

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В Е С Т Н И К

**ЛУГАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**№ 2 (3)
2025**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Издательство ЛГУ им. В. Даля
Луганск
2025**

ВЕСТНИК

ЛУГАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

№ 2 (3) 2025

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ОСНОВАН В 2015 ГОДУ
ВХОДИТ В БАЗУ РИНЦ

Учредитель

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля»

VESTNIK

LUGANSK
VLADIMIR DAHL
STATE UNIVERSITY

№ 2 (3) 2025

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

Founder

LSU NAMED AFTER V. DAHL

Входит в базу данных Российского индекса научного цитирования
(Лицензионный договор № 77-04/2025)

Главный редактор

Киреев Андрей Николаевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Ответственный секретарь

Чижевская Дарья Юрьевна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Редакционная коллегия серии:

Бахарев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Брешев Владимир Евгениевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Брюховецкий Андрей Николаевич, д-р техн. наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)
Витренко Владимир Алексеевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Волков Игорь Владимирович, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Замота Тарас Николаевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Зубков Виктор Егорович, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Капустин Денис Алексеевич, д-р техн. наук (ЛГПУ, Луганск)
Корсунов Константин Анатольевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)
Сидоров Владимир Анатольевич, д-р техн. наук (ДНТУ, Донецк, ДНР)
Шаповалов Виктор Иванович, д-р техн. наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)
Ясуник Светлана Николаевна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Рекомендовано в печать Ученым советом
Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
(Протокол № 1 от 5.09.2025 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ОСОБЕННОСТИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПРИВОДОМ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ	
Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И. -----	5
ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ 6Ч12/14 С КОМПРЕССОРОМ КАСКАДНО-ТЕПЛОВОГО СЖАТИЯ	
Брянцев М.А., Данилейченко А.А., Ковтун А.С., Доценко Д.М. -----	21
МАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	
Добрыднев А. В., Безкоровайный В. С., Безкоровайная Н. В., Киреева М. А. -----	31

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИРАБОТКОЙ	
Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю. -----	39
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ ВАЛКОВ	
Корсунов К. А., Эссельбах Р. В. -----	47

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

СИСТЕМНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЯДА ТИПОРАЗМЕРОВ МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СЕЛЕКЦИОННЫХ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ АКСИАЛЬНО-РОТОРНОГО ТИПА	
Бахарев Д. Н., Пастухов А. Г., Вольвак С. Ф. -----	54
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ИСПОЛЗУЮЩИХ ПРОЦЕСС «LURGI»	
Никитин Ю. Н., Чижевская Д. Ю., Дубасов А. В., Сало В. И. -----	62

CONTENTS

MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

FEATURES OF STARTING MODES IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH
ALTERNATING CURRENT DRIVE

Borisenko V. F., Sidorov V. A., Zemlyansky A. I. ----- 5

WORKING PARAMETERS OF THE DIESEL 6 FS12/14 WITH A
CASCADE THERMAL COMPRESSION COMPRESSOR

Bryantsev M.A., Danileychenko A.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M.----- 21

MAGNETIC DEVICES FOR MONITORING THE CONDITION OF COMPONENTS
OF ROBOTIC MACHINES AND MECHANISMS

Dobrydnev A. V., Bezkorovainiy V. S., Bezkorovainiya N. V., Kireeva M. A. ----- 31

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

INCREASING THE DURABILITY OF THE MAIN CONNECTIONS OF ENGINES BY
ELECTROCHEMICAL-MECHANICAL RUNNING IN

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu.----- 39

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING THE
TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SURFACE PLASMA HARDENING OF ROLLS

Korsunov K. A., Esselbakh R. V. ----- 47

TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX

SYSTEM JUSTIFICATION OF A NUMBER OF TYPES AND SIZES
OF THRESHER-SEPARATOR DEVICES FOR SELECTIVE GRAIN HARVESTERS
OF THE AXIAL-ROTOR TYPE

Pastukhov A. G., Bakharev D. N., Volvak S. F. ----- 54

IMPROVEMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM OF
COAL GAS GENERATORS USING THE "LURGI" PROCESS

Nikitin Yu. N., Chizhevskaya D. Yu., Dubasov A. V., Salo V. I. ----- 62

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 62 – 83

ОСОБЕННОСТИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПРИВОДОМ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И.

FEATURES OF STARTING MODES IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH ALTERNATING CURRENT DRIVE

Borisenko V. F., Sidorov V. A., Zemlyansky A. I.

Аннотация. Основная тенденция настоящего времени – широкое применение в качестве приводных машин переменного тока (асинхронных – АД, синхронных – СД, индукторных – ИД). Одним из недостатков этих машин можно считать большой электромагнитный момент на начальном этапе пуска ($3,0 - 5,0 M_n$), с другой стороны, при переходе в режим противовключения ($5,0 - 7,0 M_n$). Такие величины действуют кратковременно и не могут вывести систему из работоспособного состояния, но способствуют накоплению усталостных деформаций в звеньях электромеханических систем (ЭМС), что приводит к сокращению срока службы и незапланированным затратам на реновацию. Ухудшению динамики ЭМС способствуют зазоры в передачах, увеличивая контактные деформации и упругие моменты в валопроводах. Переход от однодвигательного к многодвигательному приводу вносит свои коррективы в динамику пуска механизма, когда даже при небольших отличиях в параметрах валопроводов на суммирующей шестерне создаются знакопеременные упругие моменты с различной частотой. Основным интерес представляют переходные процессы при наличии в ЭМС звеньев, работающих на скручивание и растяжение. Отмеченные вопросы нашли отражение в данной статье.

Ключевые слова: пуск, асинхронный двигатель, синхронный двигатель, электромеханическая система, момент электромагнитный.

Abstract. The main trend of the present time is the widespread use as AC drive machines (asynchronous AD, synchronous SD, inductor ID). One of the disadvantages of these machines can be considered a large electromagnetic torque at the initial stage of start-up ($3.0 - 5.0 M_n$), on the other hand, when switching to the counter, switch mode ($5.0 - 7.0 M_n$). Such forces act for a short time and cannot bring the system out of working condition, but they contribute to the accumulation of fatigue deformations in the links of electromechanical systems (EMC), which leads to a shorter service life and unplanned renovation costs. The gaps in the gears contribute to the deterioration of the EMC dynamics, increasing contact deformations and elastic moments in the shaft lines. The transition from a single – motor to a multi – motor drive makes its own adjustments to the dynamics of starting the mechanism,

where even with small differences in the parameters of the shaft lines, alternating elastic moments with varying frequency are created on the summing gear. The main interest is transients in the presence of twisting and stretching links in the EMC. These issues are reflected in this article.

Key words: *startup, asynchronous motor, synchronous motor, electromechanical system, electromagnetic torque.*

Введение. Пусковые режимы для электромеханических систем на протяжении длительного времени представляют особый интерес из-за возникающих быстротекущих процессов электромагнитного и механического взаимодействия, приводящих к значительным перегрузкам и накоплению усталостных повреждений при появлении неисправностей. Это подтверждается целым рядом классических работ 70 – 80-х годов прошлого века [1...10] и современными исследованиями XXI-го века [11...16]. Существуют два основных направления для использования полученных результатов – это развитие теории автоматического управления [17...24] и диагностирование технического состояния [25...26]. Результаты данного краткого литературного обзора показывают актуальность вопроса, рассматриваемого в статье с целью получения качественной оценки состояния сложной ЭМС на основании временных реализаций вибрационного сигнала при запуске в дополнении к учёту электромагнитных явлений в двигателе.

Основные способы (рис. 1) пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД с к. з. р.): прямой пуск от сети, пуск переключением со звезды на треугольник, пуск с помощью пускового трансформатора, пуск с добавочным сопротивлением (активным R_d

или индуктивным X_d) в цепи статора, пуск плавным подъёмом питающего напряжения (от регулятора напряжения ТРН), пуск от преобразователя частоты (ПЧ).

Запуск двигателей с фазным ротором не вызывает проблем – в цепь ротора на время пуска вводятся добавочные активные или индуктивные сопротивления. В ряде случаев рассматриваются схемы с импульсным регулированием сопротивления в цепи ротора, а также включение в цепь ротора преобразователя частоты. Синхронные двигатели в настоящее время получают всё более широкое применение. Это связано с тем, что при питании от преобразователя частоты появляется возможность регулирования частоты вращения в относительно широких пределах. С другой стороны, применение систем прямого управления моментом DTC, дало возможность акцентировать управление только на цепи статора, предполагая постоянство потока ротора. СД не является потребителем реактивной энергии, в случае недогрузки двигателя – может работать в качестве компенсатора.

Для СД можно назвать следующие способы пуска: прямой асинхронный пуск от сети; асинхронный пуск через реактор или автотрансформатор; частотный пуск (от преобразователя частоты – ПЧ); пуск с помощью разгонного двигателя (рис. 2).

