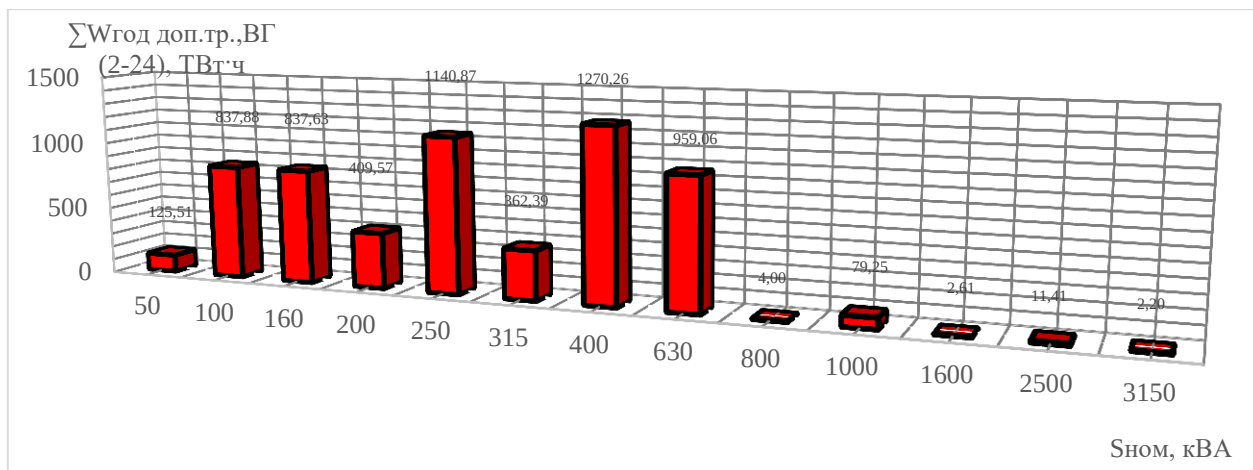
По результатам расчета на рис. 11 и 12 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р**, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра:

а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.

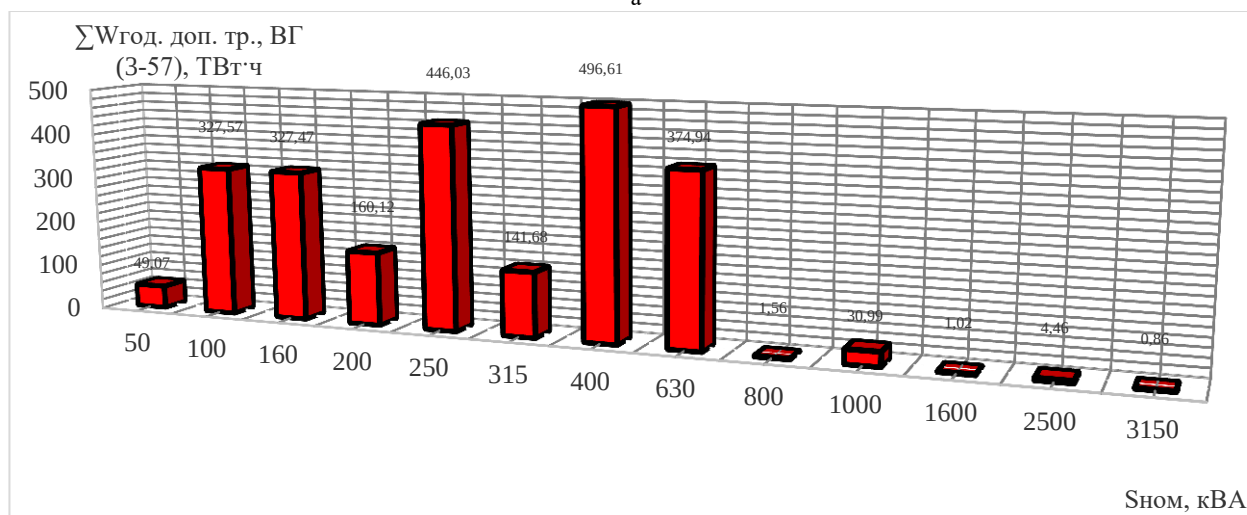
Анализ рис. 11, позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения серии **TTR – А АоАк ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 10,6 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 4,1 раза;
- обратной последовательности (5–31)

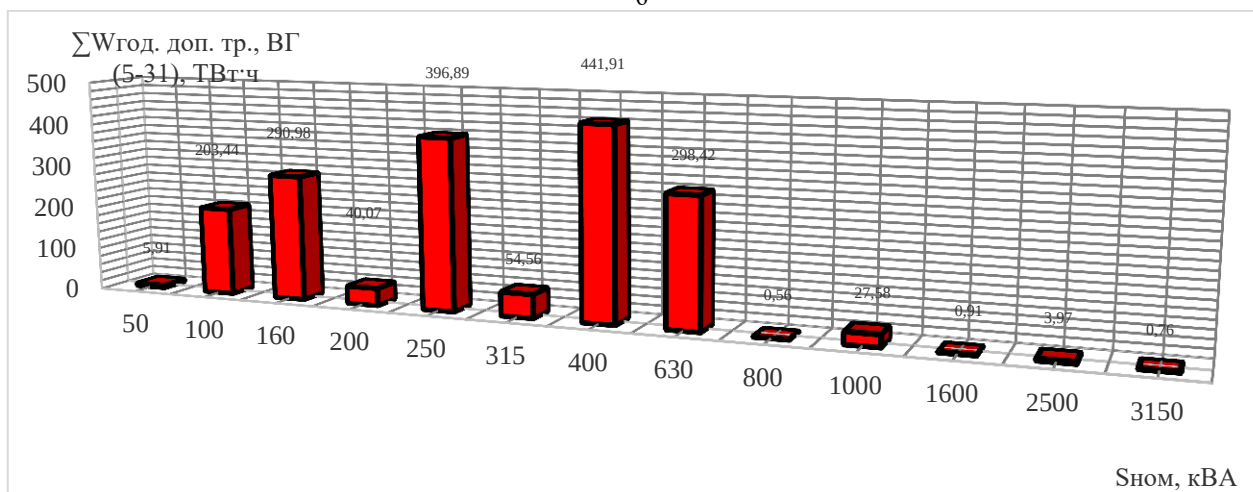
возрастут в 3,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б

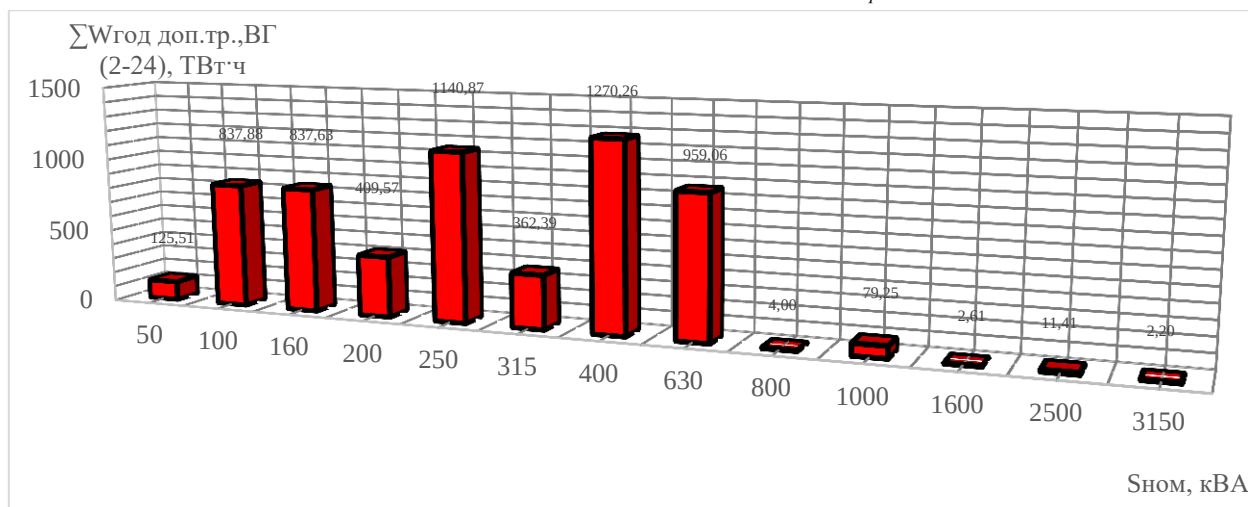


в

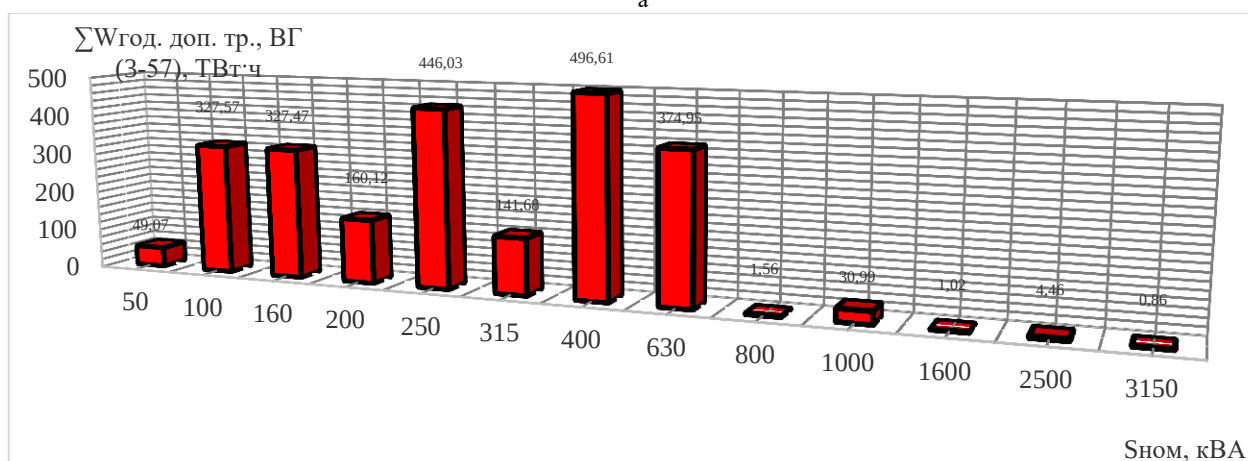
Рис. 11. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – A AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\Sigma W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном}); \text{ б – гармоник кратных трем } \Sigma W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном});$$

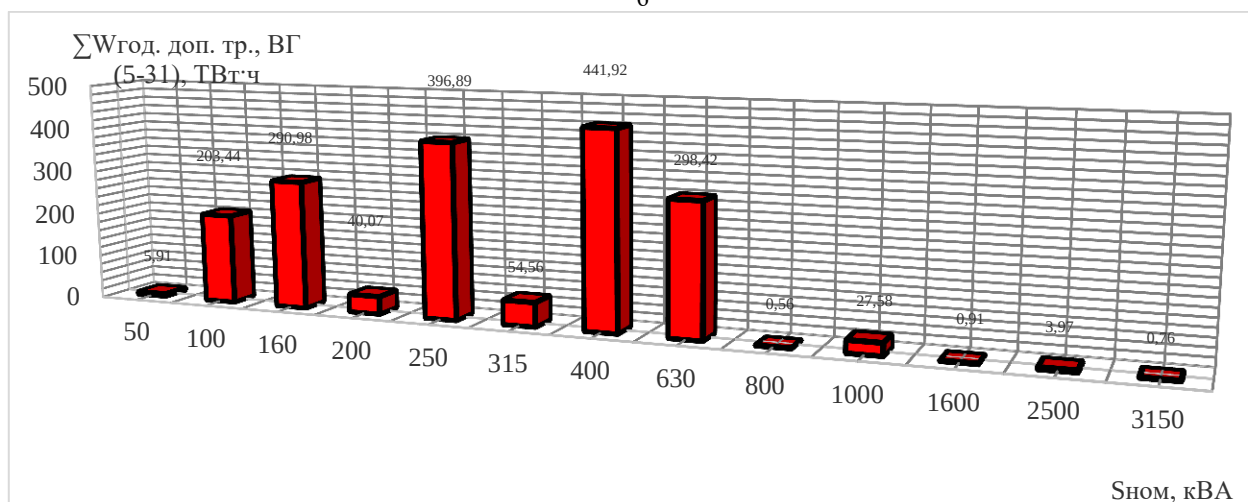
в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$



а



б



в

Рис. 12. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – A AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом предельно допустимого значения

коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной

$$\text{последовательности } \sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис. 12 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – А AoAk ECO+P** с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

– четного спектра (2–24) возрастут в 10,6 раза;

– кратных трем (3–57) возрастут в 4,1 раза;

– обратной последовательности (5–31) возрастут в 3,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 8. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – В AoBk ECO+P [18]

Анализ технической информации, представленной в [18], позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 15 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 50 до 630 кВА, что не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжения 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на классы напряжения 15 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее

техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 15 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные **серии TTR – В AoBk ECO+P** с напряжением 15/0,4 кВ.

Вариант 9. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – В AoAk ECO+P [18]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии TTR – В AoAk ECO+P с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50 Гц и удовлетворяющие требованиям нормы ЕУ № 548/2014 – Tier I [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 15 кВ следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии TTR – В Ao Ak ECO+P номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии TTR – В AoAk ECO+P с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл. 4.

Таблица 4

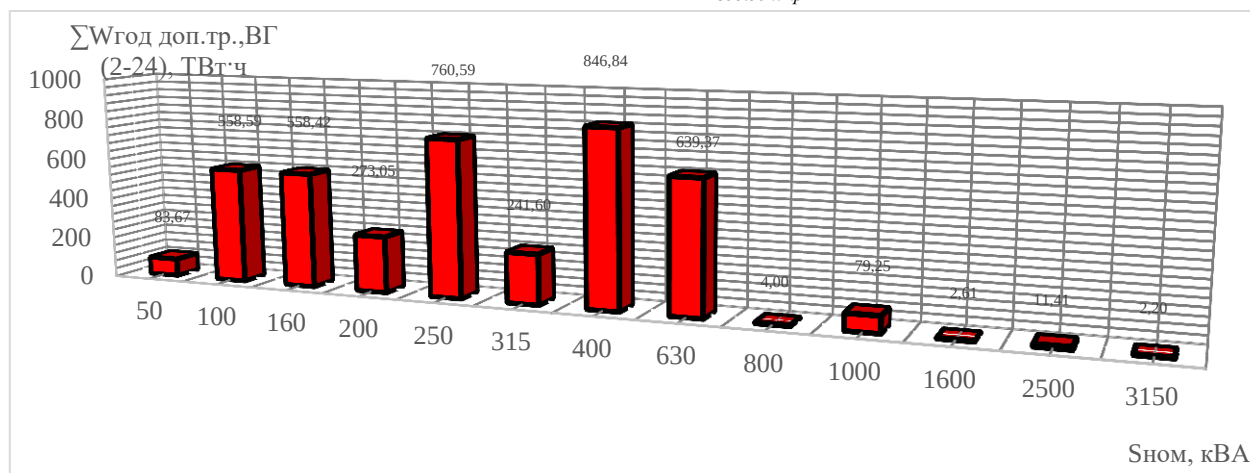
Число и номинальная мощность СТ сочетанием напряжений 15/0,4 кВ серии TTR – В AoAk ECO+P после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ

Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\sum S_{\text{ном}}$, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895

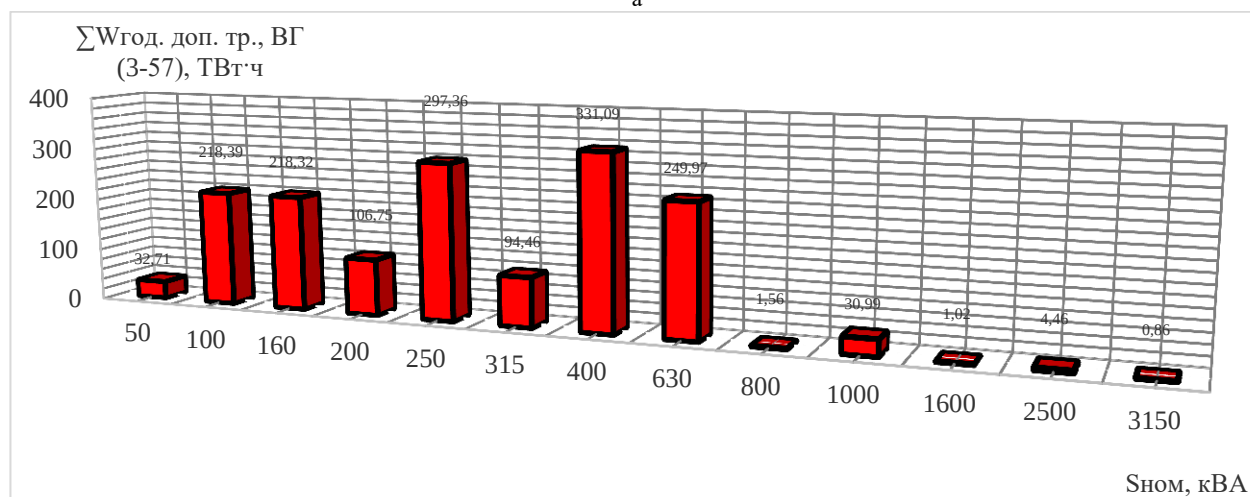
По результатам расчета на рис. 13 и 14 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – В AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому

переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{\text{год.доп.тр}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}})$; в

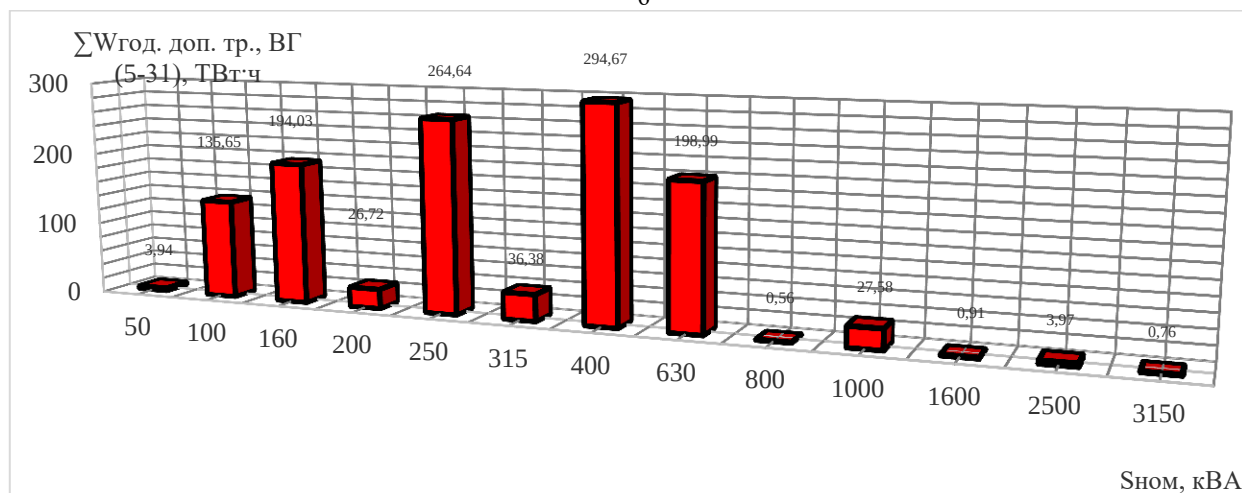
– гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.



а



б



в

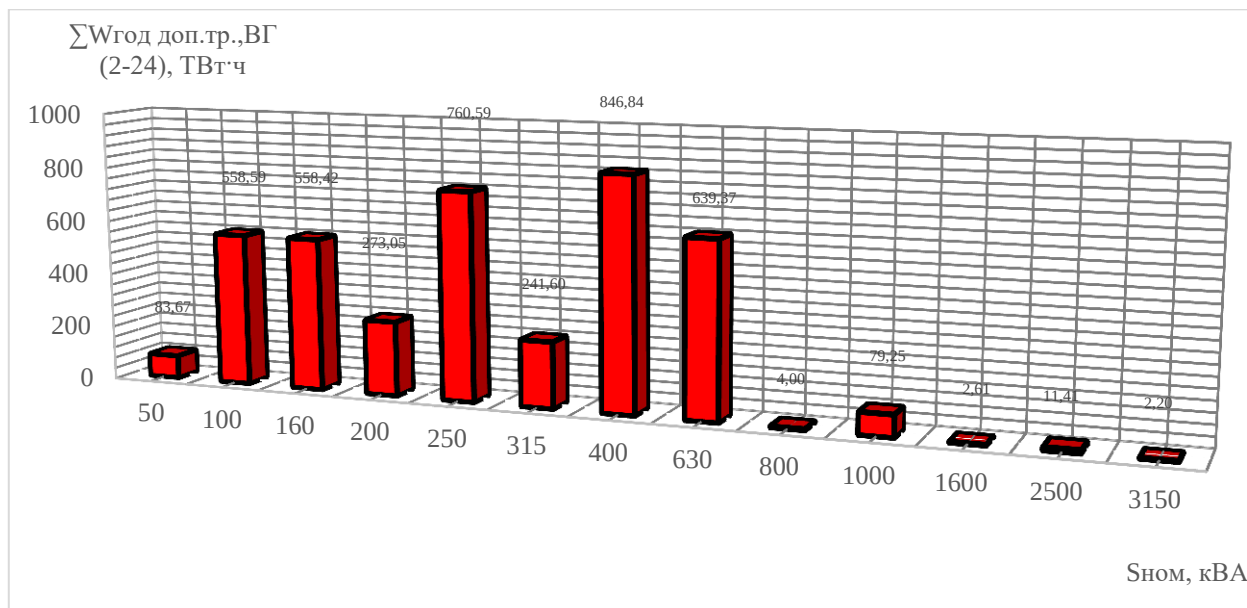
Рис. 13. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения, **серии TTR – В AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной

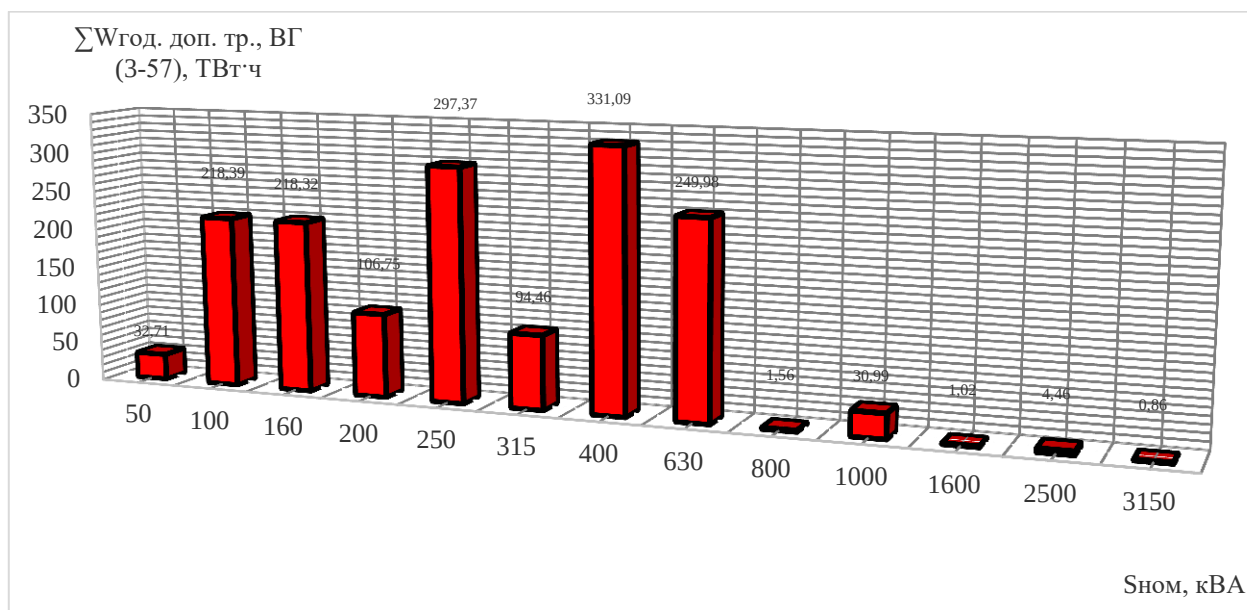
$$\text{последовательности } \sum W_{\text{год.доп.тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис. 13 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – В AoAk ECO+P** с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

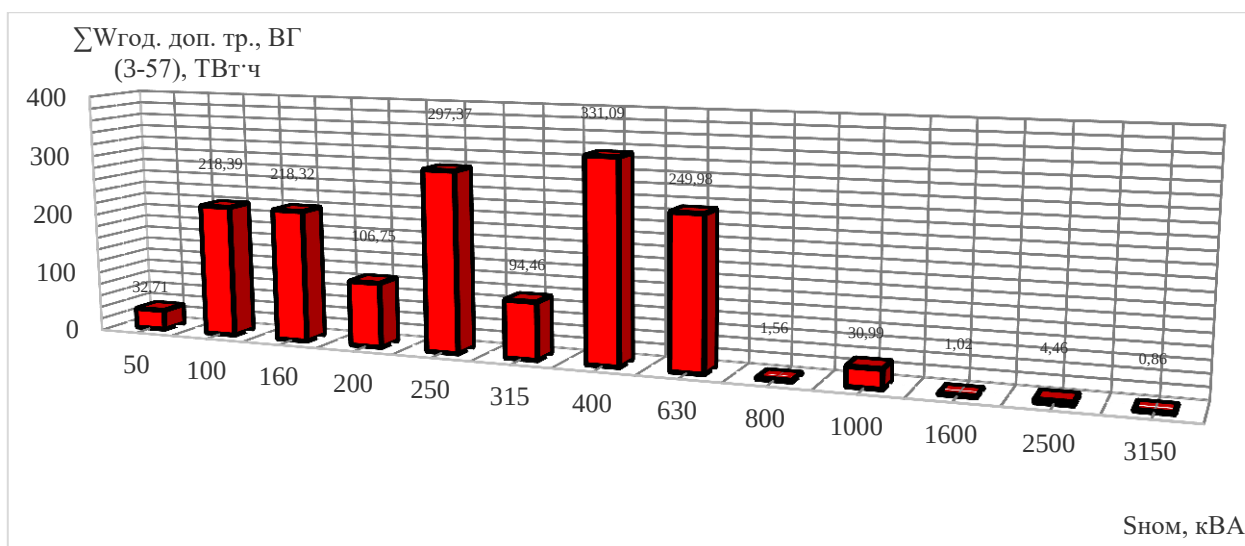
- четного спектра (2–24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31) возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



В

Рис. 14. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – В AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения

коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.

Анализ рис. 14 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – В AoAk ECO+P** с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2–24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 10. Техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – С AoBk ECO+P [18]

Анализ технической информации, представленной в [18], позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 20 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 50 до 630 кВА, что не позволяет оптимально выполнить

замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжением 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому перевооружению этой сети на классы напряжения 20 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 20 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные **серии TTR – С AoBk ECO+P** с напряжением 20/0,4 кВ.

Вариант 11. Техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – С AoAk ECO+P [18]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии TTR – С AoAk ECO+P с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50 Гц и удовлетворяющие требованиям нормы EU № 548/2014 – Tier I [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 20 кВ следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии TTR – С Ао Ак ЕСО+Р номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии TTR – С Ао Ак ЕСО+Р с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл. 5.

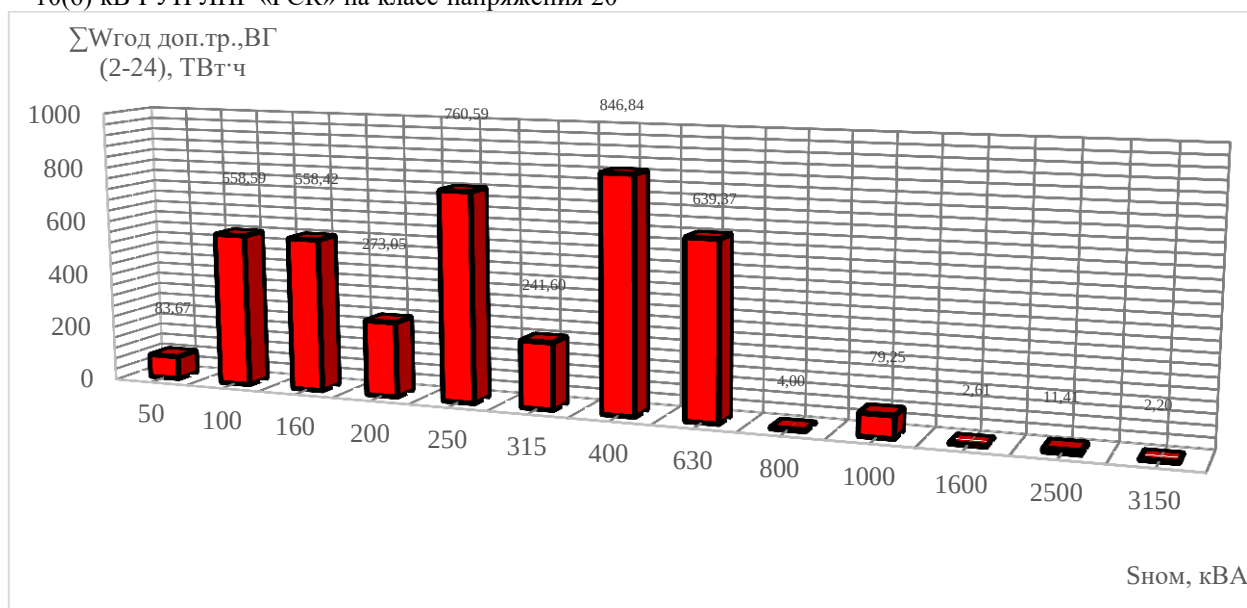
Таблица 5

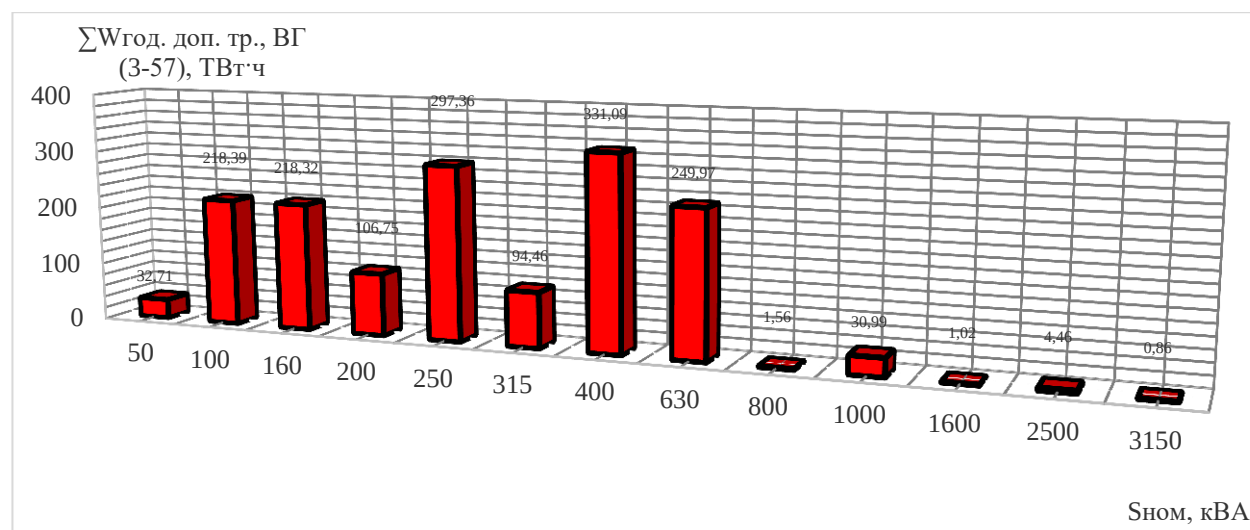
Число и номинальная мощность СТ сочетанием напряжений 20/0,4 кВ серии TTR – С Ао Ак ЕСО+Р после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ

Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\sum S_{ном}$, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895

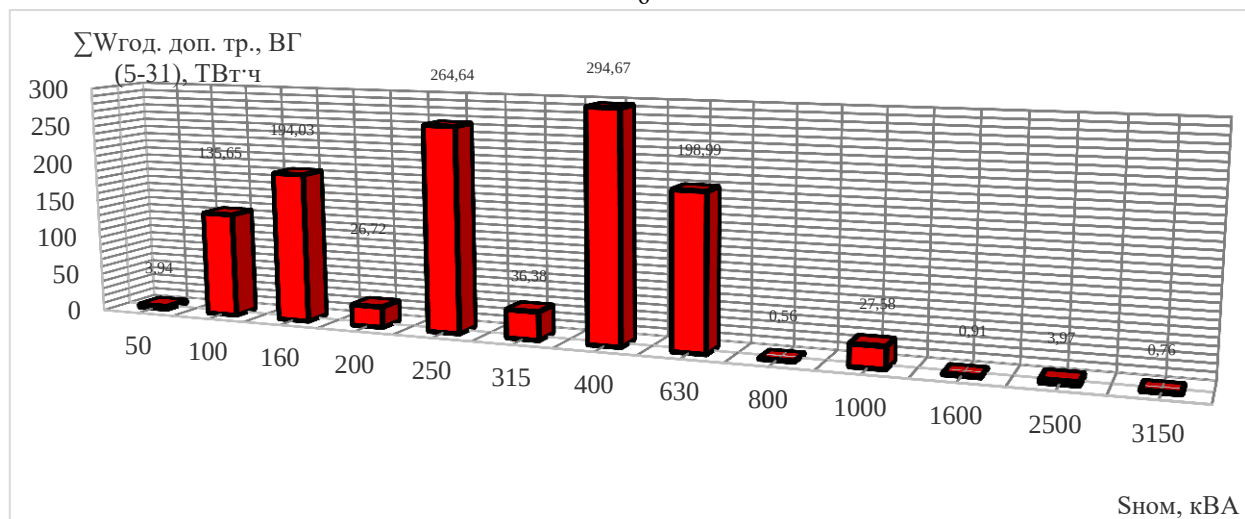
По результатам расчета на рис. 15 и 16 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения серии TTR – С АоАк ЕСО+Р, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20

кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.





б



в

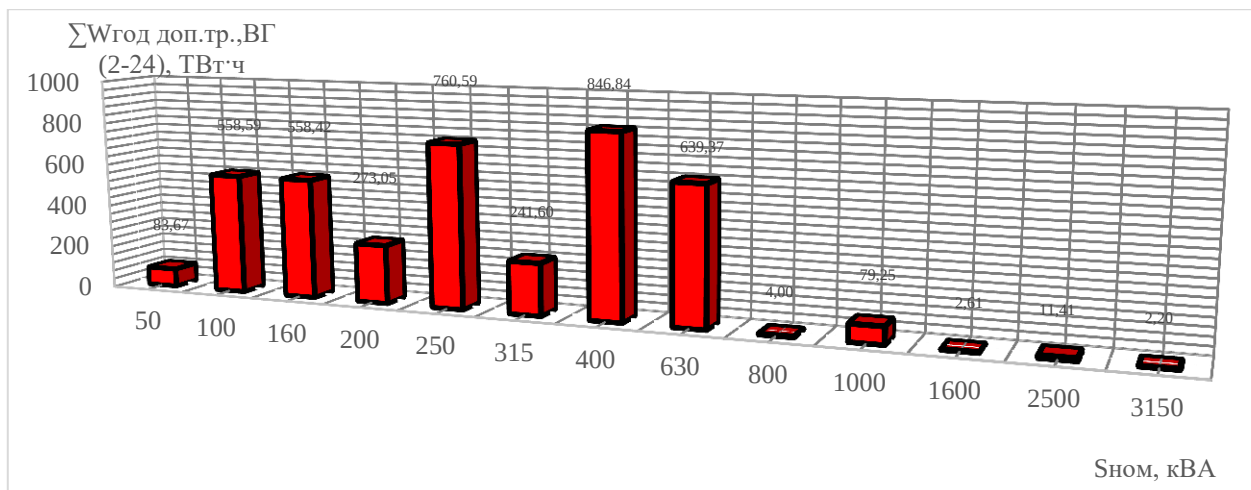
Рис. 15. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – C AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}}); \text{ б – гармоник, кратных трем } \sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}});$$

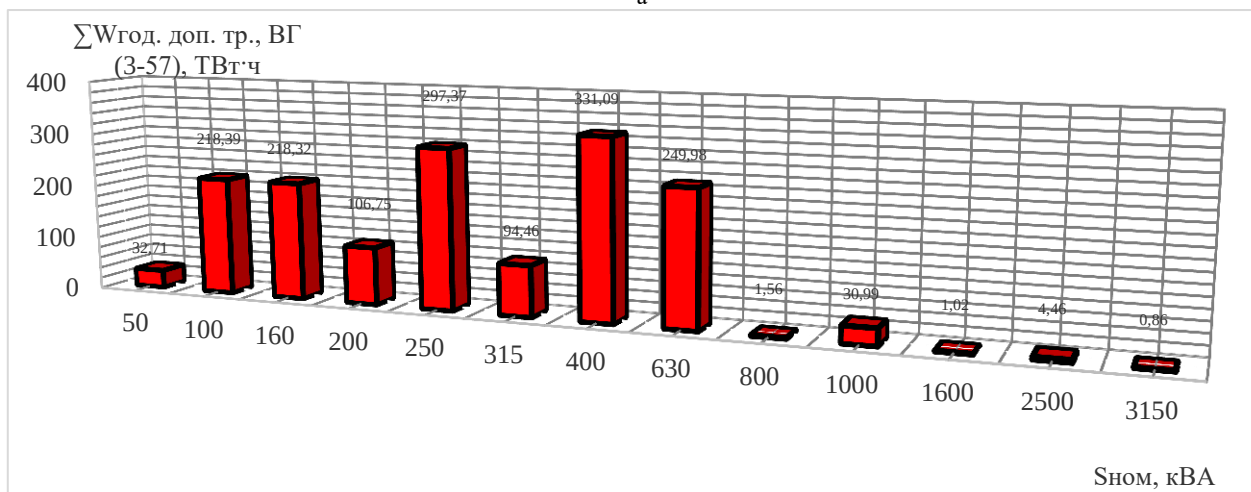
$$\text{в – гармоник обратной последовательности } \sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис. 15 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – C AoAk ECO+P** с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения, от действия гармоник:

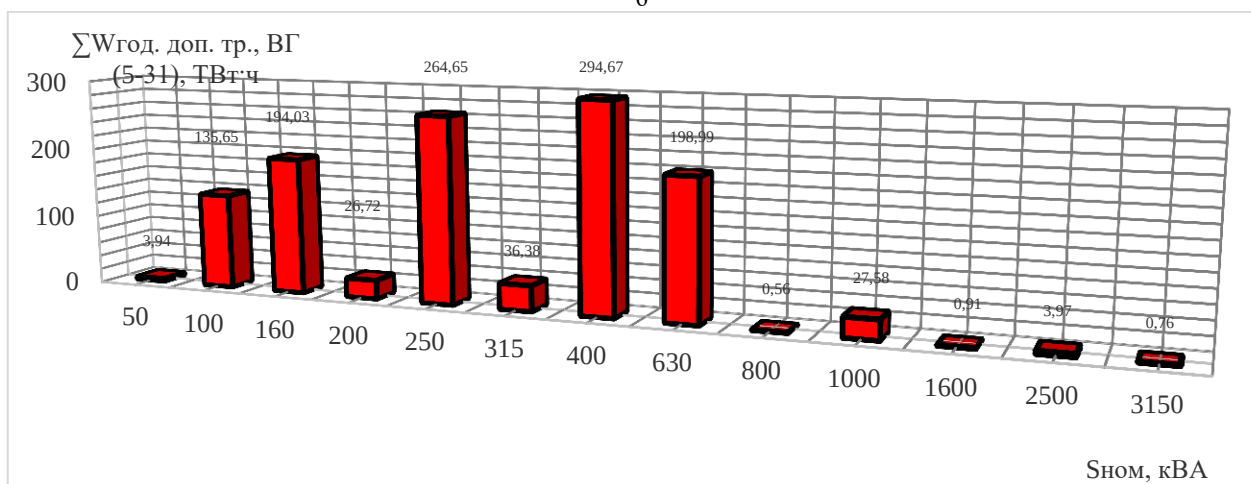
- четного спектра (2–24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31) возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 16. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – C AoAk ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения

коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$

Анализ рис. 16, позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – С AoAk ECO+P** с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2 – 24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 12. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 35 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – D AoBk ECO+P [18]

Анализ технической информации, представленной в [18] позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 35 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 100 до 630 кВА, что не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на классы напряжения 35 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 35 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные **серии TTR – D AoBk ECO+P** с напряжением 35/0,4 кВ.

Вариант 13. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 35 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – D AoAk ECO+P [18]

Анализ технической информации, представленной в [18], позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 35 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 800 до 3150 кВА, что не позволяет оптимально выполнить замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому переоснащению этой сети на классы напряжения 35 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 35 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ

на двухобмоточные **серии TTR – D AoAk ECO+P** с напряжением 35/0,4 кВ.

Варианты № 14 – 17 предусматривают реализацию плана по техническому переоснащению РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на классы напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – А, В, С и D с уровнем потерь $A_0 = 10\%A_k$ ECO+P производства компании SEA, Италия), удовлетворяющие требованиям Этапа II Европейской Нормы № 548/2014[18].

Вариант 14. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – А Ao – 10%Ak ECO+P [18]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии TTR – А Ao – 10%Ak ECO+P с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50Гц, эксплуатационные характеристики которых удовлетворяют требованиям нормы EU № 548/2014 – Tier II [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 10 кВ следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии TTR – А Ao – 10%Ak ECO+P номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

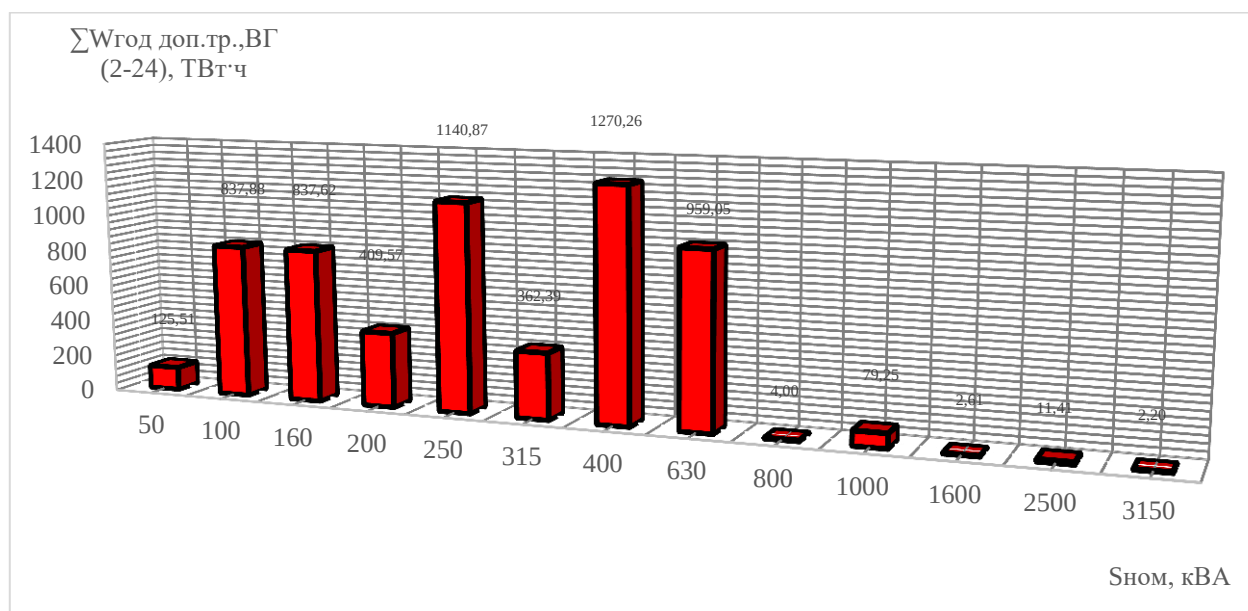
Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии TTR – А Ao – 10%Ak ECO+P с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл.6.

По результатам расчета на рис. 17 и 18 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии **TTR – А Ao – 10%Ak ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.

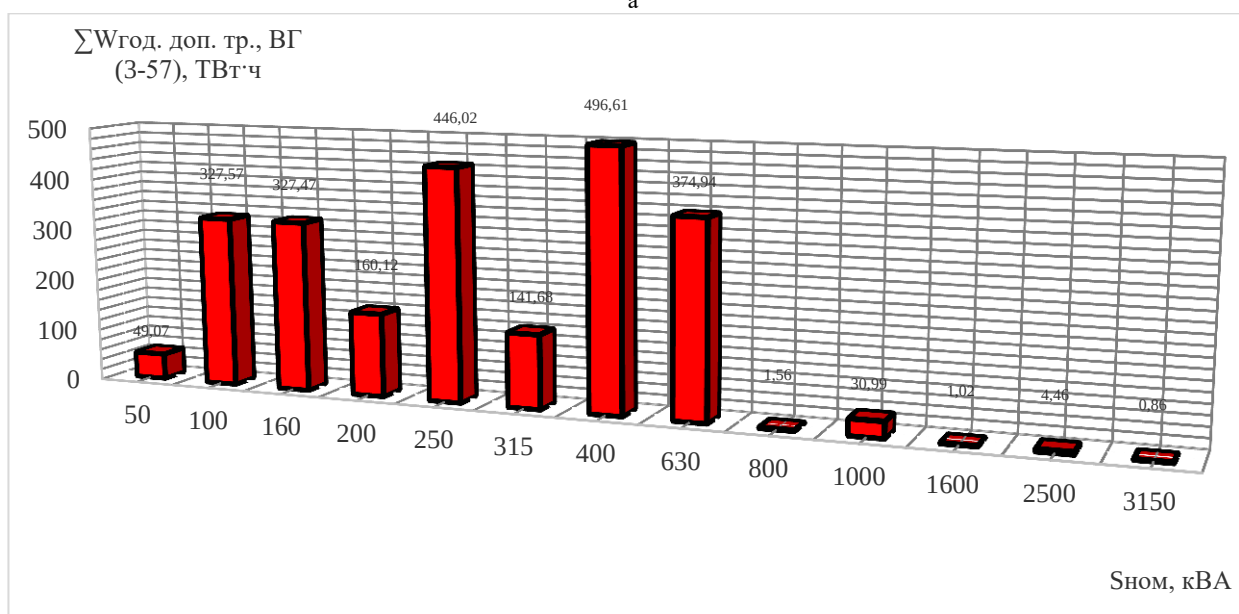
Таблица 6

Число и номинальная мощность СТ сочетанием напряжений 10/0,4 кВ серии TTR – А Ао – 10%Ак ЕСО+Р после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ

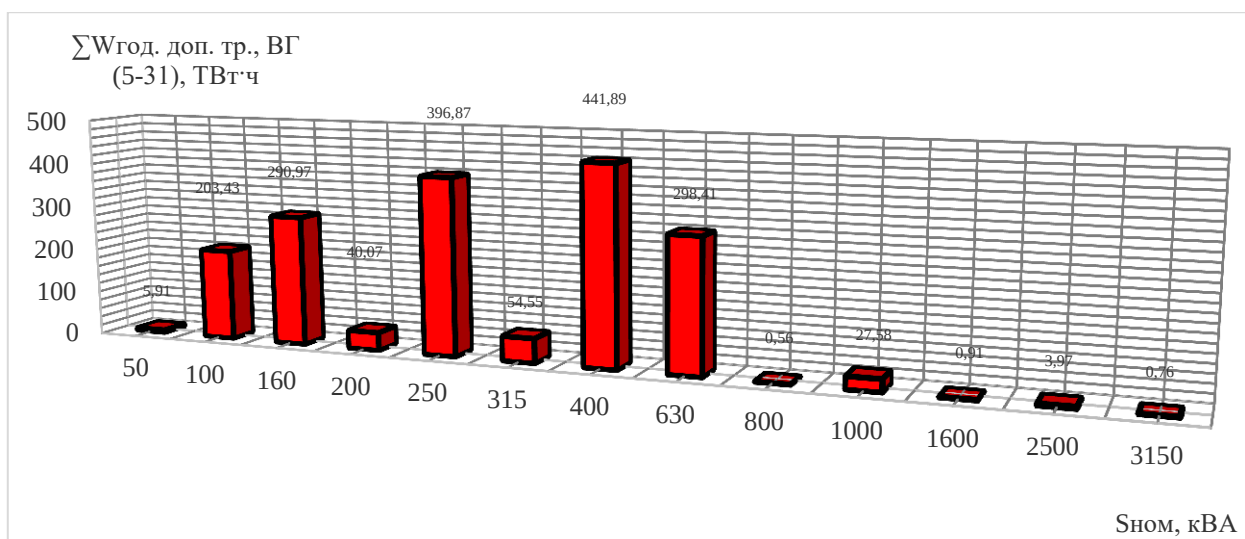
Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\sum S_{ном}$, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895



а



б



в

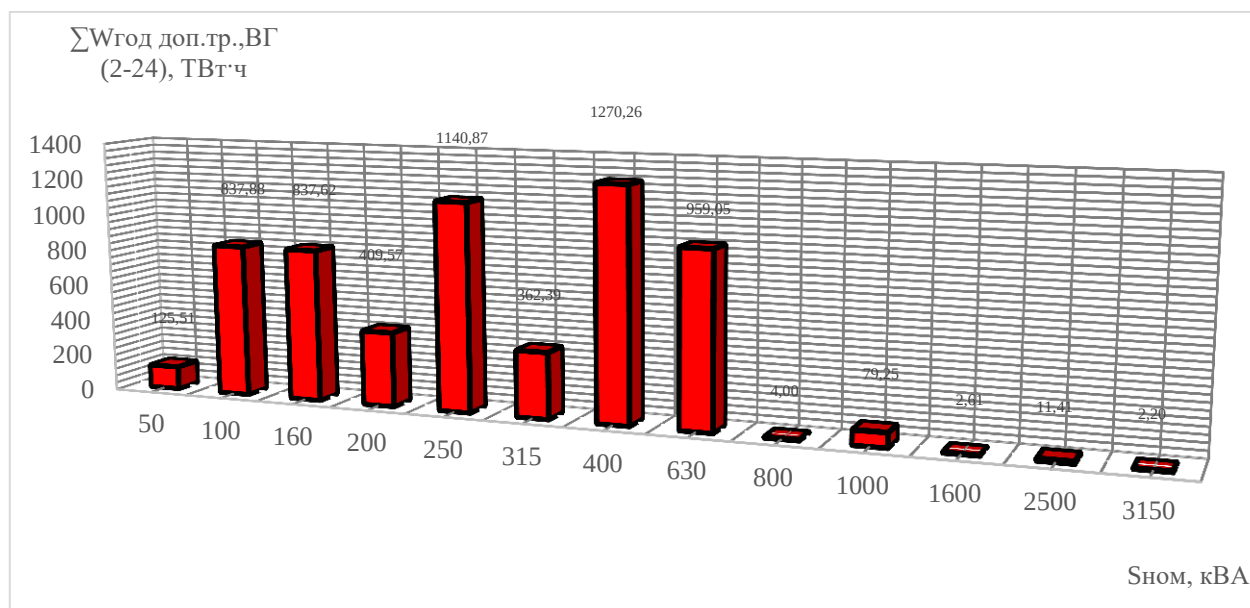
Рис. 17. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – A Ao – 10%Ak ECO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}}); \quad \text{б – гармоник, кратных трем } \sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}});$$