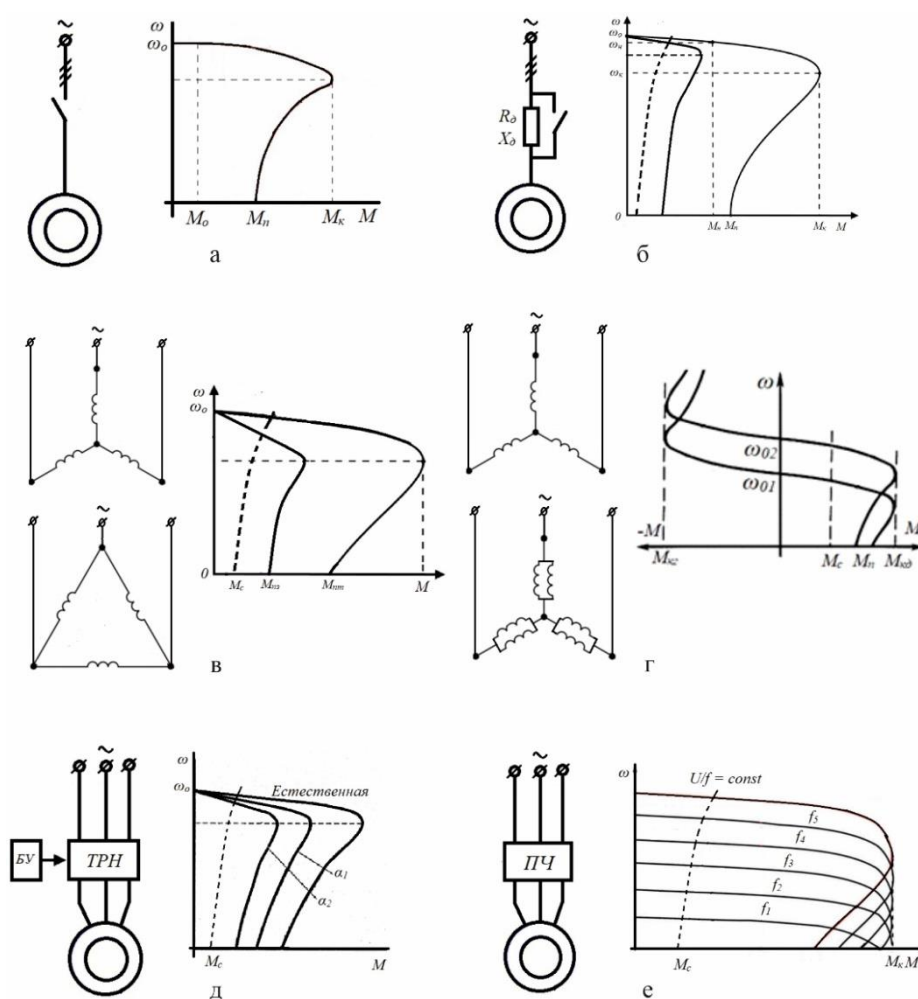


Рис. 1. Типовые схемы пуска АД и соответствующие им механические характеристики: а) прямой пуск; б) пуск с добавочным сопротивлением; в) переход со «звезды» на «треугольник»; г) переход со «звезды» на «двойную звезду»; д) пуск с питанием от регулятора напряжения – ТРН; е) по системе ПЧ – АД

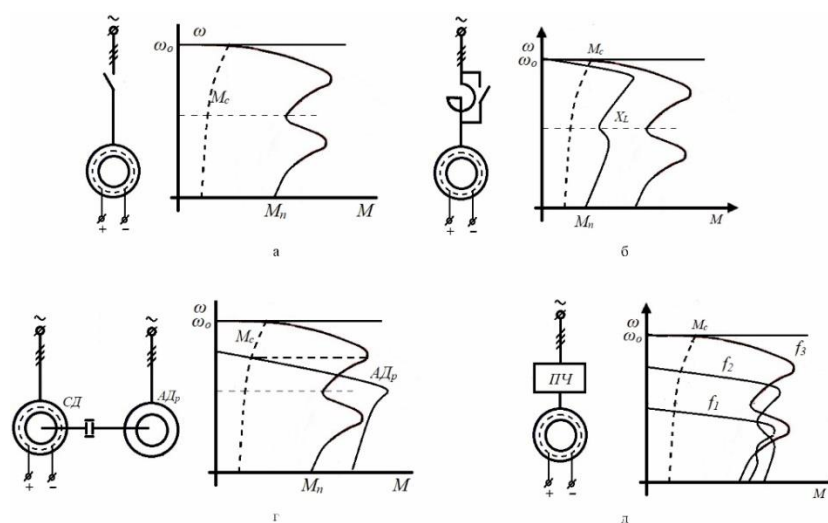


Рис. 2. Схемы пуска СД и соответствующие им механические характеристики: а) прямой пуск; б) пуск с помощью реактора; в) пуск с помощью разгонного двигателя; г) пуск от преобразователя частоты

При рассмотрении пусковых режимов системы электропривода наиболее часто начинают с определения времени разгона под действием постоянного динамического момента – $M_{дин}$. В случае $M_c = 0$, $\omega_{нач} = 0$, $J_\Sigma = const$, то

$$t_{p0} = J_\Sigma \frac{\omega_{кон}}{M_{дин}} \text{ или } \frac{J_\Sigma \omega_0^2}{\alpha M_n \omega_0} = \frac{J_\Sigma \omega_0^2}{\alpha P_n}, \quad (1)$$

откуда очевидно, что время разгона пропорционально кинетической энергии – $t_{n0} \equiv W_{кин}$. Для пуска с $M_c = const$:

$$t_n = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_c}{\alpha \cdot M_n - M_c}. \quad (2)$$

Принимая линейную зависимость $M_{дин}(\omega)$, для времени разгона в интервале $\omega_1 - \omega_2$ получаем выражение:

$$t = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин1} - M_{дин2}} \ln \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}}. \quad (3)$$

Для угла поворота системы в интервале скоростей $\omega_1 - \omega_2$ и $M_{дин} = const$ получаем:

$$\alpha_{1-2} = \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2M_{дин}}, \text{ рад}. \quad (4)$$

Для построения простейших механических переходных процессов при

нелинейных механических характеристиках двигателя и механизма применяют графические или графоаналитические методы. В настоящее время графические методы расчёта переходных процессов отошли на второй план, т.к. средства вычислительной техники позволяют решить эти задачи за более короткое время с учётом реальных характеристик двигателей и приводимых механизмов, учитываются электромагнитные явления в двигателях, упругие элементы и зазоры в механической части.

При исследовании динамики ЭМС двигатель переменного тока (трёхфазный) приводится к эквивалентной двухфазной модели, механическая часть представляется n -массовой моделью, в которой число расчётных масс, в зависимости от механизма и решаемой задачи, может приниматься равным $n = 2, 3, 4 \dots$. Наиболее часто прибегают к рассмотрению двухмассовой расчётной механической схемы, в которой учитываются упругие свойства и зазор (моменты инерции, силы сопротивления приводятся к частоте вращения двигателя – $\omega_{де}$). Типовые расчётные механические схемы имеют вид, представленный на рис. 3.

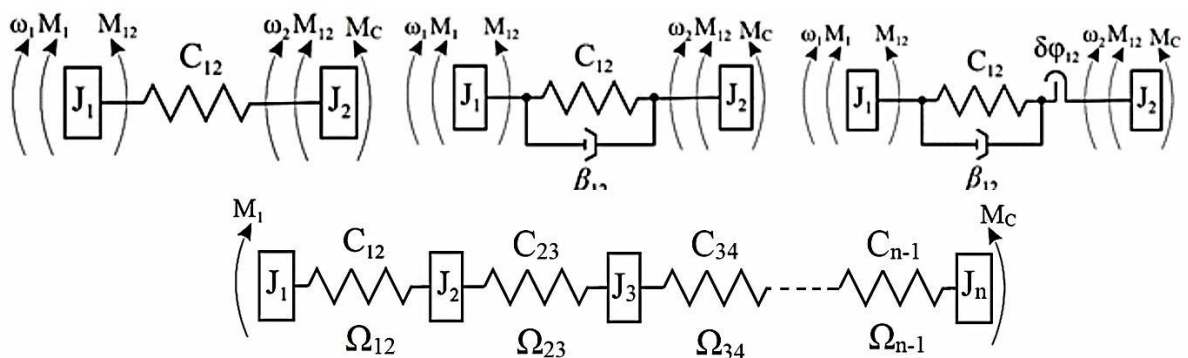


Рис. 3. Двух- и n -массовая не разветвлённые механические расчётные схемы

Для двухмассовой расчётной механической схемы собственная частота колебаний Ω определяется из выражения [4]:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 + J_2}}. \quad (5)$$

Уравнения движения для 2 массовых систем:

$$\begin{cases} M_1 - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} \\ M - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}, \\ M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \frac{d(\varphi_1 - \varphi_2)}{dt} = \omega_1 - \omega_2 \end{cases} \quad (6)$$

где J_1 – момент инерции первой массы; J_2 – момент инерции второй массы; ω_1 – частота вращения первой массы; ω_2 – частота вращения второй массы; M_1 – движущий момент первой массы; M_{12} – движущий момент второй массы; M_c – момент сопротивления механизма, приложенный ко второй массе; C_{12} –

коэффициент упругости между первой и второй массами; β_{12} – коэффициент вязкого демпфирования между первой и второй массами; φ_1 – текущее значение угла закручивания первой массы; φ_2 – текущее значение угла закручивания второй массы; $\delta\varphi_{12}$ – зазор в кинематической передаче.

В случае системы с зазором в уравнения необходимо добавить условие: движение в зазоре – упругий момент $M_{ynp} = 0$, после выбора зазора – $M_{ynp} = C \cdot \delta\varphi_{12}$.

Поведение электромеханической системы может быть описано также и уравнениями пространства состояний [17]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_x + B_u \\ y = C_x + D_u \end{cases} \quad (7)$$

На рис. 4 приведена детализированная (произведено выделение переменных состояния и их производных) структурная схема линеаризованной ($\delta\varphi_{12} = 0$) двухмассовой системы.