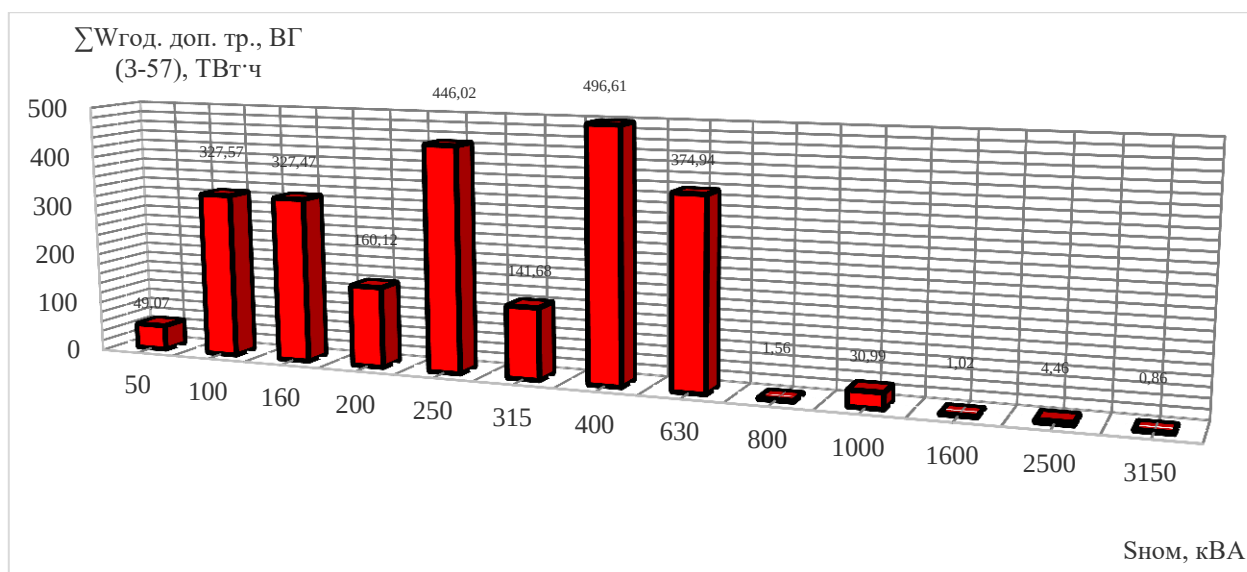
$$\text{в – гармоник обратной последовательности } \sum W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис.17, позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – A Ao – 10%Ak ECO+P** с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

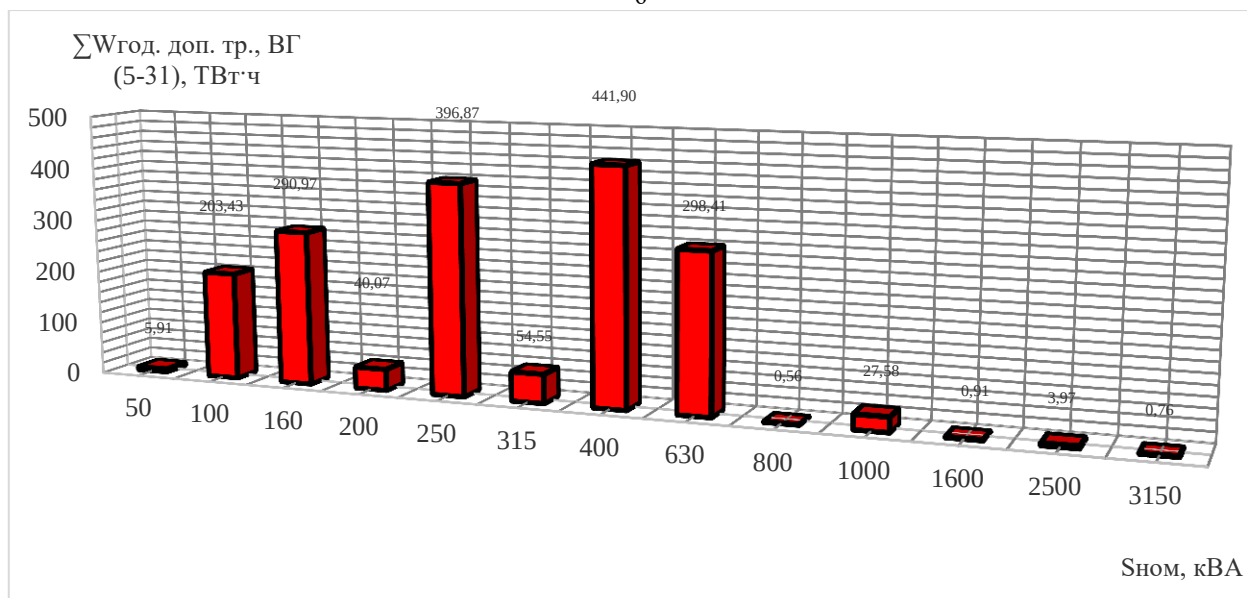
– четного спектра (2–24) возрастут в 10,6 раза;
 – кратных трем (3–57) возрастут в 4,1 раза;
 – обратной последовательности (5–31) возрастут в 3,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



6



в

Рис. 18. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – A Ao – 10%Ak ESO+P**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 10 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном}); \text{ б – гармоник, кратных трем } \sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном}); \text{ в – гармоник обратной}$$

$$\text{последовательности } \sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$$

Анализ рис. 18 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – A Ao – 10%Ak ESO+P** с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

– четного спектра (2–24) возрастут в 10,6 раза;

– кратных трем (3–57) возрастут в 4,1 раза;

– обратной последовательности (5–31) возрастут в 3,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 15. Техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс

напряжения 15 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – В Ao – 10%Ak ЕСО+Р [18]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии TTR – В Ao – 10% Ak ЕСО+Р с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50Гц и удовлетворяющие требованиям нормы ЕU № 548/2014 – Tier II [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 15 кВ следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ

сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии TTR – В Ao – 10%Ak ЕСО+Р номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии TTR – В Ao – 10%Ak ЕСО+Р с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл. 7.

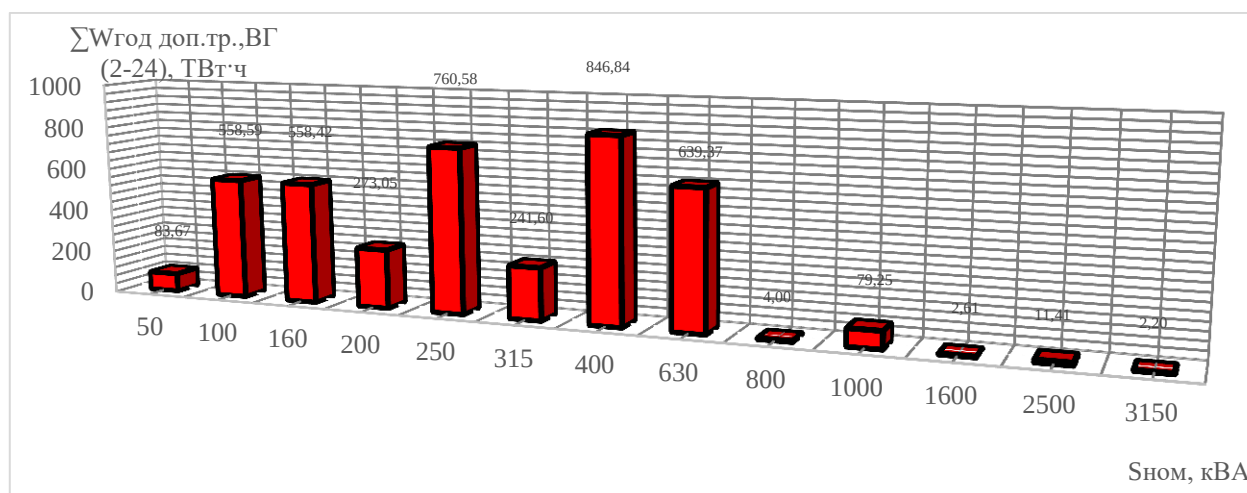
Таблица 7

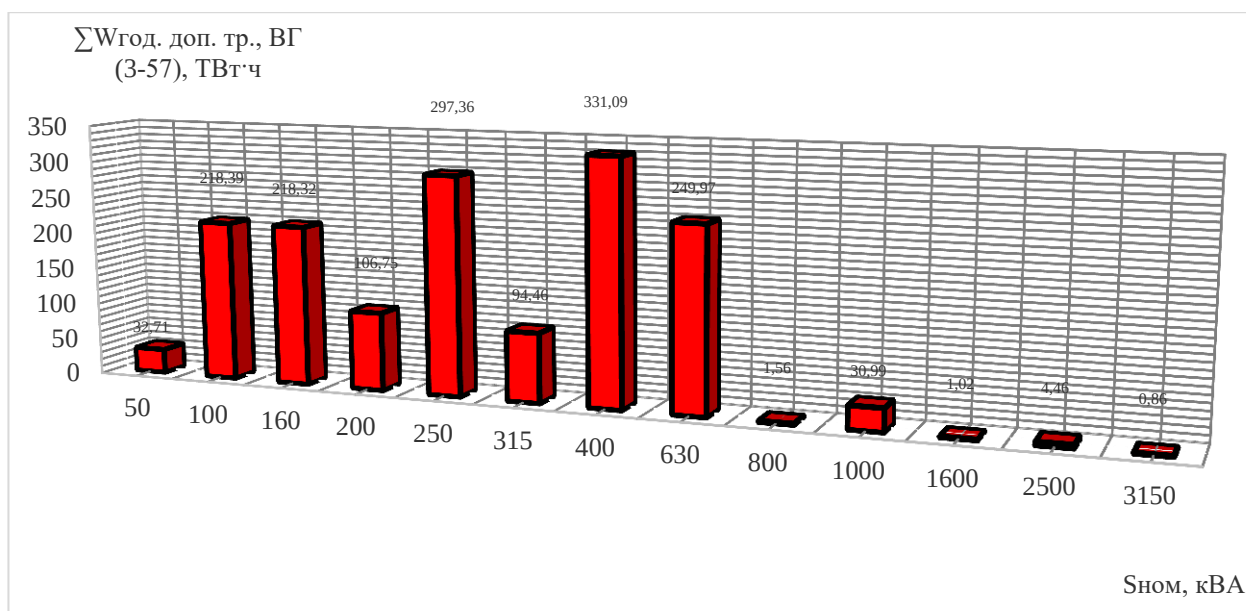
Число и номинальная мощность СТ сочетанием напряжений 15/0,4 кВ серии TTR – В Ao – 10%Ak ЕСО+Р после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ

Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\Sigma S_{ном}$, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895

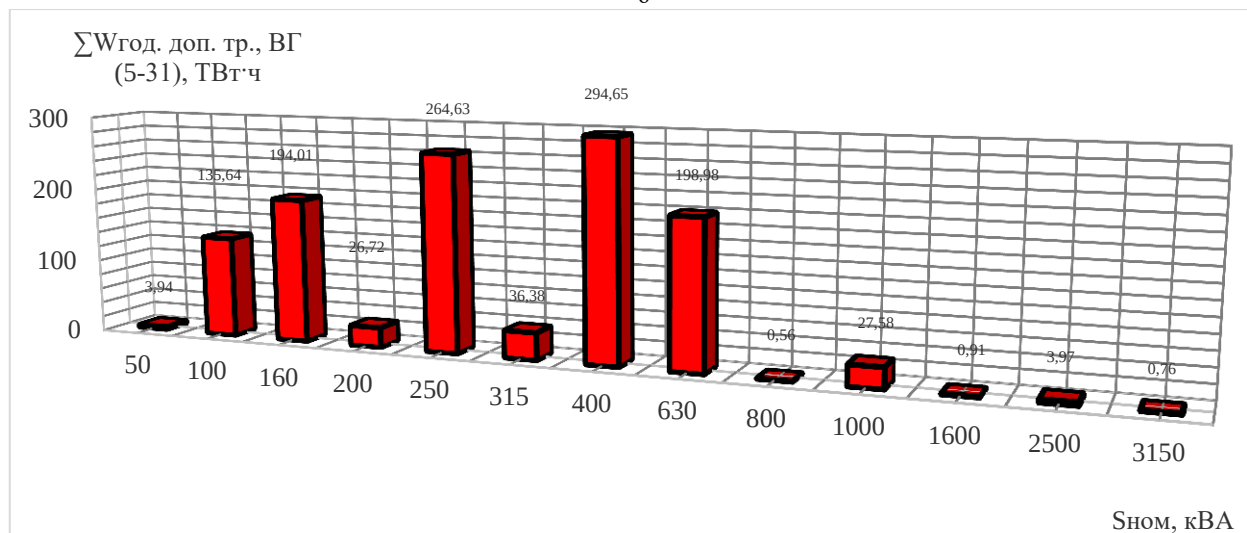
По результатам расчета на рис. 19 и 20 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения серии TTR – В Ao – 10%Ak ЕСО+Р, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на

класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\Sigma W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\Sigma W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\Sigma W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.





б



в

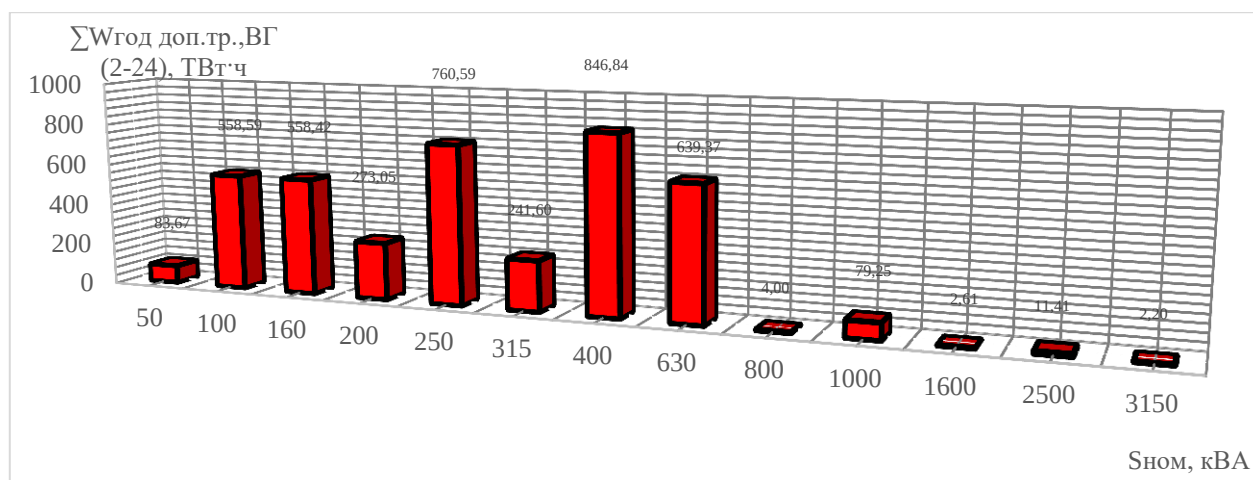
Рис. 19. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения, **серии ТТН – В Ао – 10%Ак ЕСО+Р**, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(2-24)} = f(S_{\text{ном}}); \text{ б – гармоник, кратных трем } \Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(3-57)} = f(S_{\text{ном}});$$

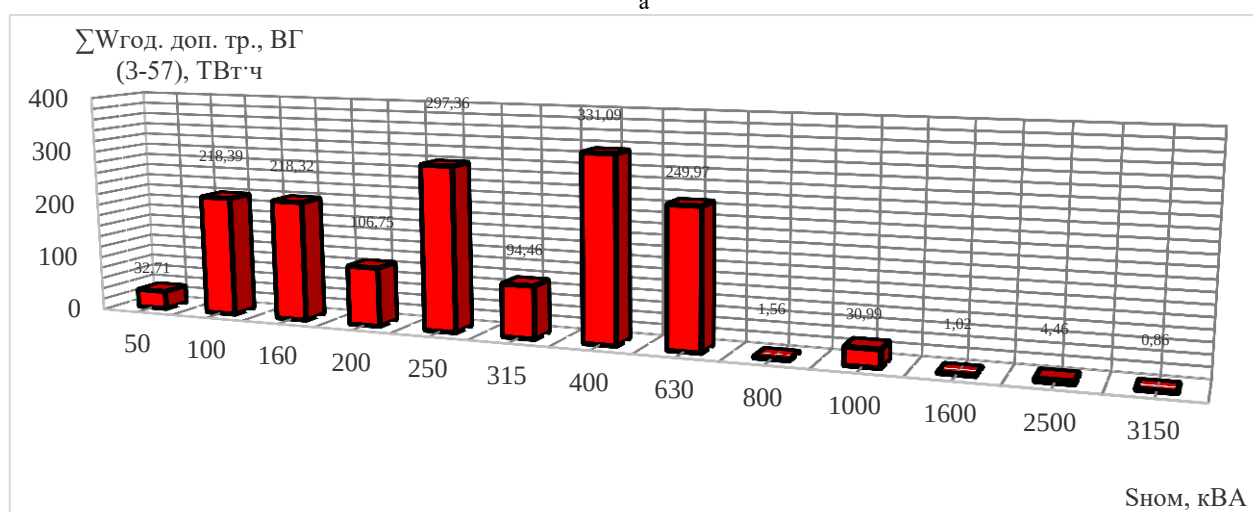
$$\text{в – гармоник обратной последовательности } \Sigma W_{\text{год. доп. тр.}}^{(5-31)} = f(S_{\text{ном}})$$

Анализ рис. 19 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии ТТН – В Ао – 10%Ак ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

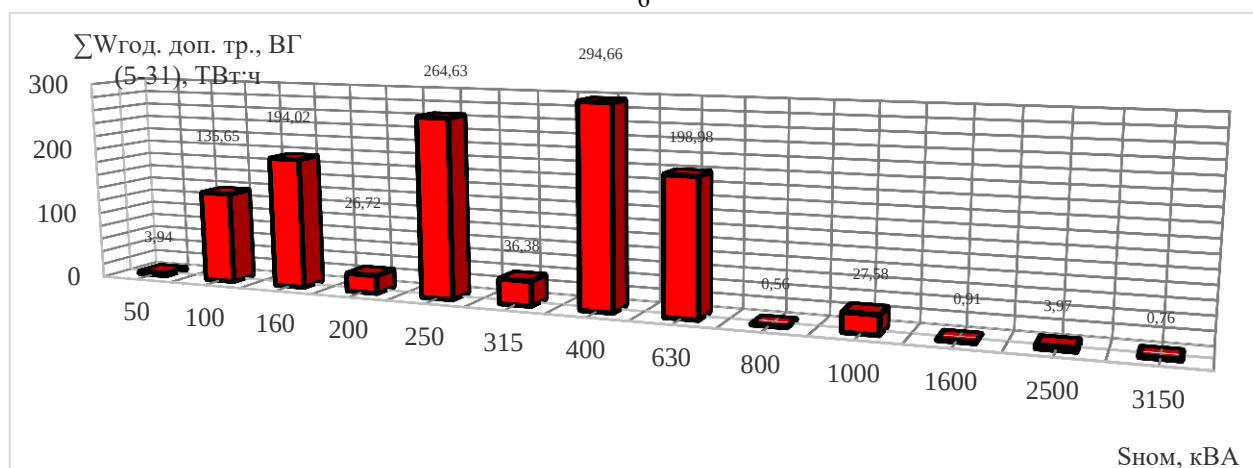
- четного спектра (2 – 24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31) возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 20. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения **серии ТТН – В Ао – 10%Ак ЕСО+Р**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 15 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном}); \text{ б – гармоник, кратных трем } \sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном}); \text{ в – гармоник обратной последовательности } \sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$$

Анализ рис. 20 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – В Ао – 10%Ак ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2 – 24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 16. Техническое переоснащение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р [18]

К установке принимаются двухобмоточные СТ серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р с литой изоляцией и с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ, рассчитанные на частоту питающей сети 50Гц и удовлетворяющие требованиям нормы ЕУ № 548/2014 – Tier II [18].

При модернизации существующих РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 20 кВ следует учесть, что компания SEA не выпускает СТ данной серии с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения номинальной мощностью 10; 16; 25; 40 и 63 кВА.

Поэтому осуществить замену существующих масляных двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ с указанным номиналом мощностей можно будет аналогичным количеством трансформаторов серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р номинальной мощностью 50 и 100 кВА.

Таким образом, количество и суммарная номинальная мощность СТ серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ в РЭС ГУП ЛНР «РСК» будут такими, как представлено в табл. 8.

Таблица 8

Число и номинальная мощность СТ сочетанием напряжений 20/0,4 кВ серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р после технического переоснащения РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ

Номинальная мощность СТ S ном, кВА	Всего СТ, штук	Суммарная номинальная мощность СТ, $\sum S_{ном}$, кВА
50	554	27700
100	3026	302600
160	2124	339840
200	921	184200
250	2229	557250
315	617	194355
400	1869	747600
630	900	567000
800	5	4000
1000	88	88000
1600	2	3200
2500	6	15000
3150	1	3150
Всего:	12342	3033895

По результатам расчета на рис. 21 и 22 представлены зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р, установленные при реализации плана по техническому переоснащению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на

класс напряжения 20 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3=0,7$ с учетом нормально допустимого и предельно допустимого значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник $\sum W_{год.доп.тр}^{(2-24)} = f(S_{ном})$; б – гармоник, кратных трем $\sum W_{год.доп.тр}^{(3-57)} = f(S_{ном})$; в – гармоник обратной последовательности $\sum W_{год.доп.тр}^{(5-31)} = f(S_{ном})$.

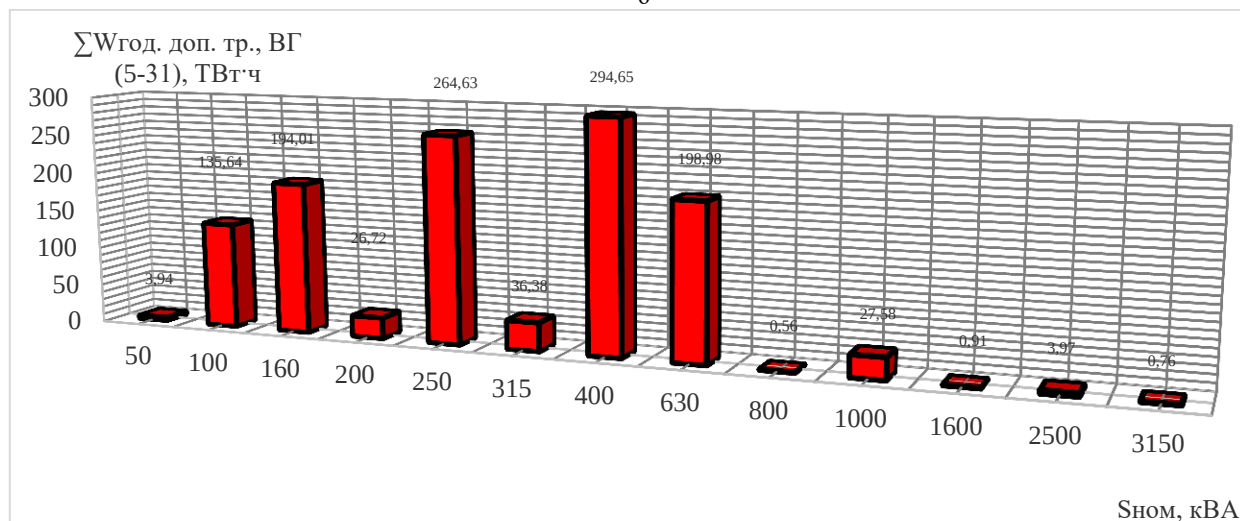
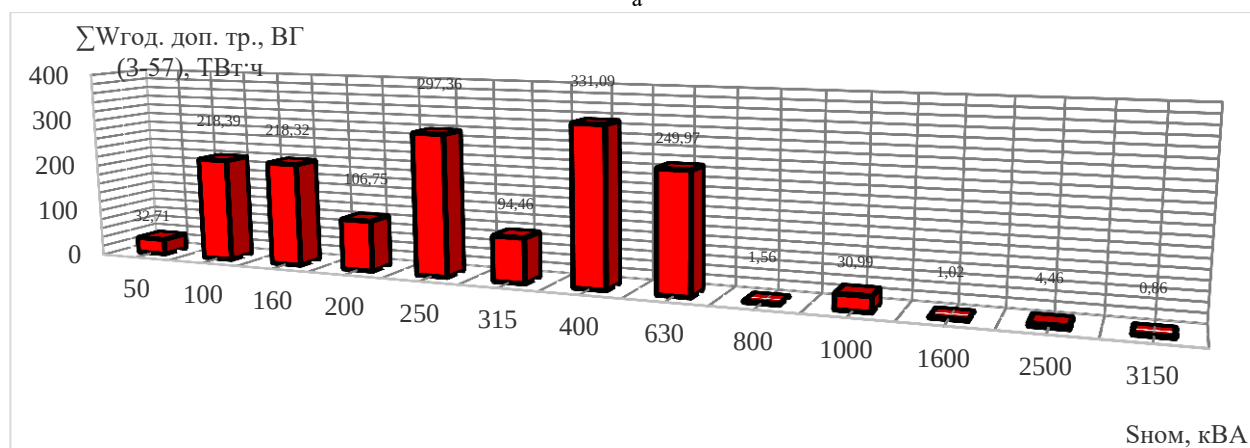
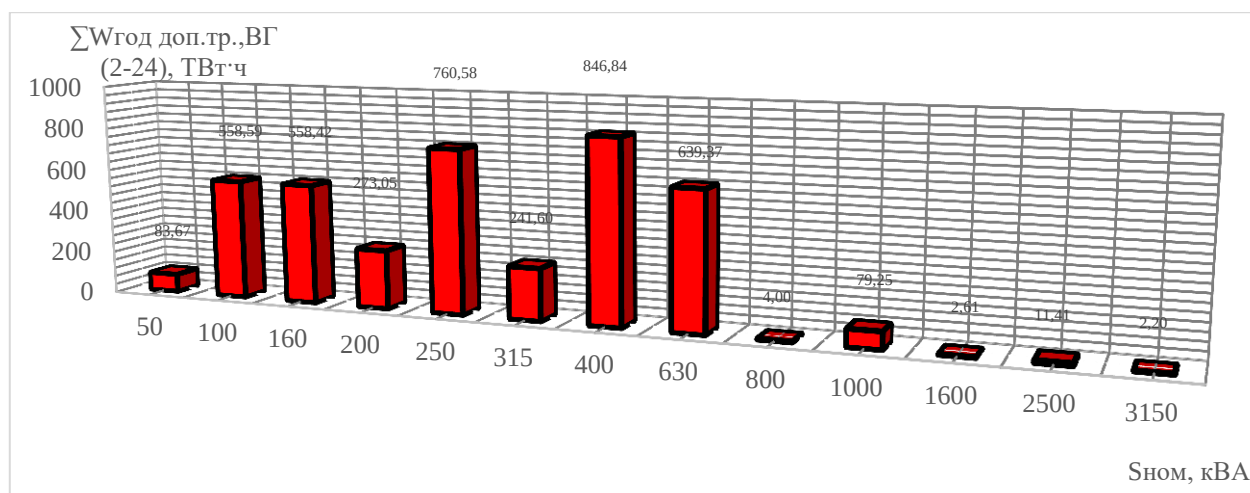
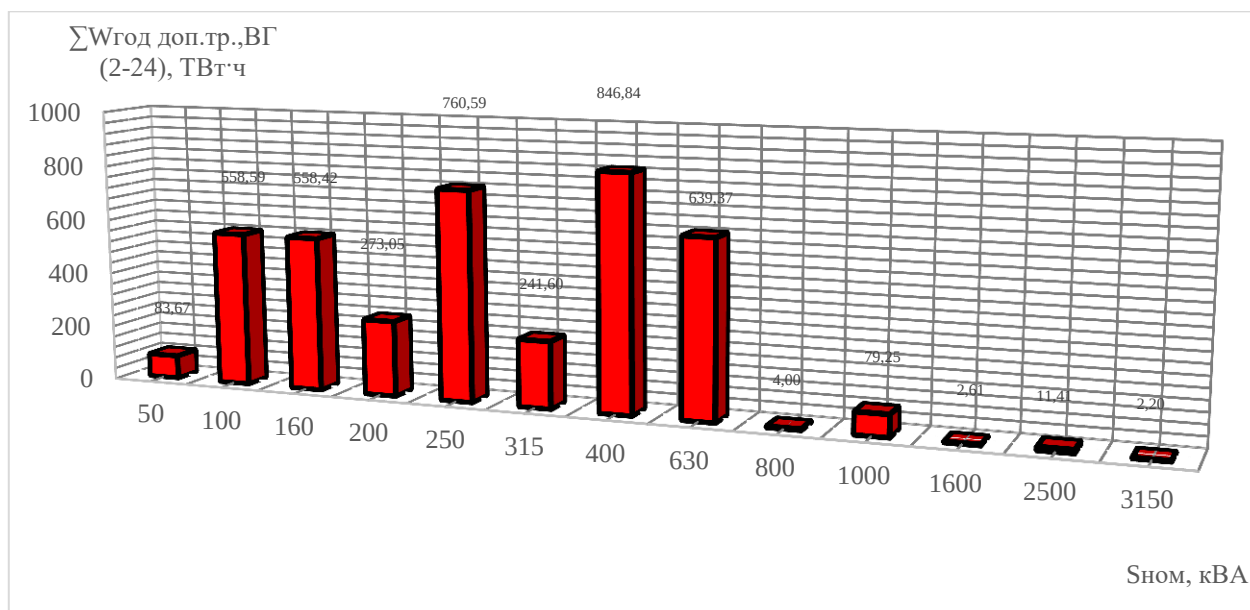