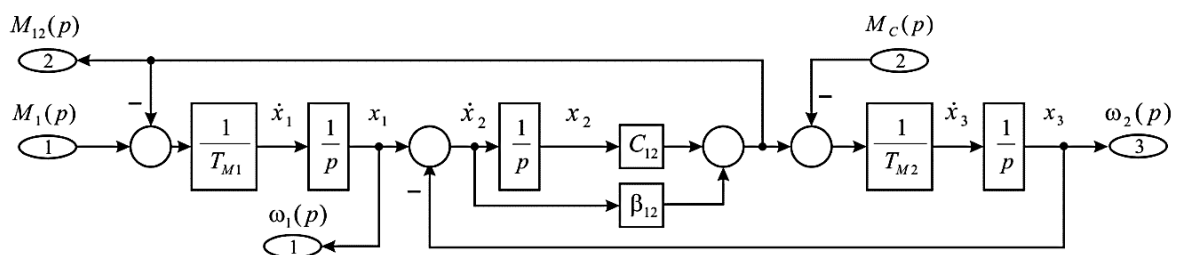


Рис. 4. Детализированная структурная схема двухмассовой системы

Для двухмассовой системы (рис. 4) члены, входящие в уравнение 7, примут вид [20]:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]; \quad y = [\omega_1 \quad M_{12} \quad \omega_2]; \quad u = [M_1 \quad M_c]. \quad (8)$$

Результаты расчета переходных процессов в двухмассовой системе, полученные по уравнениям (6) и (7) – (8),

идентичны. В качестве примера рассмотрена реакция системы на скачкообразное изменение входного

воздействия M_1 без учета демпфирующих свойств системы и при условии отсутствия зазора в кинематической передаче

(рис. 6, а), а также с учетом демпфирующих свойств (рис. 5, б).

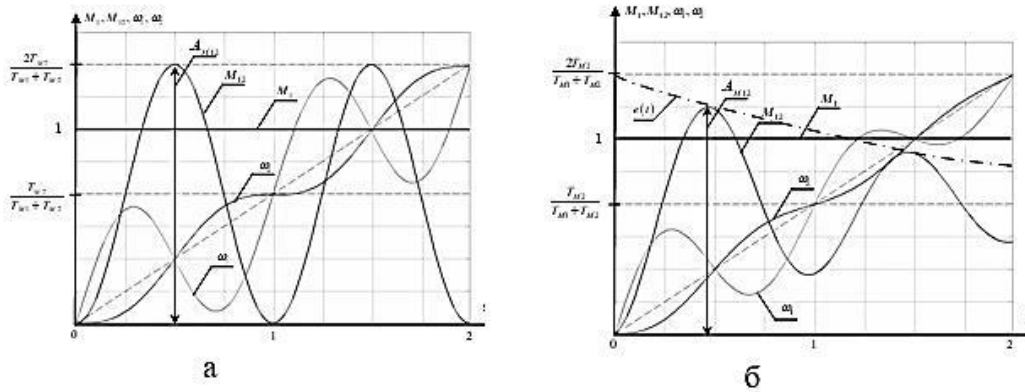


Рис. 5. Реакция системы на скачкообразное изменение M_1 :

а – при $\beta_{12} = 0, \delta\varphi_{12} = 0$; б – при $\beta_{12} \neq 0, \delta\varphi_{12} = 0$

Изменение величины коэффициента вязкого трения β_{12} не приводит к изменению частоты колебаний упругого момента M_{12} .

Характер изменения M_{12} при числе расчётных масс $n = 3, 4$ остаётся практически неизменным (рис. 6).

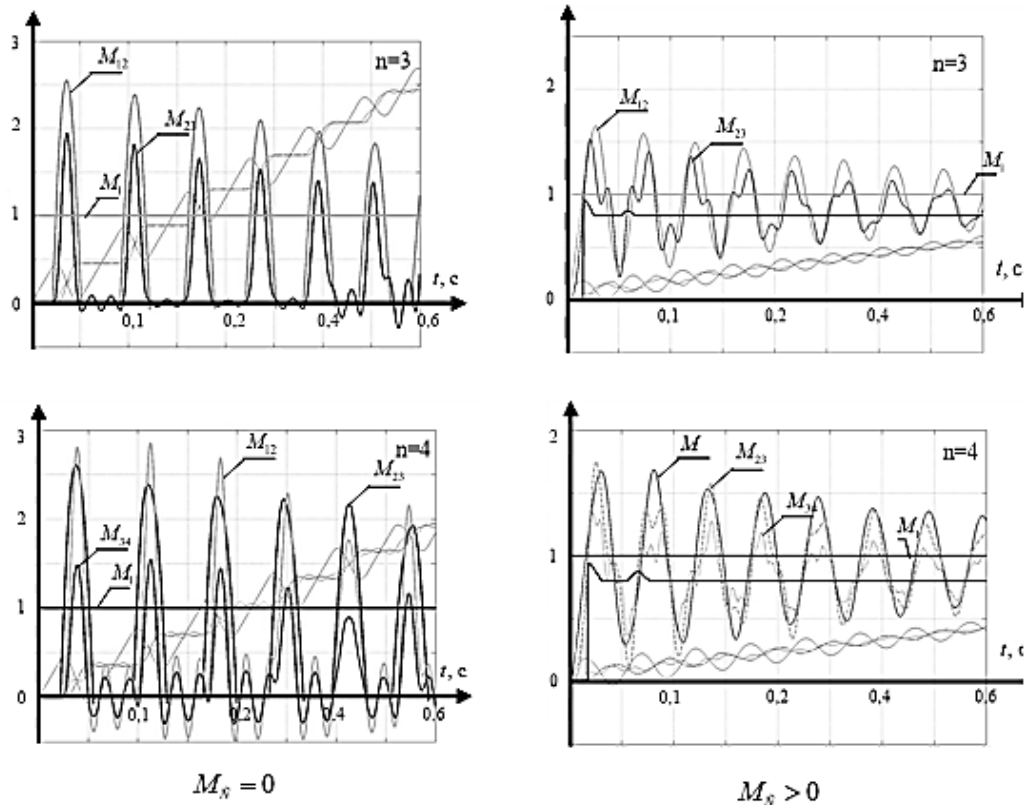


Рис. 6. Пуск упругих систем при числе расчётных масс $n = 3, 4$

С точки зрения выбора зазора в передаче, качественно лучшие условия наблюдаются в системах, работающих под нагрузкой, чем вхолостую, так в последнем случае можно наблюдать явление «раскрытия» зазора, которое не проявилось в случае работы системы при $M_{\tilde{N}} > 0$.

В теории электромагнитных переходных процессов электрических машин рассматривается общий случай, когда координатная система вращается с

произвольной скоростью ω_K . При решении прикладных задач обычно используют одну из трёх координатных систем: первая – $d, q, \theta, \omega_K = \omega$; вторая – $x, y, \theta, \omega_K = \omega_0$; третья – $\alpha, \beta, \theta, \omega_K = 0$. Выбор координатной системы зависит от конкретной задачи [8]. Для задач электропривода наиболее предпочтительна вторая, так как напряжения U_{x1} и U_{y1} будут постоянными величинами. Формируем уравнения относительно потокоцеплений:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{x1}}{dt} = U_m \cos \gamma - \omega_0 \alpha'_s \psi_{x1} + \omega_0 \alpha'_s k_r \psi_{x2} + \omega_0 \psi_{y1} \\ \frac{d\psi_{y1}}{dt} = U_m \sin \gamma - \omega_0 \alpha'_s \psi_{y1} + \omega_0 \alpha'_s k_r \psi_{y2} - \omega_0 \psi_{x1} \\ \frac{d\psi_{x2}}{dt} = -\omega_0 \alpha'_r \psi_{x2} + \omega_0 \alpha'_r k_s \psi_{x1} + \omega_0 S \psi_{y2} \\ \frac{d\psi_{y2}}{dt} = -\omega_0 \alpha'_r \psi_{y2} + \omega_0 \alpha'_r k_s \psi_{y1} - \omega_0 S \psi_{x2} \\ M = \frac{3}{2} p \omega_0 \frac{k_r}{\sigma X_s} (\psi_{x2} \psi_{y1} - \psi_{x1} \psi_{y2}) / \end{cases}, \quad (9)$$

где $\alpha'_s = a_s / \sigma$; $a_s = r_1 / X_s$; $k_s = X_0 / X_s$; $\sigma = 1 - k_r k_s$;

$\alpha'_r = a_r / \sigma$; $a_r = r_2 / X_r$; $k_r = X_0 / X_r$; r_1, r_2, X_s, X_r, X_0 – активные и индуктивные сопротивления; S – скольжение.

При моделировании поведения электромеханической системы рассматриваются совместно системы уравнений (6) и (9). На рис. 7 приведены зависимости $M(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД типа 4A225M2У3, а также – динамическая характеристика. Пуск двигателя на фиксированной частоте питающего напряжения (рис. 8).

Кратность пусковых моментов $M_{эм}$ лежит в пределах 3 – $5M_n$, в режиме противовключения – может достигать 5 – $7M_n$. Экспериментально были зафиксированы значения в 7 – 11 раз выше

M_n , эти значения были получены при использовании быстродействующих электронных переключателей (случай незатухающего магнитного поля). Параметры асинхронного двигателя при моделировании режима пуска следует рассчитывать для скольжения $S = 1$, в случае режима противовключения для $S = 2$. При этих величинах скольжения имеет место хорошее совпадение экспериментальных кривых $M(t)$, $\omega(t)$ с последними, полученными в результате моделирования [3].

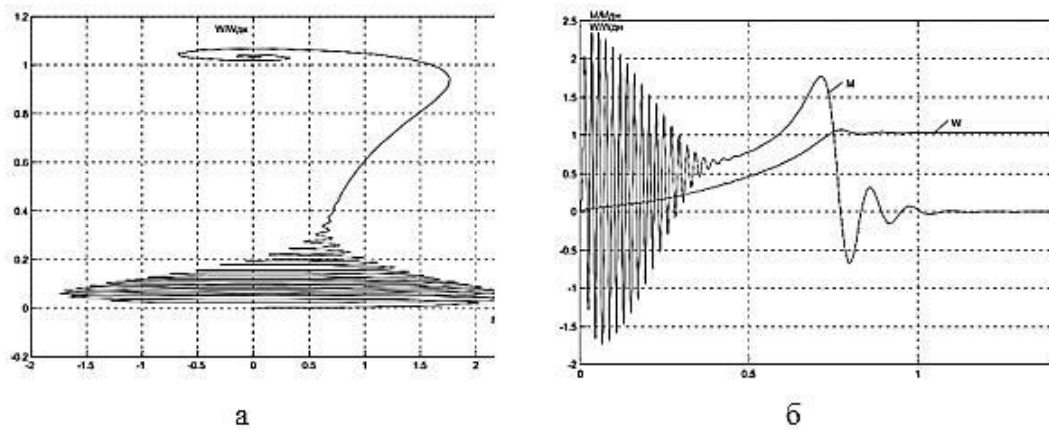


Рис. 7. Динамическая механическая характеристика (а) и зависимости $M(t)$, $\omega(t)$ (б) при пуске АД

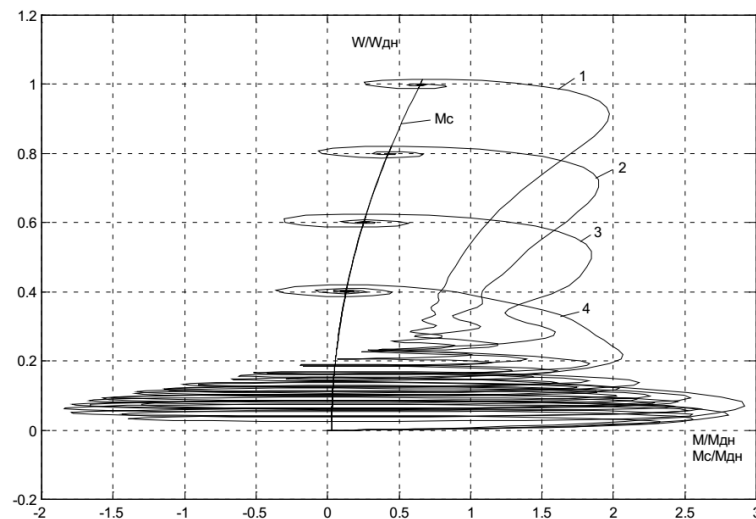


Рис. 8. Пуск двигателя на фиксированной частоте питающего напряжения

Запуск электромеханической системы возможен при определённых значениях приведенного момента инерции механизма $J_{\text{макс.мех.}}$. Эта величина определяется на базе эквивалентного момента инерции J_0 (задаётся заводом – изготовителем).

$$J_{\text{макс.мех.}} = J_0 \left(1 - \frac{M_c}{M_{\text{пуск}}} \right) k - J_{\text{об}}, \quad (10)$$

где M_c – средний момент сопротивления за время пуска; k – зависит от числа пусков, при одном пуске $k = 1$; двух – $k = 0,6$; трёх – $k = 0,4$.

Коэффициент k косвенно учитывает тепловые возможности двигателя.

Анализируя кривую электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ можно сделать вывод о том, что при низких скоростях затухание $M_{\text{эм}}$ незначительное, существенное – при высоких скоростях. При пусках ЭМС с АД и большой присоединённой массой зона колебательности $M_{\text{э.м}}$ возрастает, т.к. длительное время двигатель работает на малых скоростях.

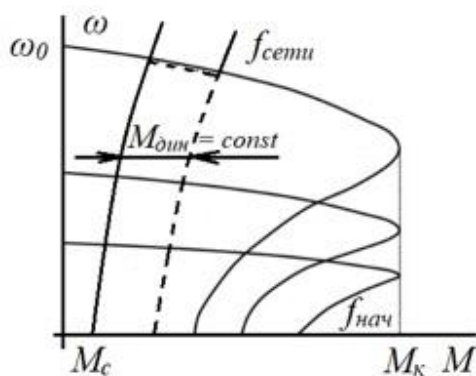
Подавление пусковых $M_{\text{эм}}$ возможно как за счёт введения добавочных сопротивлений в цепи статора и ротора, так и за счёт аппаратных средств,

формирующих плавный безударный пуск. Наиболее простым решением является пуск от тиристорного пускателя, а также в случае переключения со «звезды» на «треугольник» [5, 7, 15].

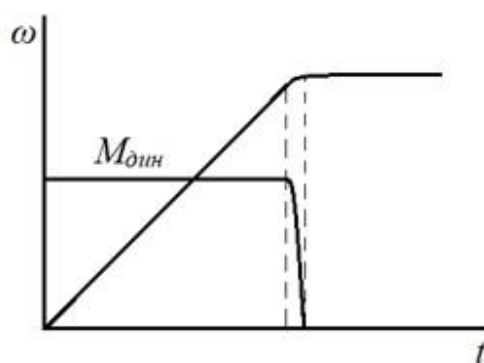
Оптимальным решением будет применение системы ПЧ-АД с формированием желаемого закона изменения момента двигателя и частоты вращения, причём в этом случае можно существенно повысить частоту включений, не опасаясь перегрева двигателя (рис. 9).

Тиристорные пускатели выпускаются на широкий диапазон мощностей (по току – от нескольких ампер до тысяч). Каждый

пускатель имеет свою токовую уставку (степень ограничения пускового тока), которая выбирается в зависимости от мощности АД, от условий пуска механизма, от мощности питающей сети и ряда других требований (условий). Примеры прямого пуска вентилятора от пускателя ПБТ 500/380 –УХЛ4 приведены на осциллограммах рис. 10 и рис. 11. Очевидно, что при пуске через ПБТ время разгона будет выше – в нашем примере $t_{\text{прямой}} = 20$ с, $t_{\text{ПБТ}} = 52$ с (двигатель ВА02 – 280М4, $P_n = 160$ кВт). Условия пуска вентилятора – входная задвижка открыта на 20%, выходная – открыта полностью.



а



б

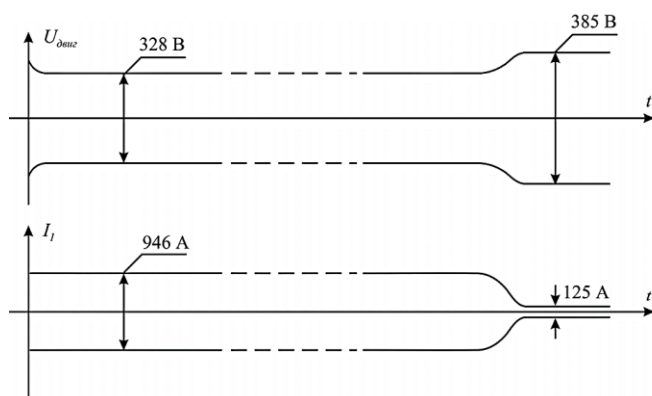
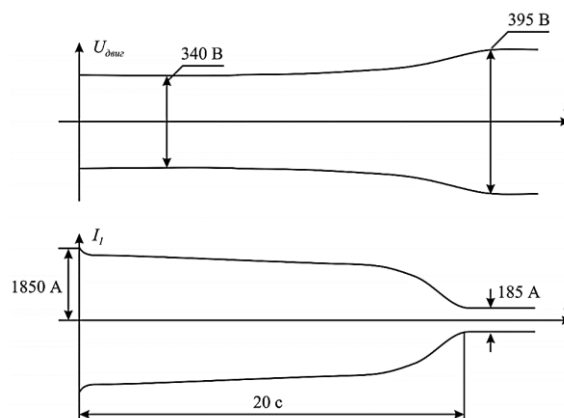
Рис. 9. Пуск двигателя при $f = f(t)$ и $M_{\text{дин}} = \text{const}$ Рис. 10. Пуск от пускателя ПБТ 500/380, $t_{\text{п}} = 52$ с

Рис. 11. Пуск прямым включением двигателя на сеть

Для двигателей малой и средней мощностей часто для снижения пусковых бросков тока (момента) применяют переключение со «звезды» на «треугольник» [2, 4, 5]. Нами был проанализирован пусковой режим ЭМС винтового компрессора при переключении схемы соединения обмоток статора двигателя со «звезды» на «треугольник» с целью определить влияние электромагнитных переходных процессов на характер разгона на базе фиксации вибрационных показателей в этот период по осям x , y , z (датчики устанавливались на приводном двигателе винтового компрессора – двигатель КА –7315L –

АВО1В –301, $P_n = 200$ кВт, $n_n = 2975$ мин⁻¹) [26].

Для двигателя КА7315L отсутствуют данные по пусковым величинам I_n/I_n и M_k/M_n , а также $J_{об}$, поэтому для предварительных расчётов названные выше величины были взяты из каталожных данных двигателя А102 –2М, 380 В, $P_n = 200$ кВт, $I_n^* = 6,0$; $M_n^* = 1,2$; $M_k^* = 2,3$; $I_{пот} = 2,5$ кг·м²[20]. Для двигателя КА –7315L номинальное скольжение $S_n = 0,832\%$, $S_{ке} = 3,64\%$, номинальный момент $M_n = 648$ Н·м. Типовая механическая характеристика двигателя имеет вид, показанный на рис. 12.