Рис. 21. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения **серии ТТН – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

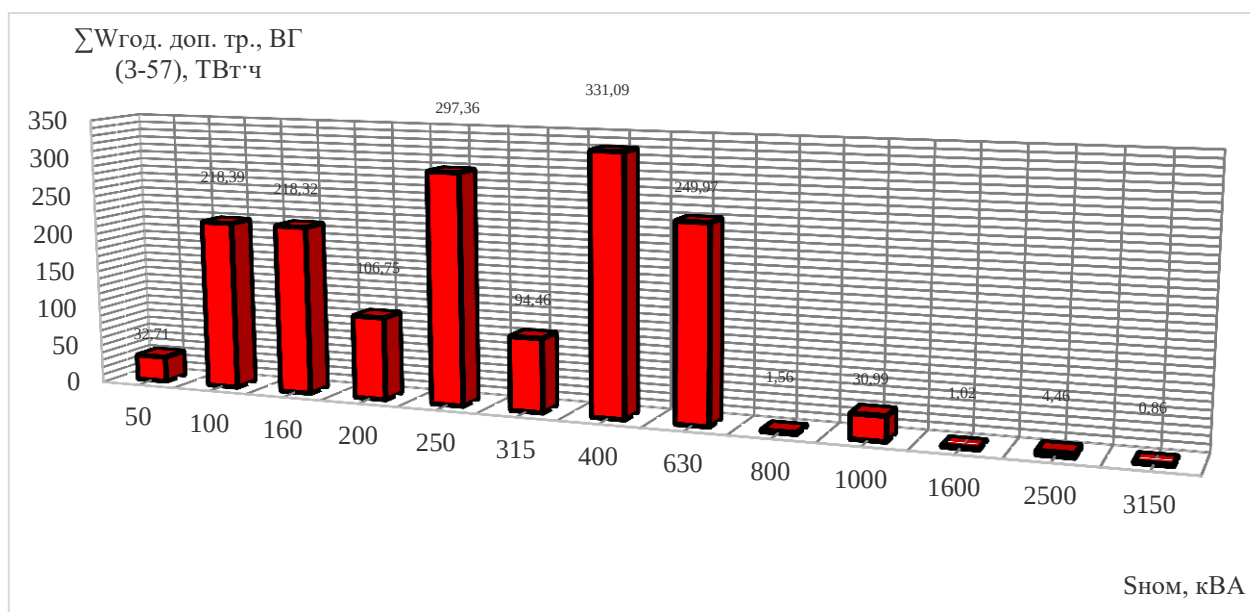
$$\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном}); \text{ б – гармоник, кратных трем } \sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном}); \text{ в – гармоник обратной последовательности } \sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$$

Анализ рис. 21 позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3=0,7$ и нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

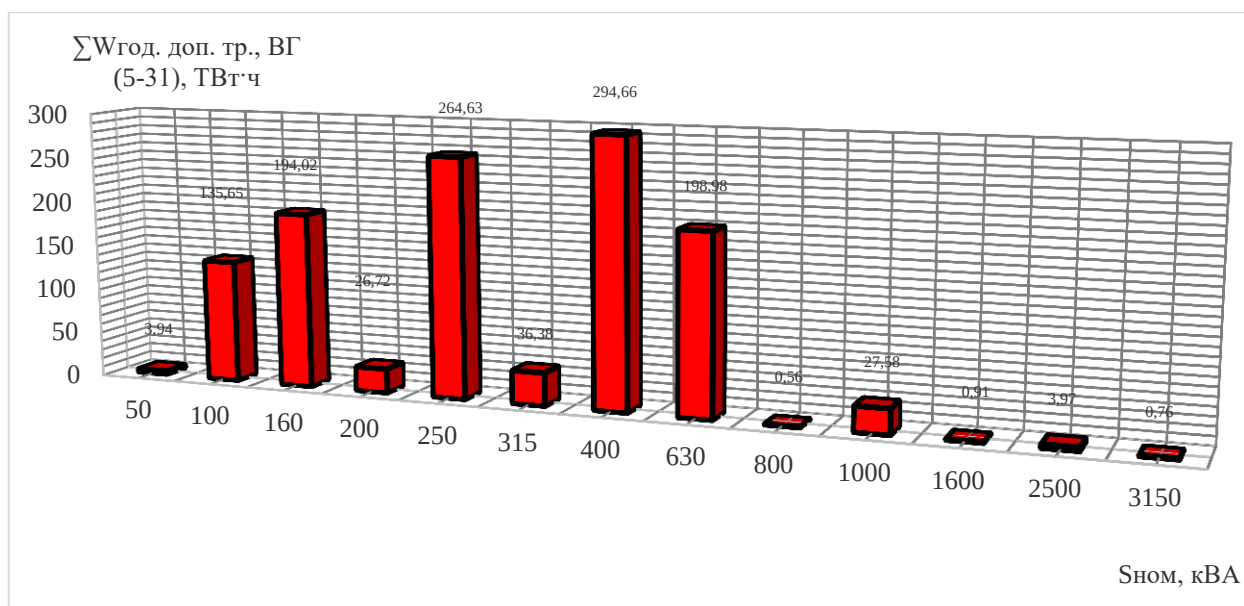
- четного спектра (2–24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3–57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31) возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].



а



б



в

Рис. 22. Зависимости распределения суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных действием спектра гармоник в токах намагничивания, фазных э.д.с и напряжений групп номинальной мощности двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения **серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р**, установленные при реализации плана по техническому перевооружению существующих РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 20 кВ, рассчитанные при нагрузке $K_3 = 0,7$ с учетом предельно допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для спектра: а – четных гармоник

$$\sum W_{год. доп. тр.}^{(2-24)} = f(S_{ном}); \text{ б – гармоник кратных трем } \sum W_{год. доп. тр.}^{(3-57)} = f(S_{ном});$$

$$\text{в – гармоник обратной последовательности } \sum W_{год. доп. тр.}^{(5-31)} = f(S_{ном})$$

Анализ рис. 22, позволяет сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности двухобмоточных СТ сухого исполнения **серии TTR – С Ао – 10%Ак ЕСО+Р** с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих при $K_3 = 0,7$ и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2 – 24) возрастут в 7,1 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 2,8 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 2,1 раза по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

Вариант 17. Техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» на класс напряжения 35 кВ с установкой двухобмоточных СТ сухого исполнения серии TTR – D Ао – 10%Ак ЕСО+Р [18]

Анализ технической информации, представленной в [18], позволил сделать заключение о том, что двухобмоточные СТ данной серии, выпускаемые на класс напряжения 35 кВ, имеют узкую линейку номинала мощности СТ от 160 до 3150 кВА, что не позволяет оптимально выполнить

замену существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжением 10(6)/0,4 кВ в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на двухобмоточные СТ с литой изоляцией при реализации плана по техническому перевооружению этой сети на классы напряжения 35 кВ. Тем самым делает невозможным дальнейшее техническое перевооружение РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» РФ на класс напряжения 35 кВ с заменой существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ на двухобмоточные **серии TTR – D Ао – 10%Ак ЕСО+Р** с напряжением 35/0,4 кВ.

Выводы: 1. В работе проведен глубокий обзор мирового потребления электрической энергии и крупносерийного производства СТ сухого исполнения с литой изоляцией, рассчитанные на классы напряжения 6; 10; 15; 20 и 35 кВ, номинальной мощностью до 25МВА, которые являются альтернативой масляным сухим трансформаторам, а также динамика роста глобальных выбросов углерода в окружающую среду от традиционной электроэнергетики.

Применение энергоэффективных двухобмоточных СТ с сухой изоляцией может существенно уменьшить потери активной электроэнергии в РЭС ГУП ЛНР «РСК» и ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», а также выброс парниковых газов в окружающую

среду от ТЭС при выработке электрической энергии.

2. Впервые произведен расчет суммарных годовых дополнительных потерь активной электроэнергии, образованных полным спектром высших гармоник в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с $K_3=0,70$ и 1,0, при нормально и предельно допустимом значении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

3. Установлено, что подстановка в формулу (1) значений коэффициентов, учитывающих нормально и предельно допустимые уровни искажения синусоидальности кривой напряжения, практически не оказывают существенного влияния на порождаемые этой формулой результаты потерь активной электроэнергии от влияния высших гармоник в двухобмоточных СТ сухого и масляного исполнения с сочетанием напряжений (6; 10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ номинальной мощностью до 4000 кВА. Результаты, полученные с применением формулы (1), требует уточнения, а сама формула – доработки.

4. Проведенный анализ позволил сделать заключение о том, что суммарные годовые потери активной электроэнергии в группах номинальной мощности существующих двухобмоточных масляных СТ с сочетанием напряжений 10(6)/0,4 кВ ГУП ЛНР «РСК», работающих с нагрузкой:

4.1. $K_3=0,70$ при нормально и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2 – 24) возрастут в 11,3 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 4,4 раза;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 3,9 раз по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потери электроэнергии;

4.2. $K_3=1,0$ и при нормально и предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения от действия гармоник:

- четного спектра (2 – 24) возрастут в 23,0 раза;
- кратных трем (3 – 57) возрастут в 9,0 раз;
- обратной последовательности (5–31)

возрастут в 8,0 раз по сравнению с суммарной величиной отпуска электрической энергии из ЕНЭС ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети», утвержденной в Приказе, и многократно превысят регламентируемый норматив потерь электроэнергии [19].

5. Установлено, что достичь минимального уровня дополнительных потерь активной электроэнергии до значения, нормируемого в [19] в РЭС-10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК», вызванных влиянием режима высших гармоник путем только

технического переоснащения этой РЭС на классы напряжения 10; 15; 20 и 35 кВ с установкой серийно выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью двухобмоточных СТ сухого исполнения, литой изоляцией и с сочетанием напряжений (10; 15; 20 и 35)/0,4 кВ, невозможно без применения специальных устройств.

6. Для снижения дополнительных потерь активной электроэнергии ниже регламентируемого значения в РЭС – 10(6) кВ ГУП ЛНР «РСК» и вредного воздействия углекислого газа на окружающую среду, вызванных влиянием режима высших гармоник, рекомендуются реализовать варианты технического переоснащения этой электросети на классы напряжения:

– 10 кВ с установкой двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 10/0,4 кВ сухого исполнения серии ТСЛ или ТСГЛ (ОАО «Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова», Республика Беларусь) с фильтрокомпенсирующими устройствами для подавления спектра высших гармоник;

– 15 кВ с установкой двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 15/0,4 кВ сухого исполнения серии ТТН – В АоАк ECO+P или ТТН – В Ао –10%Ак ECO+P (компании SEA, Италия) – чьи характеристики соответствуют требованиям этапов I и II Европейской Нормы 548/2014 с фильтрокомпенсирующими устройствами для подавления спектра высших гармоник;

– 20 кВ с установкой двухобмоточных СТ с сочетанием напряжений 20/0,4 кВ сухого исполнения серии ТТН – С АоАк ECO+P или ТТН – С Ао –10%Ак ECO+P (компании SEA, Италия), а также Green T.НЕ серии Zucchini (Legrang, Франция [4]) – чьи характеристики соответствуют требованиям этапов I и II Европейской Нормы 548/2014) с фильтрокомпенсирующими устройствами для подавления спектра высших гармоник.

7. При большом количестве искажающих нагрузок в протяженных РЭС ГУП ЛНР «РСК» рекомендуется централизованная нормализация режимов высших гармоник. Качество электроэнергии должно обеспечиваться в расчетном режиме при отключении любого элемента сети или фильтра. Для обеспечения совместной работы фильтров в РЭС ГУП ЛНР «РСК» необходимо использовать смещение резонансной частоты по отношению к частоте гармоники.

Л и т е р а т у р а

1. Новый атомный эксперт. Информационно-аналитическое издание, приложение к научному журналу «Атомная энергия» – №1(1) – май 2023 – 59 с.

2. Федеральный закон Российской Федерации от 27 декабря 2002 г. № 183-ФЗ «О техническом регулировании» //Российская газета. – 2002. – 31 декабря. № 245.

3. Федеральный закон Российской Федерации от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» //Российская газета. – 2003. – 1 апреля. – № 60.

4. Сухие трансформаторы с литой изоляцией для распределения и преобразования электроэнергии /для тяговых преобразователей и специальных решений [Электронный ресурс]: – URL: <http://www.youtube.com/LegrandtvRussia> (дата обращения 12.11.2023 года).

5. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с. – [ISBN 978 – 5 – 02 – 023320 –1].

6. Парсентьев, О.С. Качество электрической энергии: учебное пособие/ О.С. Парсентьев. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля; Донецк: ООО «НПП Фолиант», 2023. – 216 с. – [ISBN 978 – 5 – 6050290 – 2 –1].

7. Федосеев, А.М. Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.

8. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш.тех.учебн. заведений. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

9. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 582 с.

10. Сырцов, А.И. Расчет магнитных потерь в стали силовых трансформаторов с учетом несинусоидальности магнитной индукции / А.И. Сырцов, Д.В. Половинка, О.С. Парсентьев// Научный журнал Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля № 2(4), Ч.2 2017. С. 9 – 15.

11. Парсентьев, О.С. К вопросу снижения потерь электроэнергии от влияния высших гармоник в силовых трансформаторах и повышения технологичности распределительных электрических сетей Луганского региона Российской Федерации путем модернизации и перевода их на классы напряжения: 10; 15; 27,5 и 35 кВ/О.С. Парсентьев// Научный журнал Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля – № 3(69). – 2023. – С. 232 – 243.

12. Парсентьев, О.С. Анализ дополнительных потерь активной электроэнергии от высших гармоник в распределительных электрических сетях напряжением 6 – 10 кВ Луганского региона Российской Федерации после их технического переоснащения на классы напряжения: 15; 27,5 и 35 кВ/О.С. Парсентьев// Научный журнал Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля – № 2(68). – 2023. – С. 225 – 234.

13. Технические данные для трансформаторов с изоляцией из эпоксидной смолы, армированной стекловолокном, типа RESIBLOC®. Уникальная технология для особого применения [Электронный ресурс]: – URL: <http://new.abb.com/ru> (дата обращения 27.10.2023 года).

14. Распределительные трансформаторы Thrial/Трансформатор с литой изоляцией/Центр поддержки клиентов [Электронный ресурс]: – URL: www.shneider-electric.com (дата обращения 28.10.2023 года).

15. Трансформаторы средней мощности ELETTROMECCANICA COLOMBO/ Сухие силовые трансформаторы с литой изоляцией на напряжение 6;10; 20 и 35 кВ/ Официальный эксклюзивный дистрибьютор ООО «АЗБУКА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА» на территории России [Электронный ресурс]: – URL: www.azbukel.ru (дата обращения 29.10.2023 года).

16. Парсентьев, О.С. Снижение условно-постоянных потерь электроэнергии в распределительных

электрических сетях напряжением 10(6) кВ энергокомпаний Луганской Народной Республики путем модернизации и перевода их на классы напряжения 10; 20 и 35кВ с установкой трансформаторов сухого исполнения/ О.С. Парсентьев// Научный журнал Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля – № 8 (74). – 2023. – С. 166 – 202.

17. МЭТЗ имени В.И. Козлова/ Каталог/Трансформаторы силовые [Электронный ресурс]: – URL: <http://metz.by> (дата обращения 31.10.2023 года).

18. Компания SEA/ Каталог/Силовые распределительные трансформаторы [Электронный ресурс]: – URL: www.seatransformator.it (дата обращения 27.10.2023 года).

19. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2022 года за № 1272 «Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по единой национальной (общероссийской) электрической сети, осуществляемой публичным акционерным обществом «Федеральная сетевая компания – Россети» с использованием объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих публичному акционерному обществу «Федеральная сетевая компания – Россети» на праве собственности или ином законном основании, на 2023 год» [Электронный ресурс]: – URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/23795/195515#:~:text=yf> (дата обращения 03.10.2023 года).

Parsentev O.S.

ON THE ISSUE OF MINIMIZING OF ACTIVE ELECTRICITY AND GREENHOUSE EMISSIONS INTO THE ENVIRONMENT FROM HIGHER HARMONIC MODES IN ELEMENTS OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS WITH A VOLTAGE OF 10(6) KV OF THE SUE LPR «REPUBLICAN GRID COMPANY» OF RUSSIA DURING THE TRANSPORTATION OF ELECTRICITY TO CONSUMERS

The work analyzes the dynamics of global demand for electricity in 2023 – 2025, as well as domestic and foreign large-scale production of step-down double-winding power transformers of dry design with cast insulation.

It has been established that the forced increase in electricity consumption in the Middle East will lead to an increase in greenhouse gas emissions above the standard value regulated by the UN Intergovernmental Panel on Climate Change.

Using the example of potential savings when operating an energy-efficient transformer, it has been proven that over 20 years of operation, a power transformer (PT) of the Green T.HE series will provide a reduction in greenhouse gas emissions by more than 112 tons. The influence of higher harmonic modes on losses of active electricity in existing two-winding oil-fired transformers with a voltage combination of 10(6)/0, 4 kV (PT – 10(6)/0, 4 kV), operated in electrical distribution networks with a voltage of 10(6) kV (DEN – 10(6) kV) SUE LPR “Republican Grid Company”. Based on the results of the analysis, it was established that the losses of active electricity in the existing 10(6)/0, 4 kV power lines in the SUE LPR “Republican Grid Company” from the influence of the higher harmonics mode with normal and maximum permissible distortion of the sinusoidality of the voltage curve are many times higher than the normalized value of electricity losses, approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 30, 2022 No 1272.

To minimize losses of active electricity and emissions of greenhouse gases into the environment from the influence of higher harmonic modes, the work provides options for the technical re-equipment of existing distribution networks - 10(6) kV SUE LPR "Republican Grid Company" to voltage classes: 10; 15; 20 and 35 kV with the installation of energy-efficient two-winding dry-type transformers of domestic and foreign production.

Based on the results of the review, voltage classes and a series of energy-efficient dry-type CTs of domestic and foreign production, ensuring a low level of electricity losses and greenhouse gas emissions, were recommended for the DEN of the SUE LPR "RGC".

Measures are proposed aimed at minimizing and suppressing additional losses of active electricity from the influence of the harmonic spectrum.

Key words: two-winding power transformer, greenhouse gas, dry version, cast insulation, voltage class, electrical distribution networks, technical re-equipment, non-sinusoidal voltage, spectrum of higher harmonics, losses of active electricity, combination of voltages, no-load losses, short-

circuit voltage, short-circuit losses short circuits, centralized park, unified national (all-Russian) electrical networks, inrush of magnetizing current.

Парсентьев Олег Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

E-mail: parsentevo@mail.ru

Parsentev Oleg Sergeevich, docent, candidate of technical science of the Department of «Electrical Power Engineering», «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Гутько Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.11.2023

УДК 004. 921

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРА-ОПЕРАТОРА ЧПУ**Перевозчиков В. А.****DEVELOPMENT OF A TEACHING METHOD CNC OPERATOR ENGINEER****Perevozchikov V. A.**

Статья посвящена актуальной теме разработки эффективных методов обучения инженера-оператора ЧПУ, а также отражены результаты работы по созданию эскиза и до изготовления готовой детали. Такой метод обучения дает формирование пространственных представлений о геометрических телах, из которых состоят инженерные конструкции, а также умение анализировать инженерные изделия и связанную с их построением технику с точки зрения геометрического моделирования.

Ключевые слова: CAD CAM CAE, модуль ЧПУ «Токарная обработка», 3D принтер, фрезерный станок.

В настоящее время технология создания деталей или изделий все более зависит от используемых станков с ЧПУ, что в свою очередь развивает CAD/ CAM/ CAE системы [1].

Одновременно с развитием данных систем САПР уменьшается время подготовки производства [2].

Следовательно, в учебном процессе необходимо уделить усиленное внимание этому направлению САПР, что является актуальным [3].

Целью статьи является разработка методики обучения инженера оператора ЧПУ на основе использования CAD/ CAM/ CAE систем и систем моделирования.

Прежде всего для студентов необходимо изучить программу Компас 3D в которой первоначально создается эскиз (рис. 1). Затем по эскизу строим объемную модель (рис. 2) и получаем набор конструкторской и технической документации [5].

Построение модели детали это процесс, который зависит от сложности самой конфигурации модели и набора функций, которые используются для ее создания.

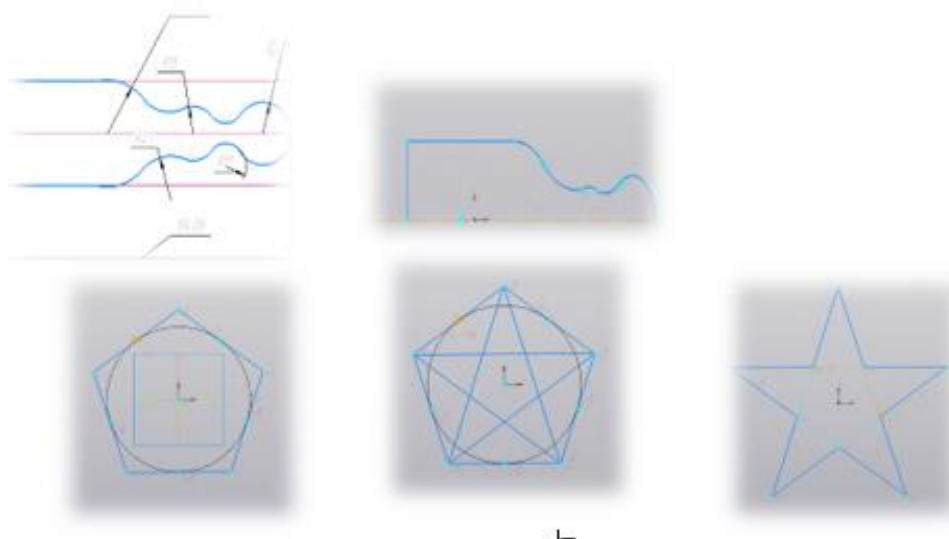


Рис. 1. Эскиз детали

Также по полученной модели можно выполнить статические и динамические исследования, которые намного сокращают время, идущее для создания нового образца изделия.

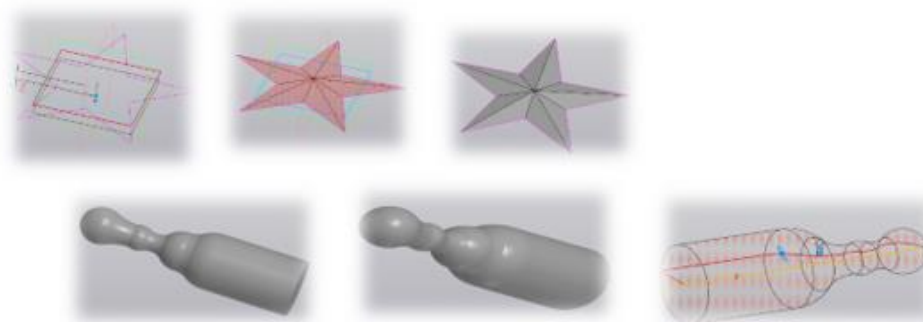


Рис. 2. Поэтапная объемная модель

Конечной целью построения чертежа является передача необходимой информации для изготовления изделия на станке с ЧПУ.