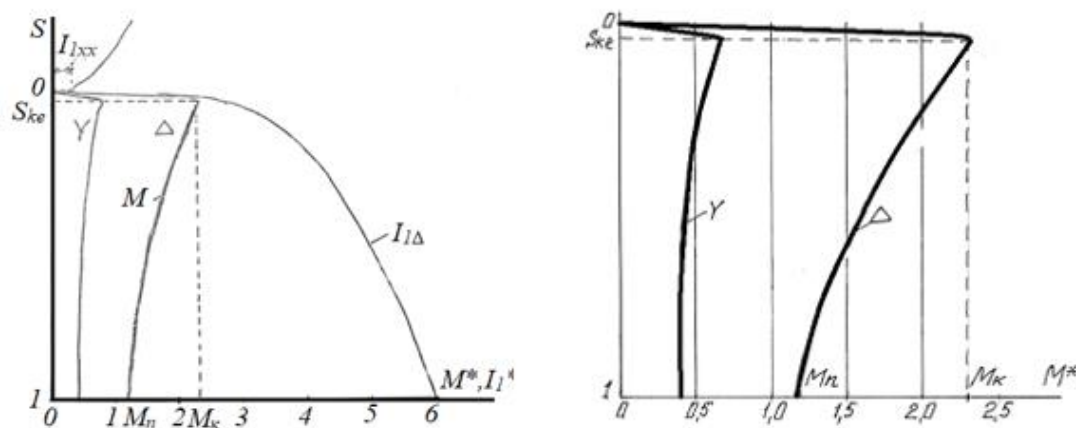


Рис. 12. Механическая характеристика двигателя КА –7315 L при соединениях «звезда» и «треугольник»

Очевидно, что при снижении напряжения на двигателе в первый момент в $\sqrt{3}$ (при соединении «звезда») в три раза снижается пусковой момент – с $1,2 M_n$ до $0,4 M_n$ (по статическим механическим характеристикам). Если учесть, что электромагнитный момент (пиковый) лежит в пределах $3...5 M_n$ для двигателей единой серии при пуске на U_n , то при снижении напряжения пики $M_{эм}$ не превысят $1,0 - 1,6 M_n$, что является допустимым для большинства ЭМС. С

учётом M_c динамический момент $M_{дин}$ будет ниже M_n , что приведёт к снижению ускорения на начальном этапе разгона «звезда»), при переходе на «треугольник» при скоростях выше $0,3...0,5\omega$ практически будет отсутствовать электромагнитный переходной процесс.

Для двигателя привода КА7315L зафиксировано изменение формы вибрационного сигнала при запуске (рис. 14). В момент запуска зафиксирован размах ускорения в $8,3$ м/с², снизившийся до значения в $4,4$ м/с². В период работы на

соединении обмоток в «звезду» отмечается преобладание частоты в 100 Гц, а также биения с частотой 5 Гц. В момент переключения на «треугольник» фиксируется несколько колебаний с размахом до 10 м/с^2 . При работе по схеме «треугольник» остаются без изменений биения с частотой 5 Гц, основная частота снижается до 50 Гц, размах – до $2,0 \text{ м/с}^2$.

Данная реализация пуска ЭМС принимается в качестве «эталонной». В случае частоты 100 Гц можно заметить, что она носит электромагнитный характер, частота 50 Гц – практически совпадает с частотой вращения двигателя, а причина биений с частотой в 5 Гц требует уточнения источника происхождения.

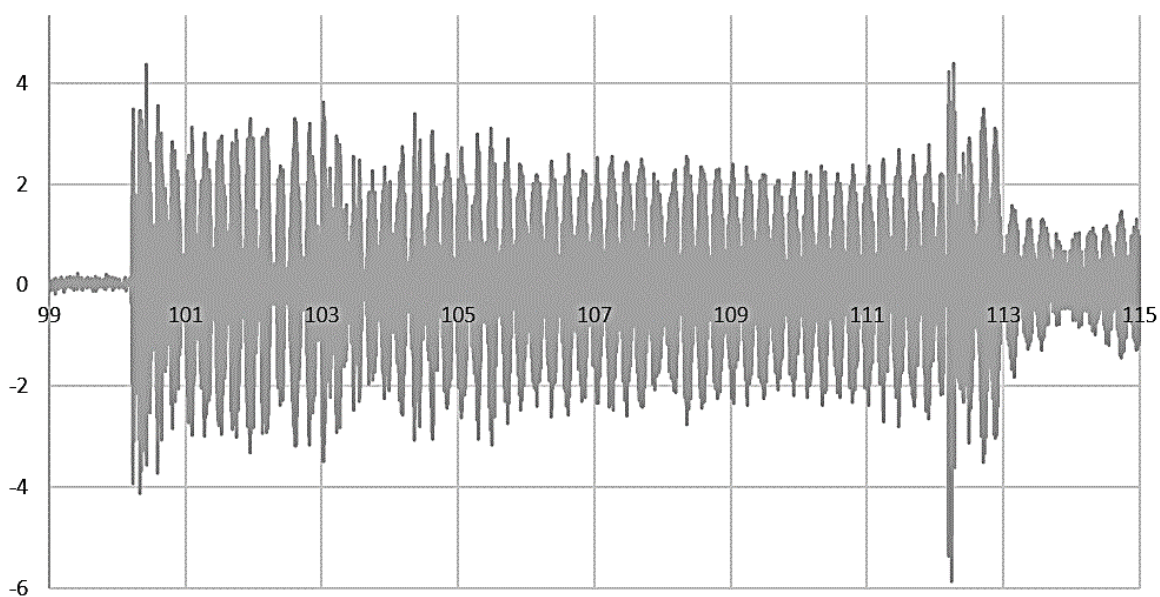


Рис. 13. Временная реализация виброускорения при запуске двигателя KA7315L при переключении «звезда» – «треугольник»

Зафиксированные вибрационные картины виброускорения привода вентиляторов позволяют предположить наличие взаимного влияния электромагнитных и механических колебаний, что определяет расширение возможностей безразборного диагностирования на переходных режимах. При прямом запуске вентилятора ДН –21ГМ (90 кВт, 600 об/мин) зафиксировано преобладание осевой составляющей (рис. 14). Резкий удар в момент пуска, последовательное чередование снижения и увеличения размаха колебаний позволяет сформировать справочник диагностических признаков относительно фактического состояния объекта.

Индивидуальность запуска каждого механизма подтверждается временной реализацией виброускорения при пуске вентилятора ДН –15 (75кВт, 1500 об/мин), приведенном на рис. 15. Медленное нарастание размаха колебаний свидетельствует о затяжном «тяжёлом» запуске, который усугубляется податливым основанием. Безусловно, конкретные значения размаха колебаний виброускорения также являются диагностическим симптомом. Однако анализ временных реализаций, несмотря на значительные успехи вибрационного диагностирования, пока остаётся трудно формализуемым процессом, что и составляет направление дальнейших исследований.

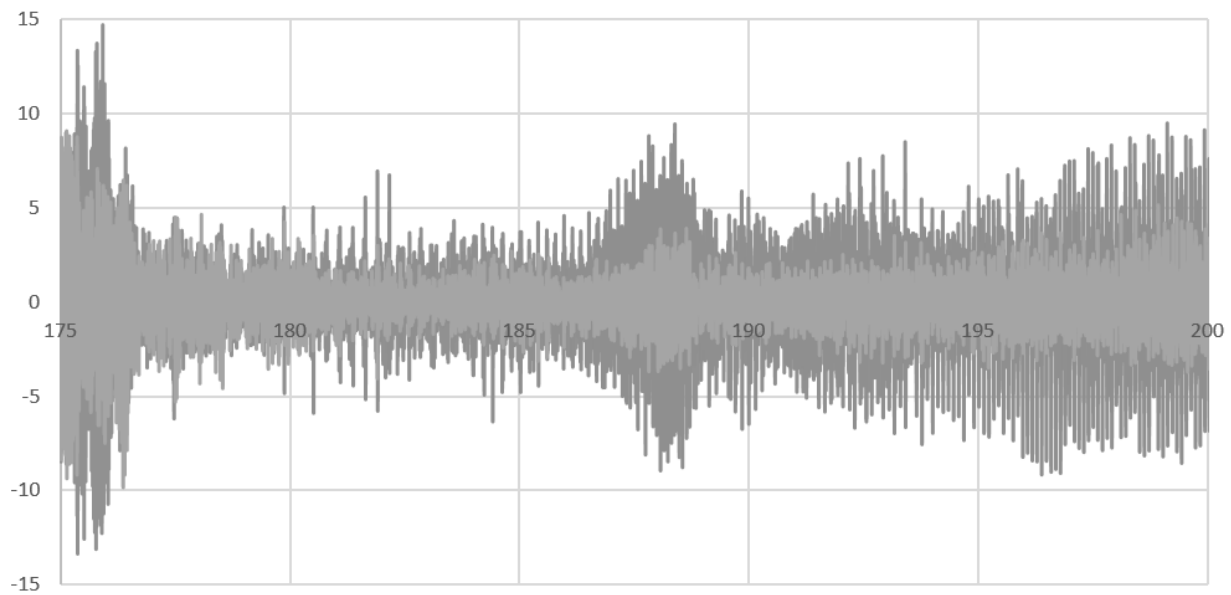


Рис. 14. Временная реализация виброускорения при прямом запуске двигателя привода вентилятора ДН –21ГМ (90 кВт, 600 об/мин)

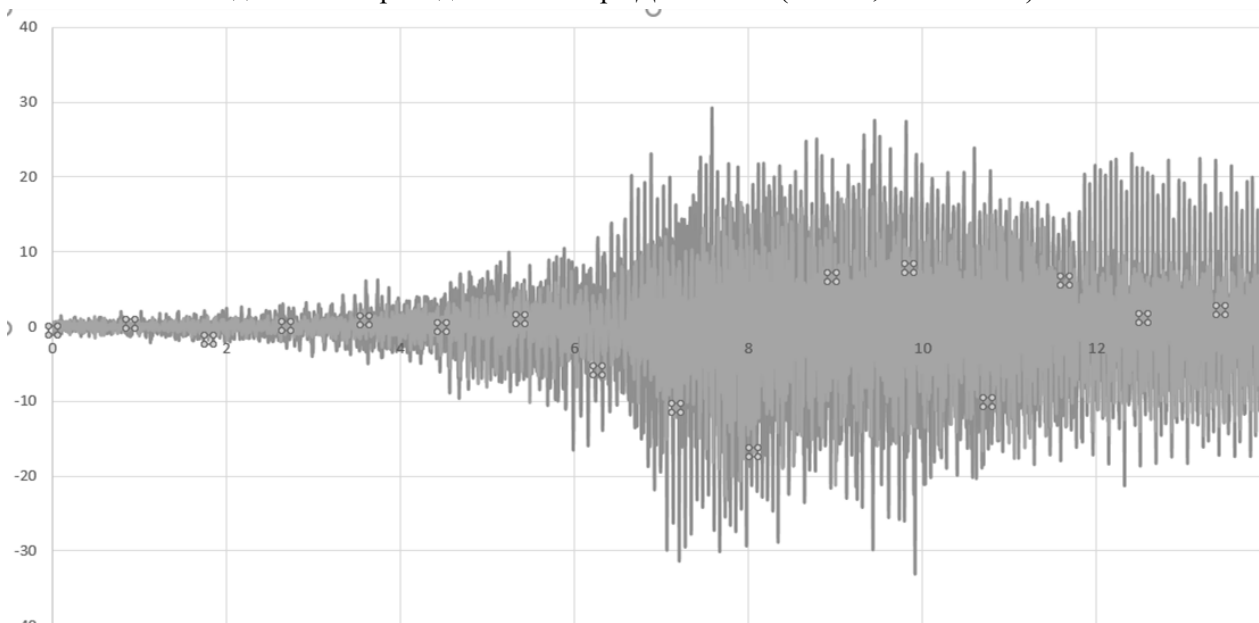


Рис. 15. Временная реализация виброускорения при прямом запуске двигателя привода вентилятора ДН –15 (75кВт, 1500 об/мин)

Выводы. 1. Качественная оценка поведения сложной ЭМС возможна только при учёте электромагнитных явлений в двигателе, упругих свойств механической системы, зазоров, естественного демпфирования.

2. Показатели вибродиагностирования позволяют судить об активности электромагнитных переходных процессов в двигателе в процессе пуска ЭМС (всплески

виброскорости и виброускорения в начале пуска и на этапах перехода с одной схемы включения двигателя на другую, при ступенчатом изменении частоты питающего напряжения).

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили оценить техническое состояние ЭМС и вынести решение о проведении конкретной ремонтной операции.

Список источников

1. Костенко М. П. Электрические машины : [учеб. пособие для энергет. и электротехн. вузов и фак.] / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Москва; Ленинград : Госэнергоиздат, 1957 – 1958. – 2 т.
2. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Режимы работы двигателей / И. А. Сыромятников ; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4 –е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе [Текст] / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. – М.: Энергия, 1967. – 201 с.
4. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода : [учебное пособие для вузов по специальности "Электропривод и автоматизация промышленных установок"] / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – Москва: Энергия, 1979. – 615 с.
5. Петров И. И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода [Текст] / И. И. Петров, А. М. Мейстель. – Москва: Энергия, 1968. – 264 с.
6. Wood W., Flynn F., Shanmugasandaram A. Transient torques in induction motors, due to switching of supply, Proc. IEE, v.112, № 7, 1965.
7. Jain G.C. Analytical study of the step starting and step running of a 3 –phase induction motor, Trans. IEEE on Power Apparatus and Systems, 1966, v.85, №2.
8. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: [Учебник для вузов по спец. "Электропривод и автоматизация пром. установок"]/В. И. Ключев, В. М. Терехов. – Москва: Энергия, 1980. – 359с.
9. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов [Текст]: Учебник для вузов по специальности "Электропривод и автоматизация пром. установок. – 3 –е изд., доп. и перераб. – Москва: Энергия, 1976. – 487с.
10. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С. Н. Вешеневский. – 6 –е изд., испр. – Москва: Энергия, 1977. – 431с.
11. Дмитриева В. Н., Горбунова А. А. Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №1 –2.
12. Кислицын А. Л., Дунаев Д. И., Жирнов С. Н. Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя // ЭС и К. – 2018. – №4 (41).
13. Арефьев В. И. Вибрации асинхронного двигателя при пуске. Электроцех, – №8, – 2018.
14. Сафиуллин Р. А., Янгиров И. Ф. Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – №2. DOI: 10.17122/1999 –5458 –2021 –17 –2 –41 –54.
15. Акопян К А., Власов А Е., Колодяжный В В., Платова М И. Исследование режима работы асинхронного двигателя модели «Аир132м2» с устройством плавного пуска // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2018. – №11 – 2.
16. Makarov V. N., Zagirova V., Vagapov G., & Grackova L. (2022). Identification of the Parameters of a Three –Phase Asynchronous Motor for Intelligent Monitoring Systems. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 59(2), 23–36. <https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0009>.
17. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.2 Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 464 с.
18. Попов Е.П., Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / Е.П. Попов, В.А. Бесекерский. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
19. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. 4 –е изд., пер. и доп. /Е.И. Юревич. – СПб.: ВHV, 2016. – 560 с.
20. Башарин А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин,

В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

21. Справочник по электрическим машинам: В 2 –х т. / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

22. Кузнецов Н. К. Динамика управляемых машин с дополнительными связями: монография / Н. К. Кузнецов. — Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2009. – 290 с. – ISBN 978 –5 – 8038–0574–8. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/23075.html>(дата обращения: 27.05.2025). – Режим доступа: для авторизир. пользователей

23. Симаков Г. М. Асинхронный регулируемый электропривод тягодутьевых машин: монография / Г. М. Симаков, М. А. Марченко. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – 176 с. – ISBN 978–5–7782–3268 –6. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/91185.html> (дата обращения: 27.05.2025).

24. Ким К. К. Переходные процессы в асинхронной машине : монография / К. К. Ким, К. И. Ким. – Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 82 с. – ISBN 978-5-4497-2441-0. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/135241.html> (дата обращения: 27.05.2025).

25. Никитин Ю. Р. Диагностирование приводов технологических систем: монография / Ю. Р. Никитин. – Саратов : Вузовское образование, 2022. – 161 с. – ISBN 978-5-4487-0615-8. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/111589.html> (дата обращения: 25.05.2025).

26. ПНСТ 168 – 2016/ISO/DIS 13373-9. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин.

Часть 9 – Методы диагностирования электродвигателей.

References

1. Kostenko M. P. Electric machines : [textbook. a manual for the energy industry. and electrical engineering. universities and fac.] / M. P. Kostenko, L. M. Piotrovsky. – Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1957-1958. – 2 t.

2. Syromyatnikov I. A. Operating modes of asynchronous and synchronous motors. Engine operating modes / I. A. Syromyatnikov ; edited by L. G. Mamikonyants. – 4th ed., revised and an additional one – Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.

3. Electromagnetic transients in an asynchronous electric drive [Text] / M. M. Sokolov, L. P. Petrov, L. B. Masandilov, V. A. Ladenson. – Moscow: Energiya Publ., 1967. 201 p.

4. Chilikin M. G. Theory of automated electric drive : [textbook for universities specializing in electric drive and automation of industrial installations] / M. G. Chilikin, V. I. Klyuchev, A. S. Sandler. – Moscow: Energiya Publ., 1979. – 615 p.

5. Petrov I. I. Special modes of operation of an asynchronous electric drive [Text] / I. I. Petrov, A.M. Meistel. Moscow: Energiya Publ., 1968. 264 p.

6. Wood W., Flynn F., Shanmugasandaram A. Transient torques in induction motors, due to switching of supply, Proc. IEE, v.112, № 7, 1965.

7. Jain G.C. Analytical study of the step starting and step running of a 3-phase induction motor, Trans. IEEE on Power Apparatus and Systems, 1966, v.85, No. 2.

8. Klyuchev V. I. Electric drive and automation of general industrial mechanisms: [Textbook for universities on spec. "Electric drive and automation industry. installations"] / V. I. Klyuchev, V. M. Terekhov. – Moscow: Energiya Publ., 1980. – 359s.

9. Sokolov M. M. Automated electric drive of general industrial mechanisms [Text]: Textbook for universities specializing in "Electric drive and automation of industrial machinery. installations. – 3rd ed., additional and revised Moscow: Energiya Publ. – 1976. – 487 p.