Разработать визуальный объемный образ желаемого объекта возможно, используя 3D-моделирование. С помощью трёхмерной графики можно создать точную копию конкретного предмета и разработать новое, даже нереальное представление еще не существовавшего объекта [4].

В КОМПАС-3D проводим создание двух типов моделей: деталь и сборку, а также проводим их расчет.

В состав АРМ FEM Компас-3D входят инструменты подготовки деталей и сборок к расчёту, а также задания граничных условий и нагрузок. После чего рассчитываются конечно-элементные сетки и постпроцессор. Этот функциональный набор позволяет смоделировать твердотельный объект и комплексно проанализировать поведение расчётной модели при различных воздействиях с точки зрения статике, собственных частот, устойчивости и теплового нагружения [5].

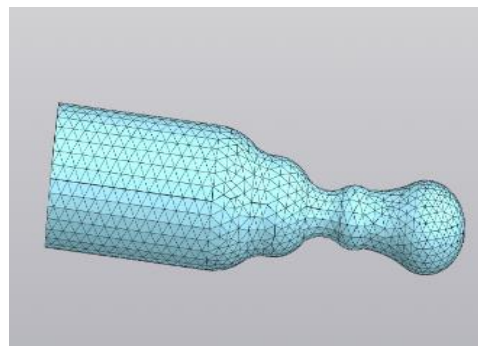
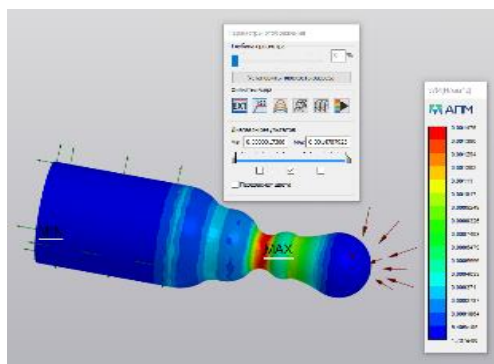


Рис. 3. КЭ-сетки и результат нагружения

Для создания конечно-элементной модели объекта в АРМ FEM предусмотрена функция генерации КЭ-сетки, которая производит разбиение объекта с заданным шагом. Для сложной расчетной модели проводим адаптивное разбиение. Чтобы результат процесса был более качественным, генератор КЭ-сетки автоматически меняем на величину шага разбиения.

После этого полученную модель передаем в интегрированное в программу приложение модуля ЧПУ «Токарная обработка». Модуль предназначен для автоматизации разработки управляющих программ для токарных станков с ЧПУ (рис. 4).

Основные функциональные возможности данного приложения можно описать следующими положениями:

- построение контуров обработки визуальным выбором поверхностей или эскизов;
- автоматическим расчетом траекторий, полученных полностью ассоциативными с элементами 3D-модели;
- генерацией управляющей программы в промежуточном коде на основе стандарта ISO;
- конвертацией управляющей программы в коды конкретной системы ЧПУ с помощью постпроцессоров;
- визуализацией обработки в окне системы КОМПАС-3D с имитацией удаления материала и контролем процесса обработки [6].

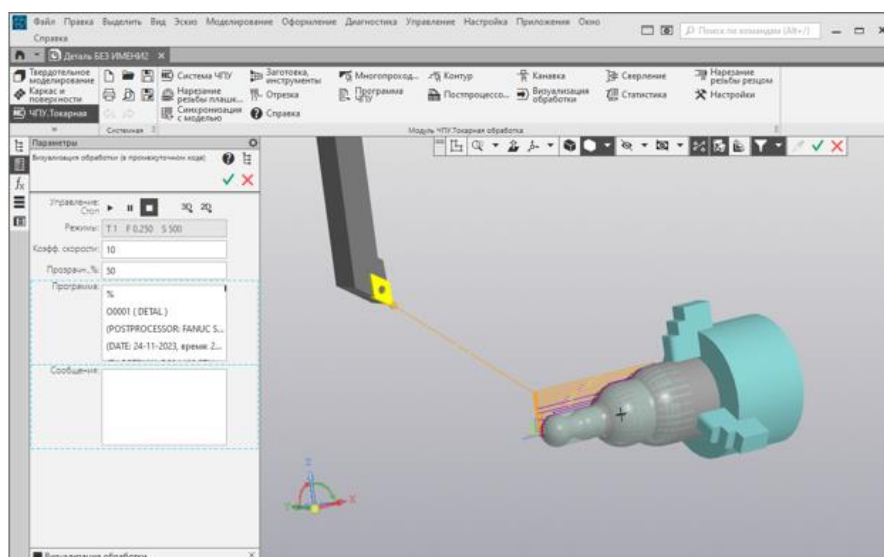


Рис. 4. Приложение модуля ЧПУ «Токарная обработка»

Для визуализации созданной детали и получения сопряжения с другими деталями полученную модель печатаем в программе CURA (рис. 5) для 3D-печати.

Особенности 3D-печати состоят в мощном механизме слайсинга с открытым исходным кодом и интегрированным рабочим процессом, который состоит в простоте его использования.

Фирмой UltiMaker разработано программное обеспечение как для опытного, так и для начинающего пользователя 3D-принтера.

Возможность принтера позволяет печатать несколькими видами (PLA, PETG, ABS, TPU) пластика, из которых выбираем наиболее дешевый PLA пластик. Устанавливаем диапазон температур до 215 °C, что полностью покрывает потребности печати PLA и его модификации (обычно не выше 240 °C).

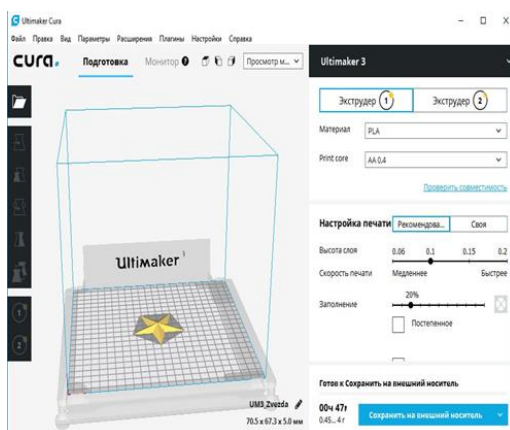


Рис. 5. Внешний вид программы CURA

Следующим этапом методики обучения является редактирование G-кода управляющей программы, полученной в приложении модуля «Токарная обработка».

G-код – это язык программирования, который используется для управления станком с ЧПУ (числовым программным управлением). G-код указывает станку, какое движение выполнить, сколько материала удалить и т.д.

Перед тем как начать создавать G-код, необходимо ввести данные, это позволит программе работать более эффективно и создать точный G-код.

Для получения управляющей программы выбираем пункт «G-код» в меню «Инструменты». Запускается окно, в котором необходимо выбрать настройки для G-кода и нажать кнопку «Создать».

После создания G-кода экспортируем его в формате, который может быть использован на станке. Для экспорта выбираем пункт «Экспорт» на

панели инструментов и формат файла, в котором сохраняем G-код.

Заключительным этапом редактирования управляющей программы является отработка G-кода на симуляторе, например, для токарного станка (рис. 6).

Симулятор токарного станка с ЧПУ – мультимедийное приложение, предназначенное для базового ознакомления начинающих специалистов с принципами программирования операций токарной обработки деталей с использованием стандартного (ISO) G-кода. В симуляторе реализована поддержка токарных циклов Fanuc (система кодов A).



Рис. 6. Симулятор токарного станка с ЧПУ

Полученную, отредактированную в симуляторе управляющую программу передаем на токарный станок с ЧПУ для изготовления детали, например, учебный CNC 3018 PRO (рис. 7), либо на любой промышленный станок.

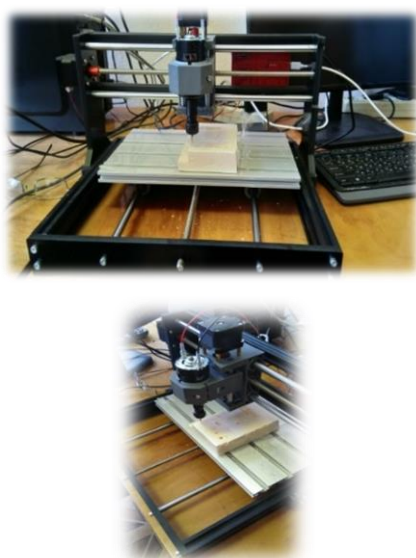


Рис. 7. Фрезерный станок CNC 3018 PRO

Программа для работы станка CNC 3018 PRO основана на системе координат числового программного управления по осям X, Y, Z и позволяет провести выбор:

- типа и скорости обработки;
- инструмента и параметров обработки;
- материала и размера заготовки.

Для этого необходимо выполнить следующие операции:

- определить начала координат по осям XY;
- определить высоты перемещения по оси Z;
- сохранить готовую модель с помощью управляющей программы grbl Control (формирование G-кода).

Выводы. На основе разработанного метода обучения можно сделать следующие выводы:

1. Уменьшено на 60% время, затраченное на составление управляющей программы для исполнения ее на станке с ЧПУ.
2. Получена возможность корректировки полученной модели на 3D-принтере.
3. Освоена визуализация отработок программ с помощью имеющихся симуляторов фрезерного и токарного станков и передачи скорректированных управляющих программ на станок с ЧПУ.

Литература

1. Большаков В. П., Тозик В. Т., Чагина А. В. Инженерная и компьютерная графика: учебник для ВУЗов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012 — 288 с.
2. Ефремов Г. В., Ньюкалова С. И. Инженерная и компьютерная графика на базе графических систем: учебное пособие. — Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2014 — 256 с.
3. ГОСТ 2.305-2008. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Изображения виды, разрезы, сечения (с Поправкой). <http://docs.cntd.ru>
4. КОМПАС-3D. Система трёхмерного моделирования. <https://ascon.ru>
5. Мороз О.Н., Сименко Е.В., Судариков А.Е. Инженерная и компьютерная графика в системе КОМПАС 2-D: учебное пособие ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017 г. 98 с.
6. Горельская Ю.В., Садовская Е.А. 3D-моделирование в среде КОМПАС: Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Компьютерная графика». — Оренбург: РИК ГОУ ОГУ, 2004. — 30 с.

Perevozchikov V. A. DEVELOPMENT OF A TEACHING METHOD CNC OPERATOR ENGINEER

The article is devoted to the current topic of developing effective methods for training a CNC operator engineer, and also reflects the results from creating a sketch to manufacturing the finished part. This teaching method provides the formation of spatial ideas about the geometric bodies that make up engineering structures. As well as the ability to analyze engineering products and the technology associated with their construction from the point of view of geometric modeling.

Key words: CAD CAM CAE, CNC module "Turning", 3D printer, milling machine.

Перевозчиков Вадим Александрович аспирант кафедры «Станки Инструменты и Инженерная Графика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Perevozchikov Vadim, a postgraduate student of the Department of Machine Tools and Engineering Graphics «LSU named after V. Dahl».

Рецензент: Витренко Владимир Алексеевич, д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Технологии машиностроения и инженерного консалтинга» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 15.12.2023

УДК 621.313.33.07

КВАЗИЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Половинка Д. В., Ивлев М. Н., Рублева Ю. В.

QUASI-FREQUENCY-PHASE CONTROL OF THE ROTATIONAL SPEED OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Polovinka D. V., Ivlev M. N., Rubleva Yu. V.

Предложен способ регулирования скорости вращения асинхронных двигателей ниже номинальной, кратной целым числам, за счет переворачивания соответствующих полуволн питающего синусоидального напряжения. За счет использования фазового метода регулирования напряжения этот способ позволяет выдерживать постоянным соотношение между частотой и напряжением источника питания. Разработана принципиальная электрическая схема, реализующая квазичастотный способ, и предложены расчетные формулы для определения момента времени фазового угла t_α от скорости вращения асинхронных двигателей (рис. 4), [6].

Ключевые слова: асинхронный двигатель (АД), частотное регулирование, синусоидальное напряжение, квазичастотное регулирование, электрические потери, фазовый угол.

Введение. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей (АД) необходимо для многих технологических процессов. Например, АД используются в качестве привода в вытяжных вентиляторах на котельных, и в зависимости от интенсивности сжигания топлива необходимо регулировать величину тяги в вытяжных каналах, т.е. скорость асинхронного двигателя.

Существуют следующие способы регулирования скорости вращения АД: изменение числа пар полюсов, понижение напряжения, реостатное регулирование (только для АД с фазным ротором), частотное регулирование. Понижение напряжения является неэффективным, поскольку снижение напряжения влечет за собой снижение жесткости механической характеристики, и используется такой способ для регулирования скорости вращения приводов с вентиляторной нагрузкой. Реостатное регулирование скорости вращения АД используется только для двигателей с фазным ротором, а реализующий этот способ электропривод имеет низкий КПД. Эти два способа

позволяют регулировать скорость АД только вниз от номинальной. Частотный способ регулирования скорости АД позволяет изменять ее как вниз, так и вверх от номинальной. Однако реализовать такой способ не всегда представляется возможным, поскольку он дорогостоящий из-за наличия управляемого выпрямителя, автономного инвертора, который должен работать в режимах принудительной, искусственной и естественной коммутации [1, 2, 3]. Для АД большой мощности решить проблемы с коммутацией довольно сложно из-за большого значения индуктивности.

1. Понижение частоты питающего синусоидального напряжения АД путем частичной перекоммутации полуволн. Суть предлагаемого способа заключается в том, чтобы понижать частоту питающего синусоидального напряжения в целое число раз путем переворачивания относительно оси времени t некоторых полуволн синусоиды. Например, при понижении частоты в два раза, как показано на рис. 1, необходимо в первом периоде T_1 перевернуть отрицательную полуволну, а во втором T_2 перевернуть положительную полуволну. Далее, в нечетных периодах все повторяется, как в первом периоде T_1 , а в четных периодах – как во втором периоде T_2 . В результате в нечетных периодах будет две положительные полуволны, а в четных – две отрицательные.

Из осциллограммы на рис. 1 видно, что 1-я гармоника напряжения на обмотке фазы АД имеет период:

$$T_{1/2} = T_1 + T_2. \quad (1)$$

Таким образом, частота питающего напряжения АД снижается в два раза по сравнению с частотой сети, соответственно, и скорость вращения снижается в два раза:

При этом должно сохраняться соотношение:

$$\frac{U}{f} = const, \quad (2)$$

где U – действующее напряжение на обмотке АД, f – частота 1-й гармоники питающего напряжения АД [4].

Выполнение соотношения (2) реализуется путем использования фазового метода регулирования действующего напряжения питания, т.е. управляющие вентили открываются с запаздыванием на фазовый угол α и,

соответственно, на обмотку АД подается лишь заштрихованная часть полувольты синусоиды (рис. 1). Благодаря чему, площадь полувольты 1-й гармоники напряжения питания с пониженной частотой сможет быть равна сумме площадей заштрихованных частей двух полувольт сетевого напряжения, и условие (2) будет выполняться.

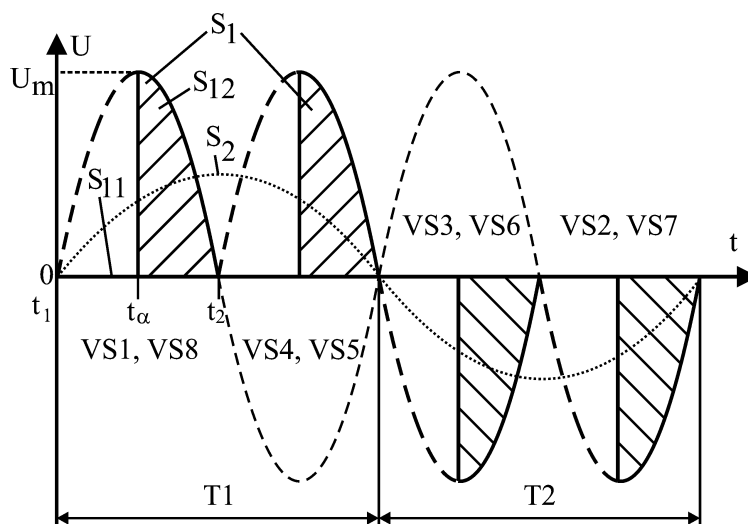


Рис. 1. Осциллограмма понижения частоты питающего напряжения в 2 раза

При понижении же частоты в три раза, как показано на рис. 2, необходимо в первом периоде $T1$ перевернуть отрицательную полувольту, второй период $T2$ оставить без изменений, а в третьем $T3$ перевернуть положительную полувольту. Далее все повторяется в цикле: в 4, 7, 10, ... периодах полувольты переворачиваются, как в 1-м периоде, 5, 8, 11, ... периоды остаются без изменений, как во 2-ом периоде, а в периодах 6, 9, 12, ... полувольты переворачиваются, как в 3-м периоде.

Из осциллограммы на рис. 2 видно, что 1-я

гармоника напряжения на обмотке фазы АД имеет период:

$$T_{1/3} = T_1 + T_2 + T_3. \quad (3)$$

Таким образом, частота питающего напряжения АД снижается в три раза по отношению к частоте сети.

При этом также должно сохраняться соотношение (2).

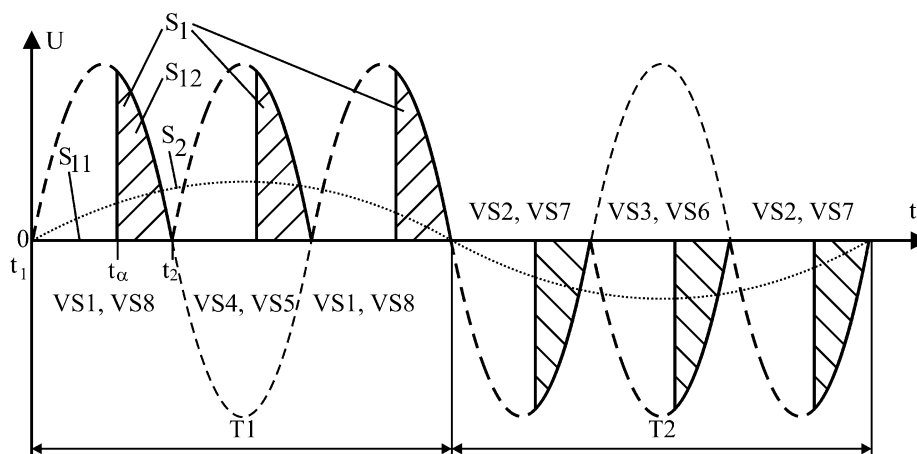


Рис. 2. Осциллограмма понижения частоты питающего напряжения в 3 раза

Предлагаемый способ позволяет регулировать скорость АД вниз от номинальной и в достаточно широких пределах, при этом частота питающего

напряжения АД будет кратной целому числу.

2. Схема и принцип работы квазичастотного преобразователя. Процесс

переворачивания полувольт синусоидального напряжения сети реализуется тиристорным квазичастотнофазовым преобразователем путем коммутации концов обмоток АД в определенный момент времени с соответствующей фазой или с нулевым проводом.

Обмотка статора АД соединяется одним концом через тиристорную или транзисторную группу вентилей (тиристоры или транзисторы) преобразователя по очереди с фазой и с нулевым проводом (однофазный или трехфазный двигатель, соединение «звезда») или с другой фазой

(трехфазный двигатель, соединение «треугольник»). Другой же конец обмотки АД также соединяется через другую группу вентилей (тиристоры или транзисторы) преобразователя по очереди с фазой и с нулевым проводом (однофазный или трехфазный двигатель, соединение «звезда») или с другой фазой (трехфазный двигатель, соединение «треугольник»), но в противофазе относительно первой группы вентилей преобразователя. К обмотке одной фазы АД должно быть подключено 8 тириستоров, как показано на рис. 3.

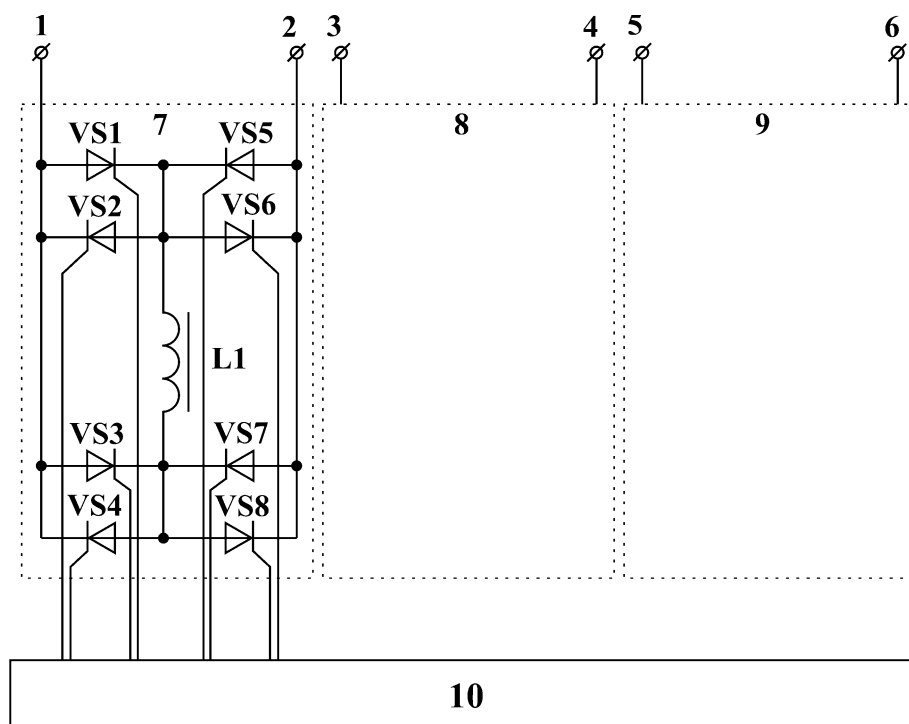


Рис. 3. Схема тиристорного квазичастотнофазового преобразователя

Параллельно встречно соединяются тиристоры VS1 с VS2, VS3 с VS4, VS5 с VS6 и VS7 с VS8. Начало обмотки фазы L1 соединено с тиристорами VS1, VS2, VS5 и VS6, а конец этой обмотки соединен с тиристорами VS3, VS4, VS7 и VS8. Не подсоединенные к обмотке фазы АД выводы тириستоров VS1, VS2, VS3 и VS4 соединяются с фазой сети питания 1, не подсоединенные к обмотке фазы АД выводы тиристоров VS5, VS6, VS7 и VS8 соединены с другой фазой сети питания (или нулевым проводом) 2. Блок 7 отображает соединение обмотки L1, тиристоров VS1-VS8, фазы 1 и второй фазы (нулевого провода) 2 для одной обмотки фазы асинхронного двигателя. Управляющие электроды тиристоров VS1-VS8 соединены со схемой управления 10. Другие две обмотки фаз асинхронного двигателя, которые содержатся в блоках 8 и 9 на рис. 3, соединены с другими фазами сети питания (или нулевым проводом) 3, 4, 5 и 6 через тиристоры, которые, так же как и обмотки фаз, не показаны в блоках 8 и 9.

Блоки 8 и 9 структурно такие же, как и блок 7, но соединены с другими фазами напряжения питания. Управляющие электроды всех тиристоров в блоках 8 и 9 также соединены со схемой управления 10.

При делении частоты питания на 2 схема на рис. 3 работает следующим образом. В первый период частоты сети, когда на фазу 1 приходит положительная полуволна, должны открываться тиристоры VS1 и VS8 (см. рис. 2), а когда приходит отрицательная полуволна, то должны открываться тиристоры VS4 и VS5. Таким образом, за первый период на начало обмотки фазы L1 будут проходить только положительные полувольты напряжения. Во второй период частоты сети, когда на фазу 1 приходит положительная полуволна, должны открываться VS3 и VS6 (см. рис. 2), а когда приходит отрицательная полуволна, то должны открываться VS2 и VS7. Таким образом, за этот период на начало обмотки фазы L1 будут проходить только отрицательные полувольты напряжения.

В схеме управления 10 реализовано фазовое

регулирование напряжения за счет изменения угла отпирания тиристоров α , который показан на рис. 1 и рис. 2. Изменив порядок включения тиристоров, можно добиться уменьшения частоты в 3 раза (см. рис. 2), а также в любое другое целое число раз.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОМЕНТА ВРЕМЕНИ ФАЗОВОГО УГЛА t_α ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТРЕБУЕМОЙ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ. Поскольку необходимо соблюдать соотношение (2), то для напряжения и частоты сети, а также частот и напряжений, уменьшенных в 2, 3, 4 и т.д., соотношение (2) запишется:

$$\frac{U_C}{f_C} = \frac{U_2}{f_2} = \frac{U_3}{f_3} = \dots = \frac{U_k}{f_k} = \text{const}, \quad (4)$$

где U_C, U_2, U_3, U_k – действующее сетевое напряжение, напряжения при делении частоты на 2, 3 и на k , f_C, f_2, f_3, f_k – сетевая частота, частоты 1-й гармоники, полученные при делении сетевой частоты на 2, 3 и на k [4,5].