10. Vyoshenevsky S. N. Characteristics of motors in an electric drive [Text] / S. N. Vyoshenevsky. – 6th ed., ispr. Moscow: Energiya Publ., 1977. 431s.
11. Dmitrieva V. N., Gorbunova A. A. Investigation of the starting modes of an asynchronous unbalanced vibration motor // *Izvestiya vuzov. Energy problems.* – 2008. – №1 –2.
12. Kislitsyn A. L., Dunaev D. I., Zhirnov S. N. Investigation of capacitor counter-switching in the braking mode of an asynchronous vibration motor. – 2018. – №4 (41).
13. Arefyev V. I. Vibrations of an asynchronous motor during start-up. *Electrical workshop*, – №8, – 2018.
14. Safiullin R. A., Yangirov I. F. Investigation of vibration of an asynchronous electric motor // *Electrotechnical and information complexes and systems.* 2021. №2. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-41-54.
15. Hakobyan K. A., Vlasov A. E., Kolodyazhny V. V., Platova M. I. Investigation of the operating mode of the asynchronous motor model "Air132m2" with a soft starter // *International Journal of Humanities and Natural Sciences.* – 2018. – №11 -2.
16. Makarov V. N., Zagirova V., Vagapov G., & Grackova L. (2022). Identification of the Parameters of a Three –Phase Asynchronous Motor for Intelligent Monitoring Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 59(2), 23–36. <https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0009>.
17. Kim D. P. Theory of automatic control. Vol. 2 Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems: Textbook. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 464 p.
18. Popov E.P., Besekersky V.A. Theory of automatic control systems / E.P. Popov, V.A. Besekersky. – 4th ed., revised. St. Petersburg: Publishing house "Profession", 2003. 752 p.
19. Yurevich E.I. Theory of automatic control. 4th ed., translated and supplemented /E.I. Yurevich. – St. Petersburg: BHV, 2016. – 560 p.
20. Basharin A.V. Control of electric drives / A.V. Basharin, V.A. Novikov, G.G. Sokolovsky. – L.: Energoizdat, Leningrad. publishing house, 1982. – 392 p.
21. Handbook of electric machines: In 2 volumes / Under the general editorship of I.P. Kopylov, B.K. Klovov. Vol. 1. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 456 p.
22. Kuznetsov N. K. Dynamics of controlled machines with additional connections: a monograph / N. K. Kuznetsov. – Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2009. – 290 p. – ISBN 978-58038-574-8. – Text : electronic // IPR SMART digital educational resource: [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/23075.html> (date of request: 05/27/2025). – Access mode: for authorization. users
23. Simakov G. M. Asynchronous adjustable electric drive of traction machines : a monograph / G. M. Simakov, M. A. Marchenko. — Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 2017. – 176 p. – ISBN 978-5-7782-3268-6. – Text : electronic // IPR SMART digital educational resource : [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/91185.html> (date of request: 05/27/2025). – Access mode: for authorization. users
24. Kim K. K. Transients in an asynchronous machine : a monograph / K. K. Kim, K. I. Kim. – Moscow : AI Art Media, 2023. – 82 p. – ISBN 978-544972441-0. – Text : electronic // Digital educational resource IPR SMART : [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/135241.html> (date of request: 05/27/2025). – Access mode: for authorization. Users
25. Nikitin Yu. R. Diagnostics of drives of technological systems : a monograph / Yu. R. Nikitin. – Saratov : Higher Education, 2022. – 161 p. – ISBN 978-5-4487-0615-8. – Text : electronic // IPR SMART digital educational resource : [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/111589.html> (date of request: 05/25/2025). – Access mode: for authorization. users
26. PNST 168-2016/ISO/DIS 13373-9. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration monitoring of the condition of machines. Part 9 – Methods for diagnosing electric motors.

Статья поступила в редакцию 21.06.2025

Информация об авторах

Борисенко Владимир Филиппович, к.т.н., доцент, профессор кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” (ЭАПУ) Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), г. Донецк, ДНР.
SPIN-код: 5895-9776, AuthorID: 850557
E-mail: borissenko.vp@gmail.com

Сидоров Владимир Анатольевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры “Механическое оборудование заводов чёрной металлургии” (МОЗЧМ) Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), г. Донецк, ДНР.
SPIN-код: 2618-4815, AuthorID: 848732
E-mail: sidorov_va@ukr.net

Землянский Андрей Игоревич, ассистент кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” (ЭАПУ) Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), г. Донецк, ДНР.
SPIN-код: 8480-3674, AuthorID: 851068
E-mail: andrewiz@yandex.ru

Information about the authors

Borisenko Vladimir Filippovich, candidate of technical sciences, associate professor, professor of «Electric drive and automation of industrial installations», Donetsk National Technical University (DonNTU), Donetsk.
SPIN-код: 5895-9776, AuthorID: 850557
E-mail: borissenko.vp@gmail.com

Sidorov Vladimir Anatolyevich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of «Mechanical equipment of ferrous metallurgy plants», Donetsk National Technical University (DonNTU), Donetsk.
SPIN-код: 2618-4815, AuthorID: 848732
E-mail: sidorov_va@ukr.net

Zemlyansky Andrey Igorevich, assistant of «Electric drive and automation of industrial installations» (EAI), Donetsk National Technical University (DonNTU), Donetsk.
SPIN-код: 8480-3674, AuthorID: 851068
E-mail: andrewiz@yandex.ru

Для цитирования:

Борисенко В.Ф., Сидоров В.А., Землянский А.И. Особенности пусковых режимов в электромеханических системах с приводом на переменном токе // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 5-20.

For citation:

Borisenko V.F., Sidorov V.A., Zemlyansky A.I. Features of starting modes in electromechanical systems with alternating current drive // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 5-20.

УДК 621.437

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ 6Ч12/14 С КОМПРЕССОРОМ КАСКАДНО-ТЕПЛОВОГО СЖАТИЯ

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

WORKING PARAMETERS OF THE DIESEL 6 FS12/14 WITH A CASCADE THERMAL COMPRESSION COMPRESSOR

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

Аннотация. Рассмотрены показатели работы эжекционной системы наддува каскадно-теплового сжатия (ЭСН) в составе двигателя 6Ч12/14. Применение ЭСН позволяет преобразовывать тепловую энергию выхлопных газов в энергию сжатого воздуха. Исследовались две модификации ЭСН-10 и ЭСН-11 с дизелем 6Ч12/14. Результаты показали прирост крутящего момента до 12.2%, снижение удельного расхода топлива на 6 г/кВт·ч, уменьшение выбросов сажи на 32% и СО на 31%, стабильность работы в широком диапазоне нагрузок. Преимуществами системы являются простота конструкции, отсутствие сложных механизмов газораспределения, надежность. Перспективы связаны с оптимизацией уплотнений и применением термостойких материалов ротора. Результаты подтверждают целесообразность внедрения ЭСН для повышения энергоэффективности транспортных и стационарных энергоустановок.

Ключевые слова: утилизация теплоты, каскадно-тепловое сжатие, наддув., тепловая энергия, эжекционная система, ротор.

Abstract. The article is dedicated to the experimental study of the ejector boost system of cascade-thermal compression (EBS), developed for the utilization of secondary heat from the exhaust gases of internal combustion engines. It was found that the use of EBS allows for the conversion of thermal energy from exhaust gases into compressed air energy, thereby increasing engine efficiency. The studies were conducted on a diesel engine 6Ч12/14 with modifications of ESC-10 and ESC-11. The results showed an increase in torque of up to 12.2%, a reduction in specific fuel consumption by 6 g/kW·h, a decrease in soot emissions by 32%, and CO by 31%, with stable operation over a wide range of loads. The advantages of the system include simple design, absence of complex gas distribution mechanisms, and reliability. Future prospects are associated with optimizing seals and using heat-resistant materials for the rotor. The results confirm the feasibility of implementing EBS to enhance energy efficiency in both transport and stationary power installations.

Keywords: heat recovery, cascade-thermal compression, supercharging, thermal energy, ejector system, rotor.

Введение. Повышение топливной технологии совершенствования рабочих экономичности остается ключевым процессов тепловых машин в рамках направлением развития двигателей для традиционных конструктивных решений транспортных средств. Существующие приблизились к пределу своих

возможностей. При этом существенный потенциал для повышения общего КПД энергетических установок связан с использованием вторичного тепла отработавших газов.

Для транспортных двигателей особую ценность представляют системы внутренней утилизации, способные преобразовывать сбросное тепло в дополнительную механическую энергию или повышать давление наддувочного воздуха. Однако массовому внедрению отработанных схем утилизации препятствуют такие факторы, как высокая стоимость, большие габариты оборудования, а также недостаточная эффективность работы, особенно в низкотемпературных тепловых контурах.

Данное обстоятельство определяет необходимость поиска новых схемотехнических решений для теплосиловых установок и систем утилизации, основанных на принципиально новых подходах к организации рабочего процесса. Такие системы должны обеспечивать эффективную работу при использовании разнообразных источников тепловой энергии, включая источники с относительно низким температурным потенциалом.

Одно из перспективных направлений развития теплопреобразующих устройств, разработанное на кафедре ДВС ЛГУ им. В. Даля, базируется на использовании принципа каскадно-теплового сжатия (КТС) рабочего тела в роторных агрегатах непрерывного действия. Принцип действия и основные особенности рабочего цикла таких агрегатов изложены в работах [1, 2]. Однако до настоящего времени отсутствуют экспериментальные данные о работе агрегата каскадно-теплового сжатия (КТС) в составе системы наддува ДВС,

использующей эжекцию атмосферного воздуха. В данной схеме согласование производительности компрессора с воздухопотреблением двигателя обеспечивается струйным насосом, в котором активной средой выступает воздух, нагнетаемый компрессором КТС (рис. 1).

Целью настоящего исследования является экспериментальное обоснование возможности повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания путем применения разработанной эжекционной системы наддува на основе каскадно-теплового сжатия.

Материалы исследования.

Эжекционная система наддува состоит из следующих компонентов: двигателя внутреннего сгорания 1, впускного коллектора 17, выпускного тракта 2, теплообменника-утилизатора 3 и компрессорного модуля 5. Канал отбора 12 сжатого воздуха соединен с ускоряющим соплом 1 эжекторного устройства, входной патрубок 14 которого сообщается с атмосферой, а смесительная камера 15 подключена к впускному коллектору 17.

Принцип работы системы заключается в последовательном преобразовании энергии отработавших газов. Выхлопные газы из цилиндров двигателя 1 поступают через выпускной тракт 2 в теплообменник-утилизатор 3, где передают тепловую энергию воздушному потоку, используемому в качестве рабочего тела в компрессорном модуле 5, после чего отводятся в атмосферу. В компрессорном модуле 5 происходит конверсия тепловой энергии выхлопных газов в энергию сжатого воздуха, который затем направляется к ускоряющему соплу 13 эжекторного устройства. Создаваемый высокоскоростной воздушный поток

индуцирует подсос атмосферного воздуха через входной патрубок 14, осуществляя передачу кинетической энергии. В процессе прохождения через смесительную камеру 15 и диффузорную секцию происходит выравнивание параметров потоков с преобразованием кинетической энергии в потенциальную энергию давления. Результирующий сжатый воздушный заряд подается во впускной коллектор 17 двигателя.