Частота сети f_C и напряжение U_C являются известными величинами. Пониженные частоты $f_2, f_3, \dots, f_k$ можно определить через сетевую частоту f_C :

$$f_2 = \frac{f_C}{2}; \quad f_3 = \frac{f_C}{3}; \quad \dots; \quad f_k = \frac{f_C}{k}. \quad (5)$$

Отсюда получаем соотношение для определения требуемого напряжения при понижении частоты [3, 4]

$$U_2 = \frac{U_C}{2}; \quad U_3 = \frac{U_C}{3}; \quad \dots; \quad U_k = \frac{U_C}{k}. \quad (6)$$

При фазовом регулировании действующее напряжение U_k при понижении частоты определяется за полупериод как:

$$U_k = \frac{(t_\alpha - t_1) \cdot U_{C1} + (t_2 - t_\alpha) \cdot U_{C2}}{t_2 - t_1}, \quad (7)$$

где t_1, t_2 – время начала и окончания одного полупериода сетевой частоты, сек., t_α – момент времени начала отпирания тиристора при фазовом угле α , сек., U_{C1}, U_{C2} – действующее сетевое напряжение до и после отпирания тиристоров [6].

Принимаем $U_{C1} = \frac{S_{11}}{t_\alpha - t_1} = 0$, поскольку тиристоры на этом участке полупериода закрыты. Действующие напряжения U_{C2} определяются как:

$$U_{C2} = \frac{S_{12}}{t_2 - t_\alpha} = \frac{\int_{t_\alpha}^{t_2} U_{m2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt}{t_2 - t_\alpha}, \quad (8)$$

где S_{11} и S_{12} – криволинейные площади на участках от $t_1 = 0$ до t_α и от t_α до t_2 (рис. 1 и рис. 2).

Поскольку напряжение $U_{C1} = 0$ (рис. 1 и рис. 2), то действующее напряжение U_n при понижении частоты определяется за полупериод как

$$U_k = \frac{\int_{t_\alpha}^{t_2} U_{m2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt}{t_2 - t_1}. \quad (9)$$

Поскольку действующие напряжения сетевой и пониженной частот должны быть равны, то целесообразно перейти от соотношения равенства действующих напряжений к соотношению равенства площадей за полупериод пониженной частоты:

$$S_1 = k \cdot \int_{t_\alpha}^{t_2} U_{m2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt, \quad (10)$$

$$S_2 = \int_0^{k \cdot t_2} \frac{U_{m2}}{k} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{k} \cdot t) dt, \quad (11)$$

где S_1 – суммарная площадь, состоящая из k полупериодов сетевой частоты за полупериод пониженной частоты, S_2 – площадь полупериода пониженной частоты.

После интегрирования зависимости (10) и (11) примут вид:

$$S_1 = k \cdot U_{m2} \cdot \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_\alpha) - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2)}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (12)$$

$$S_2 = \frac{U_{m2}}{k} \cdot \frac{\cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{k} \cdot 0\right) - \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{k} \cdot t_2\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{k}}. \quad (13)$$

При выполнении условия равенства площадей S_1 и S_2 (рис. 1.) было получено выражение:

$$\begin{aligned} k \cdot U_{m2} \cdot \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_\alpha) - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2)}{2 \cdot \pi \cdot f} &= \\ &= U_{m2} \cdot \frac{1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2)}{2 \cdot \pi \cdot f} \end{aligned} \quad (14)$$

В результате из (14) получаем зависимость момента времени фазового угла t_α от частоты сети и коэффициента деления частоты:

$$t_{\alpha} = \frac{\arccos\left(\frac{1-n-\cos\left(2\cdot\pi\cdot t_2\cdot\frac{f}{k}\right)}{k}\right)}{2\cdot\pi\cdot f}. \quad (15)$$

Параметр t_2 непосредственно зависит от частоты сети f и может быть определен как:

$$t_2 = \frac{k}{2f}. \quad (16)$$

После преобразования (15) с учетом (16) была окончательно получена зависимость момента времени фазового угла t_{α} от частоты сети и коэффициента деления частоты:

$$t_{\alpha} = \frac{\arccos\left(\frac{2-k}{k}\right)}{2\cdot\pi\cdot f}. \quad (17)$$

Результаты вычислений при понижении частоты в 2 – 6 раз приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость момента времени фазового угла t_{α} от коэффициента деления частоты k при частоте сети $f = 50 \text{ Гц}$

k	2	3	4	5	6
$t_{\alpha x}$, сек.	0,005	0,006082	0,006667	0,007048	0,007323

Полученная аналитическая зависимость момента времени фазового угла t_{α} от сетевой частоты f и коэффициента понижения частоты k позволяет точно рассчитать момент времени фазового угла t_{α} , при котором будет соблюдаться соотношение (4).

4. Снижение потерь в асинхронных двигателях при квазичастотном регулировании скорости вращения. Понижение частоты питающего напряжения при квазичастотном регулировании скорости вращения АД приводит к тому, что форма напряжения, получаемая на выходе тиристорного преобразователя, не является синусоидальной, что приводит к дополнительным потерям в АД. Поэтому необходимо максимально приблизить форму выходного напряжения к синусоидальной.

При квазичастотном регулировании скорости вращения АД это возможно при снижении частоты питающего напряжения в 3 и более раз путем изменения величины фазового угла α в зависимости от порядкового номера полуволны сетевого напряжения и коэффициента понижения частоты k . Для этого один полупериод пониженной частоты необходимо разбить на k участков и вычислить площадь текущего участка полупериода пониженной частоты:

$$S_{2x} = \int_{(x-1)\cdot t_0}^{x\cdot t_0} \frac{U_m}{k} \cdot \sin\left(2\cdot\pi\cdot\frac{f}{k}\cdot t\right) dt. \quad (18)$$

С учетом времени одного полупериода сетевой частоты $t_0 = \frac{1}{2\cdot f}$ было получено выражение:

$$S_{2x} = \frac{U_m}{2\cdot\pi\cdot f} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi\cdot(x-1)}{k}\right) - \cos\left(\frac{\pi\cdot x}{k}\right) \right), \quad (19)$$

где x – текущий номер полуволны напряжения сетевой частоты.

Поскольку на каждом участке x полупериода пониженной частоты на вход тиристорного преобразователя поступает полуволна синусоидального напряжения сетевой частоты, то с учетом момента времени фазового угла t_{α} площадь одного полупериода сетевой частоты определяется:

$$S_{1x} = \int_{(x-1)\cdot t_0 + t_{\alpha}}^{x\cdot t_0} U_{m1} \cdot \sin(2\cdot\pi\cdot f\cdot t) dt. \quad (20)$$

Если учесть, что фазовый угол отсчитывается от момента перехода синусоидального напряжения сетевой частоты через 0, то выражение (20) принимает вид:

$$S_{1x} = \int_{t_{\alpha x}}^{t_0} U_{m1} \cdot \sin(2\cdot\pi\cdot f\cdot t) dt \quad (21)$$

или

$$S_{1x} = \frac{U_m}{2\cdot\pi\cdot f} \cdot \left(\cos(2\cdot\pi\cdot f\cdot t_{\alpha x}) + 1 \right). \quad (22)$$

Поскольку должно выполняться условие (4) и, соответственно, площадь S_{1x} должна быть равна площади S_{2x} , то, приравняв выражения (21) и (22), было получено выражение:

$$\begin{aligned} & \frac{U_m}{2\cdot\pi\cdot f} \cdot \left(\cos(2\cdot\pi\cdot f\cdot t_{\alpha x}) + 1 \right) = \\ & = \frac{U_m}{2\cdot\pi\cdot f} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi\cdot(x-1)}{k}\right) - \cos\left(\frac{\pi\cdot x}{k}\right) \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Из выражения (23) была получена формула

определения для участка x момента времени фазового угла $t_{\alpha x}$:

$$t_{\alpha x} = \frac{\arccos\left(\cos\left(\frac{\pi \cdot (x-1)}{k}\right) - \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{k}\right) - 1\right)}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (24)$$

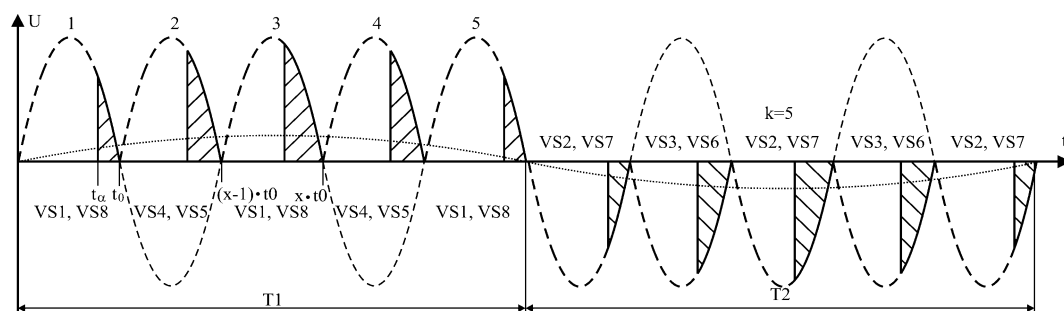


Рис. 4. Осциллограмма понижения частоты питающего напряжения в 5 раз

Таблица 2

Зависимость момента времени фазового угла $t_{\alpha x}$ от номера участка x при частоте сети $f = 50 \text{ Гц}$

x	1	2	3	4	5
$t_{\alpha x}$, сек.	0,008	0,006667	0,006248	0,006667	0,008

В результате получена форма напряжения на выходе тиристорного преобразователя более приближенная к синусоидальной форме, чем при постоянном моменте времени фазового угла $t_{\alpha x}$.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что:

1. Предложенный способ квазичастотного регулирования скорости вращения асинхронных двигателей позволяет дискретно регулировать скорость с постоянной жесткостью механической характеристики АД.

2. Получена аналитическая зависимость момента времени фазового угла t_{α} от сетевой частоты f и коэффициента понижения частоты k ,

при котором соблюдается соотношение $\frac{U}{f} = \text{const}$.

3. Предложен способ снижения электрических потерь в АД при квазичастотном регулировании скорости вращения АД за счет изменения момента времени фазового угла $t_{\alpha x}$ в зависимости от порядкового номера полуволны сетевого напряжения в течение полупериода пониженной частоты.

4. При понижении частоты питающего напряжения более чем в 3 раза получена аналитическая зависимость момента времени фазового угла $t_{\alpha x}$ от сетевой частоты f и коэффициента понижения частоты k , позволяющая максимально приблизить напряжение, поступающее на АД, по форме к синусоидальному, и тем самым снизить потери в АД.

Например, при понижении частоты питающего напряжения на АД в 5 раз (см. рис. 4), по формуле (4) рассчитаем моменты времени фазовых углов $t_{\alpha x}$ для $k=5$ участков при частоте сетевого напряжения $f = 50 \text{ Гц}$. Результаты приведены в табл. 2.

Л и т е р а т у р а

- 1.Алексеев, К.Б. Микроконтроллерное управление электроприводом / К.Б. Алексеев, К.А. Палагута. – М.: МГИУ, 2008. – 298 с.
- 2.Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. – 373 с.
- 3.Гульков, Г.И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г.И. Гульков. – Минск: Новое знание, 2007. – 394 с.
- 4.Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Альянс, 2014. – 496 с.
- 5.Кулик В.Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи. Учебное пособие В.Д. Кулик – СПб.: СПбГТУРП, 2010. – 90 с.
- 6.Невзлин Б.И., Половинка Д.В., Турчин А.И. Снижение потерь в трехфазных асинхронных двигателях, питаемых инверторами // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2007. – № 1(14). – С. 118-123.

Polovinka D.V., Ivlev M.N., Rubleva Yu.V.

QUASI-FREQUENCY-PHASE CONTROL OF THE ROTATIONAL SPEED OF ASYNCHRONOUS MOTORS

A method is proposed for regulating the rotation speed of asynchronous motors below the rated one, a multiple of integers, by inverting the corresponding half-waves of the supply sinusoidal voltage. By using the phase voltage regulation method, this method allows you to maintain a constant relationship between the frequency and voltage of the power source. A basic electrical circuit has been developed that implements the quasi-frequency method, and calculation formulas have been proposed for determining the time of the phase angle from the rotation speed of asynchronous motors (fig. 4), [6].

Keywords: *asynchronous motor (im), frequency regulation, sinusoidal voltage, quasi-frequency regulation, electrical losses, phase angle.*

Половинка Дмитрий Васильевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: polovinkadv@mail.ru

Ивлев Михаил Николаевич, аспирант кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: mi-ivlev218@yandex.ru

Рублева Юлия Викторовна, аспирант кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.
E-mail: ryuliya_87@rambler.ru

Polovinka Dmitry Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Electric Power Engineering" of the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.
E-mail: polovinkadv@mail.ru

Ivlev Mikhail Nikolaevich, postgraduate student of the Department of "Electromechanics" of the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.
E-mail: mi-ivlev218@yandex.ru

Rubleva Yulia Viktorovna, postgraduate student of the Department of "Electromechanics" of the «LSU named after V. Dahl», Lugansk.
E-mail: ryuliya_87@rambler.ru

Рецензент: Захарчук Александр Сидорович, д.т.н., проф. ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Статья подана: 15.10.2023г.

УДК 338.1

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ, ЕЕ СУЩНОСТЬ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

Протасов В. В., Черняева О. В., Черняев А. В.

COMPETITIVENESS OF THE ENTERPRISE, ITS ESSENCE AND METHODS OF ASSESSMENT

Protasov V. V., Chernyaeva O. V., Chernyaev A. V.

В данной статье проанализировано понятие «конкурентоспособность предприятия», ее сущность, виды и методы оценки. Сделан вывод, что существует множество подходов в определении сущности понятия «конкурентоспособность предприятия», а наиболее доступным и наглядным методом оценки конкурентоспособности является SWOT-анализ. Рассмотрен пример применения SWOT-анализа на условно взятом предприятии.

Ключевые слова: предприятие, конкурентоспособность, конкуренция, методы, оценка, анализ, SWOT-анализ.

Введение. В современном мире, когда конкуренция между субъектами рынка только нарастает, особенно важно обеспечить конкурентоспособность своей компании. Это возможно в первую очередь благодаря постоянному совершенствованию продукции и услуг, а также наличию высококвалифицированных специалистов. Эффективный маркетинг и умение быстро реагировать на изменения рынка также являются ключевыми моментами в увеличении конкурентоспособности компании. Все это помогает не только сохранить имидж на рынке, но и привлечь новых клиентов и удержать уже имеющихся.

Для достижения положительных результатов деятельности компании руководство организации должно точно оценивать ее конкурентоспособность, используя различные доступные на сегодняшний день методы. Научные исследования в этой области, как правило, ориентированы на изучение имеющегося опыта развития рынка. Поэтому необходимо создать комплексный подход к определению и оценке конкурентоспособности компании, чтобы выбрать наиболее реалистичные и эффективные стратегии.

Цель исследования заключается в анализе теоретических знаний сущности понятия «конкурентоспособность» и методов оценки конкурентоспособности предприятия для выявления перспективы его устойчивого развития.

Изложение основного материала. Понятие "конкурентоспособность" в экономике связано прежде всего с качеством продукции или услуг, присутствующих на одном из отраслевых рынков. Определить ее можно, сравнивая между собой различные группы товаров и услуг в масштабе страны или мирового сообщества.

Изучению вопросов конкурентоспособности посвятили свои научные труды многие отечественные и зарубежные исследователи, например, Н. В. Бонцевич, А.С. Головачев, В. А. Ежова, Яновский А. М., Р. А. Фатхутдинов, А. Смит, М. Портер и др.

В первую очередь рассматривая далее вопросы конкурентоспособности предприятия, необходимо проанализировать содержание и сущность понятий «конкуренция» и «конкурентоспособность предприятия».

В Федеральном законе от 26.07.2006 N 135-ФЗ «О защите конкуренции» говорится: «Конкуренция — соперничество хозяйствующих субъектов, при котором самостоятельными действиями каждого из них исключается или ограничивается возможность каждого из них в одностороннем порядке воздействовать на общие условия обращения товаров на соответствующем рынке» [1].

Приведем ниже определение сущности этих понятий рядом авторов научных работ, посвященных теме нашего исследования.

Н. В. Бонцевич утверждает, что «конкуренция — это борьба между различными экономическими субъектами за максимальное использование их ресурсов при соблюдении единых правил для всех участников» [2].

В работе А.С. Головачева говорится: «Конкуренция — это способность объекта противостоять конкуренции с аналогичным объектом» [4].

Г.М. Гукасян предлагает следующее определение: «Конкурентоспособность предприятия — это положение товаропроизводителя на

внутреннем и внешнем рынках, обусловленное экономическими, социальными и политическими факторами, отраженное через показатели (индикаторы), адекватно характеризующие такое состояние и его динамику» [5].

Р. А. Фатхутдинов дает следующее определение конкурентоспособности: «свойство объекта, характеризующее степенью реального и потенциального удовлетворения конкурентной потребности по сравнению с аналогичными объектами, представленными на данном рынке» [13]. В данном определении мы видим, что, конкурентное преимущество компании определяется исходя из первенства по удовлетворению потребностей потребителей.

Как мы видим, в приведенных выше определениях рассматриваемых понятий делается акцент на достижении первенства в удовлетворении потребностей рынка конкурирующих на нем товаров и услуг.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно констатировать, что конкурентоспособность – это способность рассматриваемого объекта более успешно удовлетворять конкретную потребность рынка товаров и услуг в сравнении с другими аналогичными объектами.

Далее рассмотрим составляющие конкурентоспособности.

В первую очередь это конкурентоспособность предпринимательской идеи, в основе которой лежит

четкое понимание в необходимости производимой продукции, а также способов удовлетворения потребительского спроса и потенциала компании.

Следующей составляющей единицей является конкурентоспособность предложения, именно она определяет конкурентное положение предприятия на рынке. Суть этой составляющей заключается в том, чтобы предложить потребителю наиболее привлекательные и выгодные условия приобретения товара, это может быть дополнительной упаковкой, услугами, рекламой, консультациями клиентов или функционалом доставки.

Третьей составляющей является конкурентоспособность имеющихся ресурсов (природных, финансовых, технологических, человеческих и других), определяющая долгосрочную конкурентоспособность предприятия за счет наличия собственных ресурсов.

И последняя составляющая – это конкурентоспособность управления предприятием, прежде всего грамотное использование высшим руководством имеющихся ресурсов, способность ведущих специалистов принимать важные стратегические решения, генерировать новые идеи в рамках потребительского спроса, а также организовывать рабочий процесс в целом [15].

Существуют различные виды конкурентоспособности предприятия, основные из них представлены в табл. 1.

Таблица 1

Виды конкурентоспособности [11]

Признак классификации	Виды конкурентоспособности
По уровню конкурентных отношений	- конкурентоспособность продукции (микроконкурентоспособность). Это способность товара соответствовать требованиям данного рынка в рассматриваемый период по сравнению с аналогичным конкурентом; - конкурентоспособность предприятия (мезоконкурентоспособность). В самом широком смысле его можно определить как способность добиваться собственных целей в условиях противодействия со стороны конкурентов; - макроконкурентоспособность
По отношению к рынку	- на мировом рынке; - региональном рынке
По подходу к управлению предприятием	- стратегическая конкурентоспособность; - фактическая конкурентоспособность; - сложившаяся конкурентоспособность конкретного объекта на конкретном рынке
По объекту	- научно-методических документов; - проектно-конструкторской документации; - производства; - выпускаемой продукции (выполняемой услуги); - менеджера; - инфраструктуры (внешней среды); - информации; - фирмы (организации, учреждения)

К основным методам оценки конкурентоспособности предприятия относятся следующие:

1. Методы продукта. Исходя из того, что оценка конкурентоспособности предприятия может производиться через оценку конкурентоспособности его продукции: чем выше конкурентоспособность продукции, тем выше конкурентоспособность предприятия.

2. Матричные методы заключаются в использовании матричной формы для отображения результатов оценки и анализа, а также в акценте на рыночной оценке предприятия, при котором предприятие рассматривается как совокупность нескольких бизнес-единиц. Среди матричных моделей в первую очередь необходимо выделить разработки компании Boston Consulting Group (Бостонская консалтинговая группа, далее также BCG), прославившейся матрицей «Относительная доля рынка» – «Темпы роста рынка». В основе методологии лежат две концепции: кривая опыта, согласно которой предприятия с большой долей рынка минимизируют свои издержки, и жизненный цикл продукта, согласно которой растущие сегменты рынка имеют наибольшие перспективы.

В контексте рассмотрения матричных методов нельзя не упомянуть о SWOT-матрице, также известной как SWOT-анализ. Этот метод был разработан К. Эндрюсом примерно в то же время, что и матрица БКГ, и стал результатом развития школы стратегического планирования. Классический SWOT-анализ предполагает выявление сильных и слабых сторон в деятельности компании, потенциальных внешних угроз и благоприятных возможностей, а также их оценку в сравнении со средними показателями по отрасли или в связи с данными стратегически важных конкурентов. Формой представления результатов такого анализа являлось составление таблиц (матриц) сильных сторон в деятельности фирмы (S), ее слабых сторон (W), потенциальных благоприятных возможностей (O) и внешних угроз (T) [8].

3. Операционные методы или методы, основанные на теории эффективной конкуренции.

Их теория оценки основана на том, что наиболее конкурентоспособными являются те предприятия, на которых лучше всего организована работа всех отделов и служб. Для оценки конкурентоспособности обследуемого предприятия операционным методом необходимо прежде всего установить перечень операций и показателей, имеющих значение для обеспечения конкурентоспособности.

4. Комбинированные методы оценивают конкурентоспособность предприятия, задавая не только достигнутую, но и потенциальную конкурентоспособность. Подход основан на утверждении, что конкурентоспособность хозяйствующего субъекта является интегральной величиной (сочетанием) текущей конкурентоспособности компании и ее конкурентного потенциала.

5. Динамический метод оценки конкурентоспособности предприятия основан на том, что основным средством получения прибыли в условиях рыночной экономики является реализация продукции и заключенной в ней добавленной стоимости. При этом производство и реализация продукции осуществляется за счет использования ограниченных экономических ресурсов. Отсюда следует, что прибыль в рыночной экономике достигается за счет эффективного использования экономических ресурсов [10].

Проанализировав вышеизложенные методы, мы пришли к выводу, что наиболее доступным и наглядным методом оценки конкурентоспособности предприятия является SWOT-анализ. Именно он позволяет выделить сильные и слабые стороны предприятия, а также внешние возможности и угрозы и их взаимосвязь, определенный ряд действий, необходимых для улучшения хозяйственной деятельности предприятия, что способствует росту уровня конкурентоспособности.

Рассмотрим на примере построение матрицы SWOT-анализа условно взятого предприятия.

В этой части SWOT-анализа проводится выявление основных параметров и группировка их в таблицу, которая называется матрицей SWOT-анализа (табл. 2).

Таблица 2

Матрица SWOT-анализа предприятия

	Сильные стороны	Слабые стороны
Внутренняя среда	-высокое качество выпускаемой продукции; -конкурентные цены; -оперативность решения клиентских задач; -рост прибыли от продаж	-зависимость от дебиторов; -слаборазвитая логистическая сеть; -недостаточное количество дочерних предприятий;
	Возможности	Угрозы
Внешняя среда	-развитие региональной и федеральной экономики; -создание новых рабочих мест; -получение Государственных субсидий и налоговых послаблений	-снижение платежеспособности населения; -рост цен на материалы; -невозможность покупки специализированного оборудования; -рост налогов и пошлин; -ужесточение государственного урегулирования; -обострение конкуренции на рынке

Первым шагом для проведения SWOT-анализа является анализ макросреды и ближайшего окружения компании. Второй этап – анализ внутренней среды предприятия, который состоит из показателей кадровой, организационной, производственной, финансовой и маркетинговой эффективности действующих структур предприятия. Третий этап заключается в формулировании сильных и слабых сторон компании. Четвертый этап – формулировка рыночных возможностей и угроз. И, наконец, на пятом этапе происходит сопоставление сильных и слабых сторон с рыночными возможностями и угрозами [9].

Здесь важно подчеркнуть, что SWOT-анализ необходимо рассматривать как первичный шаг для последующего маркетингового исследования.

Результаты исследования. Таким образом, можно сказать, что определение «конкурентоспособность предприятия» рассматривается учеными с трех позиций: первая характеризует внутреннюю и внешнюю деятельность предприятия, вторая оценивает продукцию, выпускаемую предприятием, а третья объединяет оценку товаров и производственной деятельности.

Наиболее доступным и наглядным методом оценки конкурентоспособности предприятия является SWOT-анализ.

На основании матрицы SWOT-анализа (табл. 2) можно сказать, что рассматриваемая компания имеет высокий потенциал развития, однако необходимо обратить внимание на финансовые ресурсы компании, источники финансирования или внешние инвестиции.

Выводы. Конкурентная среда становится все более сложной с точки зрения степени влияния всех факторов друг на друга и интенсивности конкуренции.

Как и любое другое научное понятие, «корпоративная конкурентоспособность» не имеет точного определения, а состоит из различных компонентов, предлагаемых разными учеными. Наиболее характерное различие подходов к трактовке «конкурентоспособности» состоит в следующем:

1) описание того, как работает компания, без упоминания продукта;

2) описывать только конкурентоспособность товара;

3) описание продукта и производственной деятельности компании.

В то же время на современном этапе развития экономических наук существует очень большое количество методов оценки конкурентоспособности, выбор их применения определяется целями и предпочтениями лица, принимающего решение (ЛПР), а также отрасли, к которой принадлежит оцениваемая организация.

Конкурентоспособность предприятия необходимо исследовать с учетом многообразия конкурентных отношений, возникающих на микро-,

мезо- и макроуровне экономики, внешних и внутренних факторов формирования конкурентных преимуществ.

Литература

1. Федеральный закон от 26.07.2006 N 135-ФЗ «О защите конкуренции» (ред. от 29.12.2022).
2. Бонцевич Н. В., Гуськова М. Ф., Немогай Н. В., Сорвиоров Б. В. Конкурентоспособность предприятия: учебное пособие. – Брянск: Дельта, 2012. – 399с.
3. Гапоненко А.Л. Стратегическое управление: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Менеджмент организации" / А. Л. Гапоненко, А. П. Панкрухин. – 3-е изд., стер. – Москва: Изд-во ОМЕГА-Л, 2008. – 463 с.
4. Головачев, А.С. Конкурентоспособность организации [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.С. Головачев. – Минск: Высш. шк., 2015. – 319 с.
5. Гукасян Г.М. Экономическая теория: учебник и практикум. – М.: Изд-во Юрайт, 2013. – 573 с.
6. Ежова, В. А. Конкурентоспособность организации: учебное пособие / В. А. Ежова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. – 38 с.
7. Конкуренция в экономике / А. Н. Васильев // Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004. – 2017.
8. Лазаренко А. А. Методы оценки конкурентоспособности // Молодой ученый. – 2014. – №1. – С. 374-377.
9. Мансуров, Р.Е. Об экономической сущности понятий «конкурентоспособность предприятия» и «управление конкурентоспособностью предприятия» // Маркетинг в России и за рубежом. – 2006. – № 2 (52).
10. Методики оценки конкурентоспособности предприятия: Учебно-методическое пособие / А.В. Васильева. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2012.
11. Мокроносов, А. Г. Конкуренция и конкурентоспособность: учебное пособие / А. Г. Мокроносов, И. Н. Маврина. – Екатеринбург: Изд-во Урал ун-та, 2014. – 194, [2] с.
12. Савина, М. А. Теоретические подходы к определению конкурентоспособности / М. А. Савина. – Текст: непосредственный // Молодой ученый, 2023. № 4 (451). – С. 401-403. – URL: <https://moluch.ru/archive/451/99486/> (дата обращения: 22.12.2023).
13. Фатхутдинов Р. А. Управление конкурентоспособностью организации: учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Эксмо, 2005.
14. Фасхиев, Х.А. Определение конкурентоспособности предприятия // Маркетинг в России и за рубежом. – 2009. – № 4 (72).
15. Яновский А. М. Конкурентоспособность товара и производителя продукции в системе рыночной экономики / А. М. Яновский // Стандарты и качество. – 1997. – № 2. – С. 43 - 44.

Protasov V.V., Chernyaeva O.V., Chernyaev A.V. COMPETITIVENESS OF THE ENTERPRISE, ITS ESSENCE AND EVALUATION METHODS

This article analyzes the concept of “competitiveness of an enterprise”, its essence, types and methods of assessment. It is concluded that there are many approaches to defining the essence of the concept of “competitiveness of an enterprise,”

and the most accessible and visual method for assessing the competitiveness of an enterprise is SWOT analysis. An example of the use of SWOT analysis at a specific enterprise is considered.

Key words: *enterprise, competitiveness, competition, methods, assessment, analysis, SWOT analysis.*

Протасов Виктор Владимирович, кандидат экономических наук, доцент кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.

E-mail: vvp3155@gmail.com

Черняева Ольга Васильевна, магистрант кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.

E-mail: chernyaeva_22@mail.ru

Черняев Артем Владимирович, магистрант кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский

государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.

E-mail: chernyaeva_22@mail.ru

Protasov Viktor Vladimirovich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Socio-Economic and Pedagogical Disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Chernyaeva Olga Vasilievna, master's student of the Department of Socio-economic and pedagogical disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Chernyaev Artem Vladimirovich, master's student of the Department of Socio-economic and pedagogical disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Рецензент: Авершин Андрей Александрович, кандидат психологических наук, доцент, директор Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.

Статья подана: 15.10.2023г.

УДК 332.12

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА НА ПРИМЕРЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Протасов В. В., Таран А. А.

ASSESSMENT AND ANALYSIS OF THE PRODUCTION POTENTIAL OF THE REGION USING THE EXAMPLE OF THE ROSTOV REGION

Protasov V. V., Taran A. A.

В статье рассматриваются актуальные аспекты развития производственного потенциала Ростовской области, а именно: проведен анализ производственного потенциала региона; определены основные факторы, влияющие на развитие производственного потенциала Ростовской области; выявлены недостатки в развитии производственного потенциала; приведены конкретные меры и инструменты для его улучшения; рассмотрены несколько перспективных направлений развития производственного сектора.

Ключевые слова: производственный потенциал, регион, анализ и оценка, факторы, отрасль, недостатки, экономический рост, направления развития.

Введение. Ростовская область, расположенная на юге России, играет значительную роль в экономике страны. Благодаря своему географическому положению она является ключевым узлом транспортных коммуникаций и имеет доступ к Черноморскому побережью. А также благодаря разнообразию природных ресурсов и качественному человеческому потенциалу Ростовская область имеет большой производственный потенциал [5].

Однако в условиях современной динамичной экономической ситуации необходимо постоянно развивать и совершенствовать производственные возможности региона.

Цель данного исследования заключается в выявлении основных факторов, которые могут оказать положительное влияние на развитие промышленности Ростовской области. Особое внимание будет уделено развитию инфраструктуры, внедрению новых технологий и привлечению инвестиций. Важно отметить, что успешное развитие производственного потенциала региона способно стимулировать экономический рост и повышение благосостояния населения.

Изложение основного материала. История развития производственного потенциала Ростовской области связана с ее географическим положением и наличием природных ресурсов.

В 1950–1970-х годах Ростовская область стала одним из лидеров по объему промышленного производства в СССР. Заводы железобетонных конструкций, пищевая промышленность, химическая и нефтеперерабатывающая отрасли развивались на интенсивном уровне.

Особый импульс развитию производственного потенциала Ростовской области придало строительство Таганрогского комбината радиотехнического машиностроения, который стал одним из крупнейших предприятий отрасли в стране. Завод выпускает радары, противовоздушные ракетные системы и другое оборудование для вооруженных сил.

С начала 1990-х годов Ростовская область столкнулась с вызовами перестройки экономики и легализации новых рыночных отношений. Многие промышленные предприятия были вынуждены изменить свою производственную специализацию или закрыться в результате непростых экономических условий [4].

Однако, благодаря развитию новых отраслей и направлений производственный потенциал Ростовской области сохраняется и развивается по сей день. В последние годы значительными темпами развиваются автомобильная промышленность (компания АВТОСПЕЦБЫТ-ДОН, компания КАМАЗ-ДОН, компания ТОЙОТА-ЦЕНТР РОСТОВ), авиационная промышленность (авиационный научно-технический комплекс им. Бериева, Роствертол – компания занимается строительством вертолетов), пищевая промышленность (группа компаний «Юг Руси», «Евродон» – лидер российского рынка производства и переработки мяса индейки, ОАО Астон Продукты Питания и Пищевые Ингредиенты) и др.

Развитие производственного потенциала Ростовской области обусловлено не только наличием природных ресурсов и удобным географическим положением, но и активными инвестициями в различные отрасли экономики. Большое внимание уделяется модернизации

предприятий, повышению качества производства и внедрению инновационных технологий [2].

Таким образом, история развития производственного потенциала Ростовской области отражает периоды роста и спада, вызванные внешними факторами. Однако благодаря наличию крупных предприятий, активной поддержке правительства региона и стратегическому планированию экономического развития Ростовская область продолжает занимать лидирующие позиции среди промышленно-развитых регионов России.

Современное состояние производственного сектора Ростовской области является одним из ключевых факторов, определяющих экономическую эффективность и конкурентоспособность региона. Ростовская область является одним из ведущих регионов России по объему промышленного производства.

Металлургическая отрасль занимает важное место в экономике Ростовской области и представлена крупными предприятиями: ПАО «Таганрогский металлургический завод» (ПАО «ТАГМЕТ»), ОАО «ЭПМ-НЭЗ», АО «Алюминий Металлург Рус». Производство стали в регионе осуществляется с использованием современных технологий и оборудования, что позволяет предприятиям быть конкурентоспособными на рынке.

Химическая промышленность также играет важную роль в производственном потенциале Ростовской области. Здесь действуют крупные химические предприятия, такие как АО «Каменскволокно», ЗАО «Эмпилс», ООО «Эмпилс-цинк», ООО ПКФ «Атлантис-Пак», ООО «Вотерфолл ПРО», ООО «Полимерпром». В рамках данной отрасли производятся удобрения, кислоты, пестициды и другие химические продукты.

Машиностроение является одной из самых развитых отраслей промышленности Ростовской области. В 2022 году Ростовская область лидирует в России по производству многих видов промышленной продукции: зерноуборочные комбайны (более 70%); электровозы магистральные (более 50%); оборудование эксплуатационное для ядерных реакторов (порядка 48%); трубы бурильные для бурения нефтяных или газовых скважин бесшовные стальные (более 45%); тракторы для сельского хозяйства (порядка 15%). Ведущее место в России принадлежит донскому вертолётостроению, производству зерноуборочных комбайнов, машинам для уборки зерновых, масличных, бобовых и крупяных культур, эксплуатационному оборудованию для ядерных установок [5].

Пищевая промышленность Ростовской области специализируется на переработке сельскохозяйственной продукции. По статистическим оценкам, на ее долю приходится примерно пятая часть всей производимой продукции в сфере обрабатывающих производств. В

области работают крупнейшие российские агрохолдинги: ОАО «АСТОН», располагающий значительными мощностями по производству растительного масла, муки, рисовой крупы, рядом элеваторных комплексов, речными и морскими транспортными средствами. Группа компаний «Юг Руси», занимающая лидирующие позиции среди поставщиков бутилированного масла и бакалейной продукции. ООО «Группа АГРОКОМ», занятая производством табачных изделий, мясной продукции, консервов и минеральной воды. Группа компаний «Евродон», прочно удерживающая лидерство в сфере производства и переработки мяса индейки на российском рынке.

А также компании и бренды, продукция которых широко востребована: «Тавр», «Донские традиции», «Амилко», ООО ТД «Экомяспром», «Аютинский хлеб», «Азовская кондитерская фабрика», «Белый Медведь», «Агрофирма «Целина», «Молочные продукты сальских степей».

На фоне широкомасштабной господдержки сельхозпроизводителей Ростовской области в 2022 года наблюдался бурный рост выпуска продукции предприятиями пищевой промышленности. В стоимостном выражении это составило 176,8 млрд рублей (↑13,1%). Значительно увеличилось производство:

- мяса, дошедшего до 208,2 тыс. тонн (↑27,7%), в том числе говядины (↑40,7%);
- не переработанного молока (↑20%), количество которого в первом полугодии составило 516,5 тыс. тонн;
- яиц – свыше 846 млн штук за первое полугодие (↑32%);
- сливочного масла (↑37,2%);
- нерафинированного масла (↑40,8%);
- рафинированного масла (↑25,7%);
- разнообразных круп (↑87,5% в первом полугодии) [5].

Строительный комплекс Ростовской области также является важным сегментом производственного сектора. В регионе осуществляется активное строительство жилых и коммерческих объектов, а также инфраструктуры. Действуют крупные строительные компании, которые выполняют работы различного уровня сложности [2].

Стоит отметить, что производственный потенциал Ростовской области поддерживается благоприятным инвестиционным климатом. Государство оказывает поддержку предприятиям через различные программы и льготы. Также имеется развитая инфраструктура для привлечения инвесторов – наличие свободных земельных участков, готовых производственных площадей и т.д. [3].

Таким образом, современное состояние производственного сектора Ростовской области характеризуется высокой конкурентоспособностью и эффективностью. Отраслевая диверсификация

позволяет снизить риски и обеспечить стабильный рост экономики региона. Поддержка со стороны государства и наличие благоприятного инвестиционного климата способствуют притоку инвестиций и развитию производственных предприятий.

Развитие производственного потенциала является одним из важных факторов экономического роста и благополучия региона. Ростовская область, расположенная на юге России, обладает значительным производственным потенциалом, который может быть использован для стимулирования экономического развития и создания новых рабочих мест [3].

Одним из основных факторов, влияющих на развитие производственного потенциала Ростовской области, является ее географическое положение. Область имеет стратегически важное положение на пересечении важных транспортных коридоров, таких как Южный железнодорожный узел и автомобильные трассы, связывающие Россию с Европой и Азией. Это позволяет легко доставлять товары не только по территории России, но и за ее пределами.

Еще одним фактором, способствующим развитию производственного потенциала Ростовской области, является наличие крупных промышленных зон и индустриальных парков. Ростовская область активно привлекает инвестиции в различные отрасли, такие как автомобильная, авиационная, пищевая и металлургическая промышленность. Это создает благоприятную среду для развития предпринимательства и новых производственных объектов.

Кроме того, на развитие производственного потенциала Ростовской области влияет доступ к качественным ресурсам. В Ростовской области разведаны и эксплуатируются месторождения каменного угля, природного горючего газа, флюсовых и конверторных известняков, формовочных песков, тугоплавких и огнеупорных глин, различных строительных материалов. Ростовская область располагает лучшим в мире углем по калорийности – антрацитом. Наличие этих ресурсов стимулирует развитие соответствующих отраслей экономики и способствует созданию новых рабочих мест [3].

Еще одним фактором, влияющим на развитие производственного потенциала Ростовской области, является наличие развитой инфраструктуры. Регион имеет развитую транспортную сеть, которая обеспечивает связь между промышленными зонами и рынками сбыта. Также в области создана необходимая социальная инфраструктура, такая как школы, больницы и культурные учреждения, что делает его еще более привлекательным для инвестиций.

В последние годы наблюдается устойчивый рост индустриального сектора, что создает

благоприятные условия для развития экономики и повышения уровня жизни населения.

Рассмотрим несколько перспективных направлений развития производственного сектора Ростовской области.

Первое направление – развитие машиностроительной отрасли. Регион уже давно славится своими мощными машиностроительными предприятиями, однако есть еще большой потенциал для развития этой отрасли. Возможности для расширения производства здесь огромные: начиная от модернизации существующих предприятий до запуска новых заводов по выпуску высокотехнологичной продукции.

Второе направление – развитие атомной энергетики. Ростовская область является «домом» для одной из крупнейших атомных станций в стране – Ростовской АЭС. В ближайшем будущем планируется расширение этого объекта, что создаст дополнительные рабочие места и увеличит объем производства электроэнергии. При этом следует отметить, что развитие атомной энергетики требует высоких технических знаний и квалифицированных специалистов, что в свою очередь будет способствовать развитию научно-технического потенциала региона.

Третье направление – развитие пищевой промышленности. Ростовская область является одним из крупнейших производителей сельскохозяйственной продукции в России. Однако значительная часть сельскохозяйственного сырья экспортируется за пределы региона без его переработки. Поэтому переработка новых технологий переработки и добавления стоимости к сельскохозяйственной продукции является перспективным направлением для развития производственного сектора региона.

Четвертое направление – развитие транспортной и логистической инфраструктуры. Ростовская область располагается на перекрестке важных транспортных магистралей, таких как федеральные дороги и железные дороги. Это создает благоприятные условия для развития логистических центров и складских комплексов, которые помогут оптимизировать поставки товаров и снизить затраты на логистику. Также стоит отметить строительство новых портов на Азовском море, что позволит улучшить экспортно-импортную инфраструктуру региона.

Пятое направление – развитие высокотехнологичного производства. В последние годы наблюдается активный рост IT-сектора в Ростовской области. Благодаря этому возникают новые возможности для развития высокотехнологичной промышленности, такой как производство программного обеспечения, электроники и других средств информационных технологий. Создание благоприятной инновационной среды и привлечение квалифицированных специалистов поможет

увеличить объемы производства и повысить конкурентоспособность региона.

Рассмотрим проблемы и пути их решения в развитии производственного потенциала Ростовской области.

Одной из главных проблем является недостаток квалифицированных кадров. В настоящее время многие предприятия сталкиваются с нехваткой специалистов, что замедляет темпы развития производства. Для решения этой проблемы необходимо улучшить систему подготовки кадров, в том числе путем расширения сети профессионально-технических учебных заведений, создания современных учебно-производственных комплексов и проведения целевых программ по повышению качества образования.

Еще одной проблемой является недостаточное разнообразие производства. В Ростовской области преобладает добыча и переработка природных ресурсов, а также сельскохозяйственное производство. Однако для устойчивого развития региона необходимо разнообразить экономику и привлечь инвестиции в другие отрасли, например, в высокотехнологичные и инновационные сферы. Для этого необходимо создать благоприятные условия для бизнеса, в том числе посредством упрощения процедур регистрации предприятий, снижения налогового бремени и предоставления льгот для инвесторов.

Недостаточный уровень инноваций и использования современных технологий также является значимой проблемой для производственного потенциала Ростовской области. Многие предприятия до сих пор используют устаревшее оборудование и не следят за внедрением новых технологий. Для решения этой проблемы необходимо создать специальные программы поддержки инноваций, предоставить налоговые льготы для компаний, занимающихся научно-исследовательской деятельностью, а также организовать центры передачи технологий для обмена опытом между предприятиями.

Кроме того, одной из актуальных проблем является неравномерное развитие производства по районам области. В некоторых районах отсутствует достаточное количество предприятий или они функционируют на низкой загрузке. Для решения этой проблемы необходимо провести анализ потенциала каждого района области и разработать целевые программы по привлечению инвестиций и созданию новых предприятий.

Результаты исследования. Результаты исследования подтверждают актуальность развития производственного потенциала Ростовской области. Анализ данных показал, что область обладает значительными ресурсами, необходимыми для промышленного развития. В ходе исследования были выделены следующие перспективные направления развития производственного сектора Ростовской области:

- развитие машиностроительной отрасли;
- развитие атомной энергетики;
- развитие пищевой промышленности;
- развитие транспортной и логистической инфраструктуры;
- развитие высокотехнологичного производства.

Также, в ходе исследования были определены проблемы в развитии производственного потенциала Ростовской области и пути их решения.

Выводы. В заключение можно сказать, что развитие производственного потенциала Ростовской области сталкивается с рядом сложностей. Однако с помощью правильно спланированных и целенаправленных мероприятий эти проблемы могут быть решены. Развитая инфраструктура, квалифицированные кадры, разнообразное производство и использование современных технологий – все это позволит региону укрепить свое положение на промышленном рынке и обеспечить устойчивый экономический рост.

Литература

1. Научный потенциал Донского региона: 2022: Стат.сб./ Ростовстат. – Ростов н/Д, 2022. – 146 с. - [Электронный ресурс]. URL: <https://61.rosstat.gov.ru/folder/183080> (дата обращения: 17.01.2024).
2. Постановление Правительства Ростовской области «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года» № 864 от 26.12.2018.
3. Постановление Правительства Ростовской области «Об утверждении Плана мероприятий по реализации Стратегии социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года» № 885 от 29.12.2018.
4. Ростовская область – движение к целям устойчивого развития: 2016-2022 Информ.-анал.мат./ Ростовстат. – Ростов н/Д, 2023. – 325 с. - [Электронный ресурс]. URL: <https://61.rosstat.gov.ru/folder/183080> (дата обращения: 16.01.2024).
5. Ростовская область в цифрах: Крат.стат.сб./ Ростовстат. – Ростов-н/Д, 2023. - [Электронный ресурс]. URL: <https://61.rosstat.gov.ru/folder/183080> (дата обращения: 17.01.2024).

Protasov V.V., Taran A.A. ASSESSMENT AND ANALYSIS OF THE PRODUCTION POTENTIAL OF THE REGION USING THE EXAMPLE OF THE ROSTOV REGION

The article discusses current aspects of the development of the production potential of the Rostov region, namely: an analysis of the production potential of the region was carried out; the main factors influencing the development of the production potential of the Rostov region are identified; shortcomings in the development of production potential have been identified; specific measures and tools for its improvement are given; Several promising directions for the development of the manufacturing sector are considered.

Key words: *production potential, region, analysis and assessment, factors, industry, disadvantages, economic growth, development directions.*

Протасов Виктор Владимирович, кандидат экономических наук, доцент кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.
E-mail: vvp3155@gmail.com

Таран Александра Александровна, магистрант кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.
E-mail: g.alexandrovna11@gmail.com

Protasov Viktor Vladimirovich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Socio-Economic and Pedagogical Disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Taran Alexandra Alexandrovna, master's student of the Department of Socio-economic and pedagogical disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Рецензент: Авершин Андрей Александрович, кандидат психологических наук, доцент, директор Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.

Статья подана 15.11.2023

УДК 339.137.2

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ КАК УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Протасов В. В., Черныш Л. Н., Шевченко Я. С.

COMPETITIVENESS AS A CONDITION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE

Protasov V. V., Chernysh L. N., Shevchenko Y. S.

В статье рассматриваются вопросы конкурентоспособности как условия устойчивого развития предприятия, а также механизмы управления конкурентоспособностью предприятия в условиях реализации политики импортозамещения. Авторы подчеркивают, что существенным конкурентным преимуществом в условиях санкционных воздействий и углубляющегося кризиса является своевременный учет таких элементов, как оценка текущего состояния предприятия; стратегические цели предприятия; область трансформации; способы повышения конкурентоспособности; факторы внешней и внутренней среды; оперативный менеджмент; оценка уровня конкурентоспособности предприятия; достигнутые изменения и практический результат.

Ключевые слова: конкурентоспособность, управление конкурентоспособностью, конкурентное преимущество, импортозамещение, стратегия развития.

Введение. Сегодня конкуренция перестала быть просто экономической теорией, а превратилась в идеологию развития современного общества. Она выступает основным фактором успешности компании, вынуждающая проигравших уйти с рынка. Повышение конкурентоспособности предприятий является важным условием успешной реализации политики импортозамещения.

Соответствие качества отечественной продукции импортным аналогам усиливает конкурентные преимущества российских предприятий. Обладая собственными конкурентными преимуществами, нивелируя последствия неопределенности, обусловленные новыми экономическими условиями, предприятия обеспечивают эффективность реализации политики импортозамещения.

Изложение основного материала. Под конкурентоспособностью обычно понимается способность предприятия опережать других, используя свои преимущества в достижении поставленных целей. Это обобщающая характеристика отражает уровень эффективности

использования экономических ресурсов относительно конкурентов, что позволяет выпускаемой им продукции соответствовать требованиям потребителей.

Конкурентоспособность трактуется как относительное понятие, которое включает целый ряд базовых условий и помогает объяснить достигнутый уровень развития. Соответственно, это является отправной точкой и в то же время целью для стран, отраслей и отдельных фирм, которые стремятся к ее достижению, что обеспечивает повышение производительности и, как следствие, экономический рост. Периодически возникающие кризисы представляют собой внешние шоки, которые приводят к разрыву связи между конкурентоспособностью, производительностью и развитием, но при этом также могут привести к появлению новых возможностей.

В 2022 году произошел уход с рынка многих западных компаний, это в свою очередь усилило конкуренцию среди отечественных предприятий (рис. 1).

Влияние ухода западных компаний на конкуренцию на некоторых отечественных отраслевых рынках отображено на рис. 1.

Характерной особенностью проводимой политики импортозамещения в России является выравнивание факторов, определяющих конкурентоспособность российской продукции:

- рост конкурентоспособности отечественного производства на внутреннем рынке на основе усиления их конкурентных позиций, рост емкости рынка;

- снижение барьеров для входа на рынок применительно к российским производителям.

Еще раз подчеркнем, что рост конкурентоспособности предприятия, а также формирование и развитие его конкурентных преимуществ выступают критериями эффективного функционирования в условиях реализации политики импортозамещения.

Как 2022 год повлиял на конкуренцию на отраслевых рынках

изменение ННІ (степени концентрации на рынке), %

КОНЦЕНТРАЦИЯ СНИЗИЛАСЬ

оптовая торговля одеждой

-37

производство медоборудования

-35

оптовая торговля машинами и оборудованием

-35

ремонт электрооборудования

-32

торговля средствами связи

-32

КОНЦЕНТРАЦИЯ ВЫРОСЛА

торговля моторным топливом

40

производство авто

25

розничная торговля одеждой

13

ТВ-вещание

12

торговля аудио- и видеонаосителями

12

Рис.1. Влияние ухода западных компаний на конкуренцию [8]

Поэтому для роста конкурентоспособности отечественных предприятий важно разработать совокупность мероприятий, имеющих разную направленность, и с учетом сильных и слабых сторон системы менеджмента [6]. Кроме того, предложенные мероприятия должны оказывать влияние на формирование конкурентных преимуществ и/или усиление фактора (группы факторов) конкурентоспособности импортозамещающих предприятий.

Необходимость формирования системы управления, например, промышленным предприятием на основе использования его потенциала с адаптацией к современным условиям отражает в своей работе Ю.Ю. Костюхин [3].

Автором выделяются приоритетные направления управления конкурентоспособностью промышленных предприятий, актуальные в новых экономических условиях. Данные направления вытекают из анализа деятельности предприятий и необходимости развития их конкурентных преимуществ.

Повышение эффективности управления конкурентоспособностью предприятия на основе более тщательного учета конъюнктуры рынка, на основании исследования потребительского поведения позволяет спрогнозировать спрос на товар и выявить факторы, которые оказывают наиболее сильное влияние на выбор потребителей. Управляя данными факторами, производитель может регулировать объемы собственного производства, корректируя характеристики товара.

Причем сопоставление качества товара с импортными аналогами должно быть первостепенной задачей предприятия в условиях РПИ (реализации политики импортозамещения). Это позволяет своевременно внести изменение в производственный процесс и сформировать позитивный имидж как продукции, так и предприятия в целом.

Важным моментом также при оценке рынка являются такие параметры, как изучение ассортимента; особенности ценообразования на изучаемую продукцию; послепродажное обслуживание; анализ сроков эксплуатации и сроков гарантии. Реализация данного направления будет способствовать развитию одного из конкурентных преимуществ предприятия – высокого отличительного качества отечественного продукта.

Современные тенденции мирового развития свидетельствуют о непосредственном влиянии научно-технического прогресса на экономическое развитие промышленных предприятий. Именно поэтому совершенствование производственного процесса и организационной деятельности в части технико-технологической модернизации производства выступает одним из приоритетов достижения конкурентоспособности в условиях РПИ. Технологическое обновление является основой улучшения качественных характеристик производимой продукции и повышения эффективности деятельности организации, определяя конкурентоспособность предприятий как на внутреннем, так и на внешнем рынках. В

условиях реализации политики импортозамещения в качестве основы повышения конкурентоспособности российских предприятий выступает их инновационный потенциал.

Таким образом, удержание конкурентных преимуществ предприятия, ориентированного на импортозамещение, возможно через качественное совершенствование производства – внедрение современных инновационных технологий. В подписанном президентом РФ Указе «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года» [1], в котором одной из национальных целей Российской Федерации является «ускорение технологического развития РФ, увеличение количества организаций, осуществляющих технологические инновации, до 50% от их общего числа в 2024 году». Однако в 2017 году количество таких предприятий составило 20,8%, в 2018 году – 19,8%, а в 2019 – 17,1%, что более чем в 2 раза меньше заданного целевого уровня.

Отрицательная тенденция изменения числа организаций, осуществляющих технологические инновации, связана с тем, что российские промышленные предприятия не обеспечивают технологический процесс модернизации производства. В связи с этим отечественные предприятия для ускорения технологического развития вынуждены приобретать средства производства за рубежом, наращивая импортозависимость промышленных предприятий.

Технологическая модернизация требует значительных инвестиционных вложений. В связи с этим со стороны государства разработан ряд мер поддержки для базовых отраслей, нацеленных на импортозамещающее производство [4].

Стимулирование деятельности отечественных предприятий со стороны государства осуществляется посредством установления запретов и ограничений на государственную закупку иностранной промышленной продукции. Это позволяет отечественным предприятиям получать преференции при участии в государственных закупках, а также льготные условия предоставления ряда мер. Промышленная продукция, получившая статус продукции, произведенной на территории РФ, включается в реестры промышленной продукции государственной информационной системы промышленности (ГИСП), которые используются в том числе и при поиске отечественных аналогов в рамках установленных запретов и ограничений на закупку иностранной продукции.

Таким образом, государство обеспечивает стабильность условий ведения хозяйственной деятельности и предоставляет инвестору налоговые льготы, доступ к субсидиарной поддержке и госзаказу. Субсидия предоставляется промышленным предприятиям на компенсацию до 70% затрат на проведение НИОКР по современным

технологиям в рамках реализации такими организациями инновационных проектов. При этом предприятия должны пройти конкурсный отбор на право получения субсидии.

Конкурентоспособность российских производителей является основой государственной политики импортозамещения, что определяет наличие целого ряда государственных программ по поддержке предпринимательства и реализации импортозамещения.

Среди новых направлений развития промышленности и повышения ее конкурентоспособности в условиях РПИ следует выделить цифровую трансформацию развития предприятий, что достаточно конкретно отражает в своей работе О.В. Мартыненко [5]. На мировом рынке главным конкурентным преимуществом является именно уровень внедрения цифровых технологий в разных отраслях. Цифровая трансформация и развитие «гибкого» производства выступают решающими факторами развития предприятия.

Если говорить о влиянии цифровизации на развитие конкурентных преимуществ предприятий, то среди дополнительных эффектов можно выделить:

- снижение издержек, повышающее эффективность производства в условиях роста цен на сырье, тем самым создающее предпосылки для повышения конкурентоспособности промышленного предприятия;

- цифровизацию, позволяющую выводить на рынок новые бизнес-модели, а также трансформировать деятельность предприятия, реализовывать стратегию диверсификации.

Несмотря на индекс цифровизации промышленности ниже среднего, ее потенциал очень велик.

Развитие цифровой экономики в мире будет способствовать росту производительности труда, снижению издержек производства, созданию новых квалифицированных рабочих мест, преодолению бедности и социального неравенства.

Итак, в ходе цифровой трансформации промышленных предприятий путем внедрения таких технологий, как BIG data, искусственный интеллект и другие, может быть увеличено производство качественной конкурентоспособной продукции главными технологиями, а также сокращены издержки и брак. Поддержка внедрения российского программного оборудования и позиционирования цифровых платформ позволит сократить время вывода продукции на внутренний и внешний рынок и повысить эффективность использования производственных мощностей.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования нами выявлено, что:

1. Характерной особенностью проводимой политики импортозамещения в России является

выравнивание факторов, определяющих конкурентоспособность российской продукции.

2. Повышение эффективности управления конкурентоспособностью предприятия должно осуществляться на основе более тщательного учета конъюнктуры отечественного рынка.

3. Современные тенденции мирового развития свидетельствуют о непосредственном влиянии научно-технического прогресса на экономическое развитие промышленных предприятий. Однако в РФ наблюдается отрицательная тенденция изменения числа организаций, осуществляющих технологические инновации. Это связано с тем, что российские промышленные предприятия не обеспечивают технологический процесс модернизации производства.

4. В условиях импортозамещения стимулирование деятельности отечественных предприятий со стороны государства осуществляется посредством установления запретов и ограничений на государственную закупку иностранной промышленной продукции.

5. Среди новых направлений развития промышленности и повышения ее конкурентоспособности в условиях РПИ (реализации политики импортозамещения) следует выделить цифровую трансформацию развития предприятий, т.к. на мировом рынке главным конкурентным преимуществом является именно уровень внедрения цифровых технологий в разных отраслях.

Выводы. Конкурентоспособность предприятия характеризует преимущество этого предприятия в отношении других предприятий этой отрасли как внутри страны, так и за ее пределами и определяется, как правило, в рамках группы предприятий, принадлежащих к той же отрасли, или предприятий, которые производят аналогичные товары (услуги).

Конкурентоспособность предприятия обеспечивает одновременно конкурентоспособность его продукции. Отсюда следует вывод о том, что именно создание надежной основы для развития конкурентного потенциала предприятия способствует формированию механизма организации и управления конкурентоспособностью хозяйствующего субъекта и, как следствие, устойчивому развитию в перспективе.

Литература

1. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/71937200>
2. Асанова С.С. Формирование и реализация процессов импортозамещения в инновационной экономике / дис., канд. экон. наук: 08.00.05. – Самара, 2021. – 174 с.
3. Костюхин Ю. Ю., Мосейкин Ю.Н. Методические положения формирования системы управления

промышленным предприятием на основе использования его потенциала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2020. – № 1. – С. 110-122.

4. Мартыненко О. В., Овчаренко Н.А. Менеджмент конкурентоспособности российских предприятий в условиях стратегии импортозамещения // Экономика и предпринимательство. – 2019. – № 6 (107). – С. 748-755.

5. Мартыненко О. В. Роль маркетинга в развитии промышленности в условиях цифровизации экономики // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2020. – № 2(70). – С. 140-148.

6. Мельников, И. В. Конкуренция: как победить / И. В. Мельников. – М.: 2019.

7. Щетинина Е.Д., Архипенко А.А. Механизм управления конкурентным поведением промышленного предприятия // Белгородский экономический вестник. – 2018. – № 1 (65). – С. 3-6.

8. Влияние ухода иностранных компаний на состояние конкуренции в России – [Электронный ресурс]. URL: <https://kept.ru/news/vliyanie-ukhoda-inostrannykh-kompaniy-na-sostoyanie-konkurentsii-v-rossii/>

Protasov V.V., Chernysh L. N., Shevchenko Y. S. COMPETITIVENESS AS A CONDITION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE

The article discusses issues of competitiveness as a condition for the sustainable development of an enterprise, as well as mechanisms for managing the competitiveness of an enterprise in the context of implementing the import substitution policy. The authors emphasize that a significant competitive advantage in the context of sanctions and a deepening crisis is the timely consideration of such elements as: assessment of the current state of the enterprise; strategic goals of the enterprise; area of

transformation; ways to increase competitiveness; external and internal environmental factors; operational management, assessment of the level of competitiveness of the enterprise; changes achieved and practical results.

Keywords: competitiveness, competitiveness management, competitive advantage, import substitution, development strategy.

Протасов Виктор Владимирович, кандидат экономических наук, доцент кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.
E-mail: vvp3155@gmail.com

Черныш Людмила Николаевна, магистрант кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.
E-mail: chernysh.lyudmila.1986@mail.ru

Шевченко Яна Сергеевна, магистрант кафедры социально-экономических и педагогических дисциплин Стахановского инженерно-педагогического института (филиала) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Стаханов.
E-mail: yana-shevchenko92@mail.ru

Protasov Viktor Vladimirovich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Socio-Economic and Pedagogical Disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Chernysh Lyudmila Nikolaevna, master's student of the Department of Socio-economic and pedagogical disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Shevchenko Yana Sergeevna, master's student of the Department of Socio-economic and pedagogical disciplines of the Stakhanov Engineering and Pedagogical Institute (branch) «LSU named after V. Dahl», Stakhanov.

Рецензент: Авершин Андрей Александрович, кандидат психологических наук, доцент, директор Стахановского инженерно-педагогического института (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Стаханов.

Статья подана 15.11.2023

УДК 550.3

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРИТА ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОСТОГО УДАРНОГО КРАТЕРА

Саркисов А. А., Чаленко А. В.

CALCULATION OF METEORITE CHARACTERISTICS BASED ON THE PARAMETERS OF A SIMPLE IMPACT CRATER

Sarkisov A. A., Chalenko A. V.

В статье рассматриваются типы метеоритов, определение диапазонов значений их параметров и процесс образования простого ударного кратера. В частности, рассмотрен наиболее изученный простой ударный кратер «Метеор».

Ключевые слова: метеорит, мишень, переходный и простой ударный кратеры.

Введение. История исследования метеоритов насчитывает чуть больше двух столетий, хотя человечество познакомилось с этими небесными посланниками существенно раньше. Первое железо, использованное человеком, несомненно, было метеоритным. Это нашло свое отражение в названии железа у многих народов.

Первое задокументированное сведение о камнях, падающих с неба, встречено в китайских летописях и датируется 654 годом до н.э. Наиболее древний метеорит, наблюдавшийся при падении и сохранившийся до наших дней, – это каменный метеорит Ногата, падение которого, как задокументировано в старых японских летописях, наблюдалось 861 г. н.э.

Шли века, метеориты падали на Землю, летописные данные меняли свою религиозную форму на все более правдоподобное описание падений. Тем не менее к концу XVIII века большинство европейских ученых все же крайне скептически относились к сообщениям простого люда о камнях, падающих с неба. В 1772 году известный химик А.Л. Лавуазье стал одним из авторов доклада ученых в Парижскую академию наук, в котором говорилось, что "падения камней с неба физически невозможны". После такого заключения, подписанного авторитетными учеными, Парижская академия наук отказалась рассматривать какие-либо сообщения "о камнях, падающих с неба".

Иначе посмотрел на этот вопрос ученый Э. Ф. Хладный, работавший в конце XVIII века в России. Он тщательно изучил огромный метеорит, привезенный в 1772 году в Петербург академиком

П. С. Палласом из Сибири, так называемое Палласово железо. Метеорит был найден в 1749 году кузнецом Медведевым, слышавшим от местных жителей, что эта железная глыба когда-то упала с неба.

Исследовав структуру и состав Палласова железа, Хладный получил неопровержимое доказательство того, что оно не может быть земного происхождения. Результаты своих исследований он изложил в книге, вышедшей в 1794 году в Риге. Его труд и положил основу новому разделу астрономии – метеоритике.

Изложение основных материалов. Метеорит – твёрдое тело космического происхождения, упавшее на поверхность Земли или другого крупного небесного объекта. Метеориты в основном имеют неправильную форму, так как создаваемая ими гравитация, за счёт малой массы, не способна придать им форму шара. При достижении поверхности более крупного небесного тела метеорит оставляет кратер, или иными словами звёздную рану – астроблеу.

Метеориты по химическому составу делятся на три группы: каменные (хондриты и ахондриты), железные и железокремнистые (палласиты и мезосидериты).

Хондритами называются каменные метеориты, которые содержат хондры – сферические или эллиптические образования преимущественно силикатного состава. Большинство хондр имеет размер не более 1 мм в диаметре. Хондры находятся в обломочной или мелкокристаллической матрице, причём нередко матрица отличается от хондр не столько по составу, сколько по кристаллическому строению. Состав хондритов схож с химическим составом Солнца, за исключением лёгких газов (водород и гелий). Поэтому считается, что хондриты образовались непосредственно из протопланетного облака, окружающего Солнце, путём конденсации вещества и аккреции пыли с промежуточным нагреванием.

Ахондриты – каменные метеориты без округлых включений. По составу и структуре близки земным базальтам. Все ахондриты – это обломки протопланетных (или планетных) тел, прошедшие плавление (которое уничтожило хондры) и дифференциацию по составу (на металлы и силикаты).

Железные метеориты состоят из железоникелевого сплава.

Палласит – класс в типе железо-каменных метеоритов. Представляют собой железно-никелевую основу с вкраплениями кристаллов оливина. Палласит состоит приблизительно из равных количеств никелистого железа и оливина. Структура этого метеорита указывает на то, что он образован в условиях отсутствия гравитационных сил.

Мезосидериты – это класс каменно-железных метеоритов, состоящих примерно из равных частей никелистого железа и силикатных минералов (оливин, пироксены и кальциевые полевые шпаты). Мезосидериты имеют неоднородную структуру. Силикатные минералы и металлы часто присутствуют в виде округлых и остроугольных обломков и мелкозернистых сростаний.

Ахондриты, железные и железосиликатные метеориты относят к дифференцированным метеоритам. Они предположительно состоят из вещества, прошедшего дифференцировку в составе астероидов или других планетных тел. Раньше считалось, что все дифференцированные метеориты образовались в результате разрыва одного или нескольких крупных тел, например, планеты Фазтона. Однако анализ состава разных метеоритов показал, что с большей вероятностью они образовались из обломков многих крупных астероидов.

Найденное в кратере метеоритное вещество определяет тип упавшего метеорита, что даёт нам возможность узнать его плотность.

Метеорное тело входит в атмосферу Земли на скорости от 11 до 72 км/с. На такой скорости начинается его разогрев и свечение. За счёт абляции (обгорания и сдувания набегающим потоком частиц вещества метеорного тела) масса тела, долетевшего до поверхности, становится меньше.

Кроме того, может произойти разрушение метеорного тела на фрагменты, что приводит к выпадению метеоритного дождя. Разрушение некоторых тел носит катастрофический характер, сопровождаясь мощными взрывами, и нередко не остаётся макроскопических следов метеоритного вещества на земной поверхности, как это было в случае с Тунгусским болидом. Предполагается, что такие метеориты могут представлять собой кометы.

При небольших скоростях (порядка сотен м/с) столь значительного выделения энергии не наблюдается, диаметр образующегося ударного кратера сравним с размерами самого метеорита, и

даже крупные метеориты могут хорошо сохраниться, как например метеорит Гоба.

Удар метеорита, движущихся со скоростью несколько десятков километров в секунду, о поверхность планеты инициирует упорядоченную, но быструю последовательность событий, в результате которой образуется ударный кратер. Ударный кратер – это круглое углубление на поверхности твёрдого астрономического объекта, образовавшееся в результате сверхскоростного удара с меньшим объектом. Образование кратера по сути непрерывный процесс, однако его удобно разделить на несколько стадий, в каждой из которых доминируют различные процессы.

Первая стадия образования ударного кратера, контакт и сжатие, начинается, когда ударник приходит в соприкосновение с поверхностью мишени. Движущийся на высокой скорости ударник, ударяясь в мишень, выталкивает её материал со своего пути, сжимая его и разгоняя до скорости, сравнимой со скоростью самого ударника. В то же время сопротивление мишени проникновению ударника тормозит его. Это резкое изменение скорости приводит к возникновению ударных волн: материал в области соприкосновения ударника и мишени сильно сжимается, в результате чего на поверхности сжатого и несжатого материала образуются ударные волны. По мере внедрения ударника в мишень ударные фронты расходятся и распространяются как в мишени, так и в ударнике. На самых ранних этапах для большинства гиперскоростных ударов давление в ударной волне обычно достигает нескольких сотен гигапаскалей и, следовательно, значительно превосходит прочность мишени и ударника. При таких высоких давлениях на стадии разгрузки оба материала могут расплавиться или даже испариться. Тогда с поверхности между ударником и мишенью выбрасываются высокоскоростные «струи» сильно сжатого материала. Большая часть кинетической энергии ударника переходит в мишень, поэтому материал мишени сжимается, нагревается и разгоняется до высокой скорости.

Вторая стадия – стадия экскавации – начинается сразу после стадии контакта и сжатия. На этом этапе в мишени распространяется более или менее похожая на полусферу ударная волна, которая затухает по мере увеличения её радиуса и захвата всё большего объёма материала. Ударная волна и последующая фаза разрежения приводит в движение материал мишени, инициируя возникновение дозвукового экскавационного течения, которое постепенно увеличивает размеры кратера. Окончательные размеры кратера оказываются во много раз большими, чем размеры ударника, его создавшего. На этой стадии начинается образование султана выбросов, которые в последствии покрывают окружающую кратер область. В конце этой стадии важную роль уже играют прочность материала и сила тяжести.

Стадия модификации начинается после того, как экскавация кратера полностью закончена. В результате экскавации возникает чашеобразный «переходный кратер», который обычно обрушается под действием силы тяжести. Во время модификации несвязанные (свободные) обломки соскальзывают по крутым внутренним склонам небольших кратеров, заполняя дно чашеобразной депрессии. При сравнительно небольших размерах переходного кратера образуется простой кратер.

Простые кратеры – это чашеобразные, окаймлённые валом углубления, напоминающие переходные кратеры из которых они образовались. Молодые простые кратеры на всех планетоидах морфологически близки, и отношение их глубины к диаметру находится в пределах 0,2–0,33. Размеры их колеблются от нескольких сантиметров до нескольких десятков километров. Простые кратеры отличаются от переходных тем, что дно их покрыто слоем брекчий, смешанных с разрушенным материалом и с породами, расплавленными при ударе, которые опадают на дно кратера после выброса. Часть вала, окаймляющего переходный кратер, осыпается в его полость.

Результаты исследований. Прежде чем мы приступим к математической модели, которая нам позволит получить параметры метеорита по размерам кратера следует отметить некоторые сложности данной задачи. Преимущественно большая часть ударных кратеров имеют круглую форму, так как столкновение подобно взрыву (ударно взрывная аналогия), следовательно, однозначно определить можно кинетическую энергию ударника (в вертикальном приближении). В свою очередь, скорость и масса (или диаметр) могут быть даны диапазоном возможных значений. Угол между траекторией падения ударника по отношению к поверхности мишени в случае круглых кратеров можно условно принять от 90° до 30°, при более острых углах кратер может стать овальной формы. Зависимость глубины кратера от угла падения использовать проблематично, так как косые удары мало изучены. Поскольку определить однозначно многие параметры метеорита не выйдет и влияние атмосферы на достаточно большие метеориты не слишком велико, то мы не будем учитывать её влияние. Впрочем, как и погодные условия, которые с течением долгого времени разрушали кратер, учитывать не станем.

Математическая модель описывает процесс ударного кратерообразования, начиная от контакта метеорита с поверхностью до стадии модификации кратера. Так как нам нужно решить обратную задачу, мы запишем выводы из модели в обратном порядке в виде алгоритма из следующих уравнений:

1. Для начала следует определить тип кратера. Для простого кратера удовлетворяется следующее неравенство:

$$D \leq 22,84 \frac{c}{g\rho}, \quad (1)$$

где D – диаметр итогового кратера по гребню вала, c – сцепление.

2. Для оценки размера ударника можно воспользоваться приближением, в котором метеорит рассматривается как кумулятивная струя, попутно приравняв глубину пробоя коры метеоритом и глубину экскавации:

$$L = 0,073D \sin^{-1} \theta \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_p}}, \quad (2)$$

где L – диаметр ударника (метеорита), ρ_p – плотность ударника, ρ_t – плотность мишени.

3. Определить кинетическую энергию можно преобразовав обобщённый Голтом закон подобия для кратеров более 0,1–1 км в диаметре:

$$D = 0,3g^{-0,165} \rho_p^{\frac{1}{6}} \rho_t^{-\frac{1}{2}} W^{0,28} (\sin \theta)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow W = \left(\frac{3,3Dg^{0,165} \rho_t^{\frac{1}{2}}}{(\sin \theta)^{\frac{1}{3}} \rho_p^{\frac{1}{6}}} \right)^{3,57} \quad (3)$$

4. Установить диапазон значений для диаметра и массы ударника можно по формулам:

$$L_{\min}^{\max} = \sqrt[3]{\frac{4W}{\rho v_{\max}^2 \min}}, \quad m_{\min}^{\max} = \frac{2W}{v_{\max}^2 \min} \quad (4)$$

5. Для использования формул (4) нужно дополнительно установить возможные значения скорости, для этого необходимо выйти за рамки модели процесса образования кратера. Минимальная скорость ударника может быть рассчитана по модели, в которой метеорит покоится на бесконечности, а после начинает движение к мишени. Это собственно будет второй космической скоростью для мишени. Максимальную скорость можно найти аналогично. Пусть покоящийся метеорит из бесконечности начнёт движение к центру Солнечной системы, причём в расчёте он долетает до воображаемой сферы, радиус которой равен расстоянию от Солнца до мишени, массой планет внутри этой сферы можно пренебречь. Это будет рассчитываться как вторая космическая скорость для данной сферы, на периферии которой находится мишень. В свою очередь планета вращается вокруг солнца, и максимальной скоростью будет в случае, когда планета движется на встречу метеориту. Формулы для минимального и максимального значения скорости соответственно:

$$v_{\min} = \sqrt{2G \frac{M}{R}}, \quad v_{\max} = \sqrt{2G \frac{M_c}{R_{Il-C}}} + v_{orb,пл} \quad (5)$$

Определим начальные условия для расчёта параметров метеорита, который образовал на Земле кратер «Метеор». О Земле мы можем сказать

следующее: средняя плотность её грунта составляет $\rho_t = 2000 \text{ кг/м}^3$, $R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$, $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, расстояние до Солнца $R_{c-z} = 150 \cdot 10^9 \text{ м}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $v_{orb} \approx 30 \text{ км/с}$, $c = 3 \text{ МПа}$. Масса Солнца – $M_c = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$.

О кратере: диаметр по гребню вала $D = 1200 \text{ м}$, по химическому составу метеоритного вещества на кратере определён тип метеорита – железный. Следовательно: $v_{min} = 11,2 \text{ км/с}$, $v_{max} = 72 \text{ км/с}$, $D_{max,lp} = 3,5 \text{ км}$. Результаты вычислений занесены в табл. 1.

Таблица 1

Расчёт параметров метеорита по диаметру кратера и типу метеорита в зависимости от угла падения

$\theta, \text{град.}$	$L, \text{м}$	$W, \text{Мм}$	$L_{min}, \text{м}$	$L_{max}, \text{м}$	$M_{min}, \text{т}$	$M_{max}, \text{т}$
90	44	24	21	74	$3,9 \cdot 10^4$	$1,601 \cdot 10^6$
75	46	25	22	75	$4,0 \cdot 10^4$	$1,670 \cdot 10^6$
60	51	29	23	78	$4,6 \cdot 10^4$	$1,904 \cdot 10^6$
45	62	36	25	85	$5,9 \cdot 10^4$	$2,429 \cdot 10^6$
30	88	55	28	98	$8,9 \cdot 10^4$	$3,682 \cdot 10^6$

Из табл. 1, имеем следующее: в вертикальном приближении кинетическая энергия ударника составляла 24 Мт, значение диаметра находится в диапазоне от 21 до 74 м, а масса могла составлять от $3,9 \cdot 10^4$ до $1,601 \cdot 10^6$ т; с учётом угла кинетическая энергия доходит до 55 Мт, диаметр до 98 м, а масса до $3,682 \cdot 10^6$ т.

К значениям параметров метеорита следует относиться как к довольно приблизительным. Несмотря на пренебрежение к влиянию атмосферы и погодных условий, приближённая сама модель. Поскольку зависимость размеров кратера от кинетической энергии метеорита установлена по большей части экспериментально. Например, создание взрывов на некоторой глубине или же выстрел железным шариком в кварцевый песок. Не говоря уже о том, что 50000 лет назад пустынная местность Аризоны была лесостепью, а сам кратер больше походит на квадрат нежели на круг (что модель не учитывает).

Заметим, что численные значения диаметра метеорита, полученные по формуле (2), находятся в диапазонах возможных значений, вычисленных по формуле (4). Следовательно, интервал значений для угла падения выбран верно.

Выводы:

1. На основе изученных материалов, составлен алгоритм, который позволяет определить диапазон возможных значений параметров метеорита по размерам простого ударного кратера, а также по остаткам метеоритного вещества в нём.

2. По различным оценкам экспертов диаметр метеорита мог составлять: 20-30 м, около 50 м, 60-80 м. Все эти значения входят в диапазон полученных нами значений.

3. В рамках данной модели подобран диапазон значений для угла падения с помощью использования двух способов определения диаметра метеорита.

4. Вышеописанные сложности данной задачи не могут нам позволить определить параметры метеорита однозначно. По крайней мере в рамках данной модели.

Литература

1. Г. Меллош. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: «Мир», 1994. – 335 с.
2. К.П. Флоренский. Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 1983. – 199 с.
3. Забабахин Е.И.. Явления неограниченной кумуляции / Е.И. Забабахин, И.Е. Забабахин. М.: Наука, 1988. – 173 с.

Sarkisov A.A., Chalenko A.V.

CALCULATION OF METEORITE CHARACTERISTICS BASED ON THE PARAMETERS OF A SIMPLE IMPACT CRATER

The article discusses the types of meteorites, the definition of ranges of values of their parameters and the process of formation of a simple impact crater. In particular, the most studied simple impact crater "Meteor" is considered.

Keywords: meteorite, target, transient and simple impact craters.

Саркисов Адольф Альбертович, студент 4 курса направления подготовки 03.03.02 Физика ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: sarkisov.adolf@yandex.ru

Чаленко Анжелика Валериевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

E-mail: anghiel.anghiel.2014@mail.ru

Sarkisov Adolf, 4th year student field of study 03.03.02 Physics of the state institution of higher education «Lugansk Vladimir Dahl state University».

Chalenko Anzhelika, candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of physics of the state institution of higher education «Lugansk Vladimir Dahl state University».

Рецензент: Корсунов Константин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 01.12.2023

**ВЕСТНИК
ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»
№ 11 2023**

Научный журнал

Оригинал-макет

Коломиец-Кириллова Е.А.

Подписано к печати 06.02.2024.
Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times
Условных печатных стр. 46,7. Тираж 100 экз. Изд. № 01424.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
Луганского государственного университета
имени Владимира Даля

Адрес издательства: 291034, ЛНР, г. Луганск, кв-л Молодежный, 20А.
Тел.: 7(959) 138-34-80
E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com