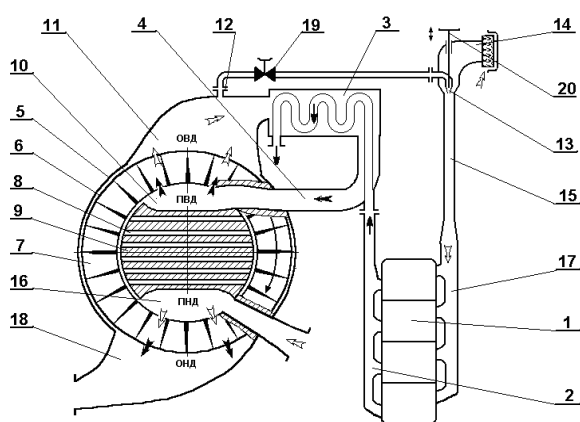


Рис. 1. Эжекторная система наддува (ЭСН):

1 – ДВС; 2 – выпускной тракт; 3 – теплообменник-утилизатор; 4 – вытеснительная магистраль; 5 – компрессионный модуль; 6 – ротор; 7 – ячейка ротора; 8 – канал; 9 – статор; 10 – подвод воздуха высокого давления; 11 – отвод воздуха высокого давления; 12 – канал отбора; 13 – ускоряющее сопло эжектора; 14 – входной патрубок; 15 – смесительная камера; 16 – подвод воздуха низкого давления; 17 – впускной коллектор; 18 – отвод воздуха низкого давления; 19 – кран; 20 – винт

Использование компрессорного модуля для обеспечения двигателя теплосиловой установки воздухом позволяет преобразовывать часть тепловой энергии отработавших газов в полезную энергию сжатого наддувочного воздуха. В отличие от турбонаддува, где сжатие воздуха в конечном итоге обеспечивается за счет работы поршневой группы, в данной системе избыточное давление на впуске создается при минимальном противодавлении на выпуске. Эта

особенность системы наддува с каскадно-тепловым сжатием способствует значительному повышению как КПД, так и мощности двигателя, благодаря улучшению качества продувки цилиндров и снижению затрат энергии на насосные ходы во время газообмена.

Далее представлены эксплуатационные характеристики дизельного двигателя, оснащенного двумя модификациями системы наддува – ЭСН-10 и ЭСН-11, с длиной ротора компрессорного модуля 0,1 м и 0,11 м соответственно. Испытания велись на стенде ЛГУ им. В. Даля, где ротор компрессорного модуля вращался с частотой 1500 об/мин и приводился в действие автономным электродвигателем. Для каждого режима работы компрессорного модуля были получены оптимальные величины отводимого к ускоряющему соплу расхода воздуха, которые соответствовали максимальному давлению наддува ДВС на каждом исследуемом режиме. По этим величинам строились нагрузочные и скоростные характеристики ДВС (рис. 2). Регулирование расхода воздуха $\bar{G}_{отб}$ осуществлялось винтом 20, вводимым в ускоряющее сопло 13 для изменения площади его сечения.

Сравнение внешних скоростных характеристик демонстрирует, что обе модификации системы наддува обеспечивают увеличение крутящего момента во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала. Максимальный прирост 55 Н·м (12,2%) крутящего момента дизеля составляет на номинальном режиме при использовании системы ЭСН-11. ЭСН-10 показывает немного меньший результат на этом же режиме – 42 Н·м (9,3%). В то же время в зоне низких скоростных режимов с 1300 мин⁻¹ видно преимущество крутящего момента дизеля с ЭСН-10 по сравнению с ЭСН-11. Так крутящий момент для ЭСН-10

и ЭСН-11 составляет 487 Н·м и 480 Н·м соответственно, против 450 Н·м у безнаддувного дизеля при частоте вращения 1100 мин^{-1} .

Как видим, использование системы наддува ЭСН-11, оптимизированной для номинальной мощности, целесообразно в основном для стационарных дизелей, а ЭСН-10, рассчитанную на пониженные скоростные режимы, целесообразно для транспортных дизелей, работающих в широком диапазоне скоростных режимов.

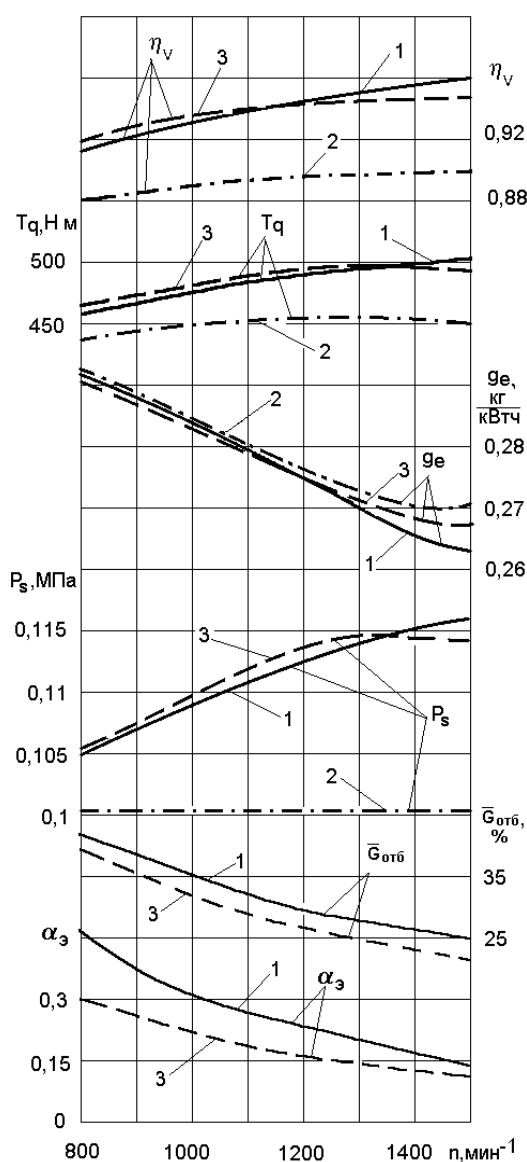


Рис. 2. Изменение параметров работы дизеля 6Ч12/14 в зависимости от его скоростного режима при ограничении температуры ОГ температурой в 750K: 1 – с ЭСН-11; 2 – без наддува; 3 – с ЭСН-10

При анализе результатов наблюдается неполное соответствие между приростом крутящего момента и увеличением плотности заряда в цилиндрах в конце такта наполнения. Например, при частоте вращения 1300 мин^{-1} использование системы ЭСН-10 обеспечивает увеличение крутящего момента на 8,4% по сравнению с базовым безнаддувным двигателем, тогда как плотность заряда возрастает лишь на 4,5%. Данное расхождение объясняется двумя основными факторами: улучшение продувки цилиндров способствует увеличению количества кислорода, участвующего в процессе сгорания, что подтверждается снижением содержания остаточных газов на 16%, повышение механического КПД на 0,8% вследствие снижения затрат энергии на газообменные процессы. Таким образом, дополнительный прирост крутящего момента достигается не только за счет увеличения плотности заряда, но и благодаря оптимизации рабочих процессов в цилиндрах и снижению механических потерь.

Повышение экономичности дизеля, оснащенного ЭСН, наблюдается во всем диапазоне нагрузок (рис. 3) и обусловлено главным образом ростом индикаторного КПД цикла за счет увеличения количества свежего воздуха или α . Например, при частоте вращения 1500 мин^{-1} и нагрузке 0,59 МПа (соответствующей номинальной для безнаддувного двигателя) система ЭСН-11 позволила повысить коэффициент избытка воздуха с 1,65 до 1,75 благодаря увеличению давления наддува до 0,113 МПа. В результате удельный эффективный расход топлива снизился на 6 г/кВт·ч, а эффективный КПД возрос на 2,9%, причем 2,2% из этого прироста обеспечено повышением индикаторного КПД.

По показателям заброса частоты вращения и времени стабилизации режима при ступенчатом изменении нагрузки оценивалось качество переходных процессов. Несмотря на незначительную задержку реакции компрессорного модуля, связанную с инерционностью теплообменных процессов в теплообменнике-утилизаторе и проточной части, длительность переходных процессов в основном определяется объемом воздушных трактов, которые служат основными аккумуляторами энергии в системе наддува.

Экспериментально подтверждено, что в 6Ч12/14 увеличение объема воздушного тракта в 1,6 раза в случае применения ЭСН сокращает время стабилизации скоростного режима до значений, близких к характеристикам безнаддувного двигателя.

Конкретные результаты исследований показывают:

- для модификации ЭСН-11 время стабилизации частоты вращения 1500 мин^{-1} при 50% нагрузке составляет 3,5 сек;
- для модификации ЭСН-10 аналогичный показатель достигает 3,6 сек;
- безнаддувный двигатель демонстрирует время стабилизации 3,4 сек.

Анализ экологических характеристик дизельного двигателя с ЭСН, выявляет существенное влияние системы на образование оксидов азота NO_x .

Согласно фундаментальным исследованиям Я. Б. Зельдовича, механизм образования NO_x заключается в цепных реакциях окисления атмосферного азота, происходящих после основного этапа сгорания топливно-воздушной смеси.

Главными факторами, определяющими интенсивность генерации NO_x , является повышение температурных показателей в камере сгорания, пропорционально

увеличивающих выход оксидов азота и избыток кислорода в продуктах сгорания, создающий благоприятные условия для образования NO_x .

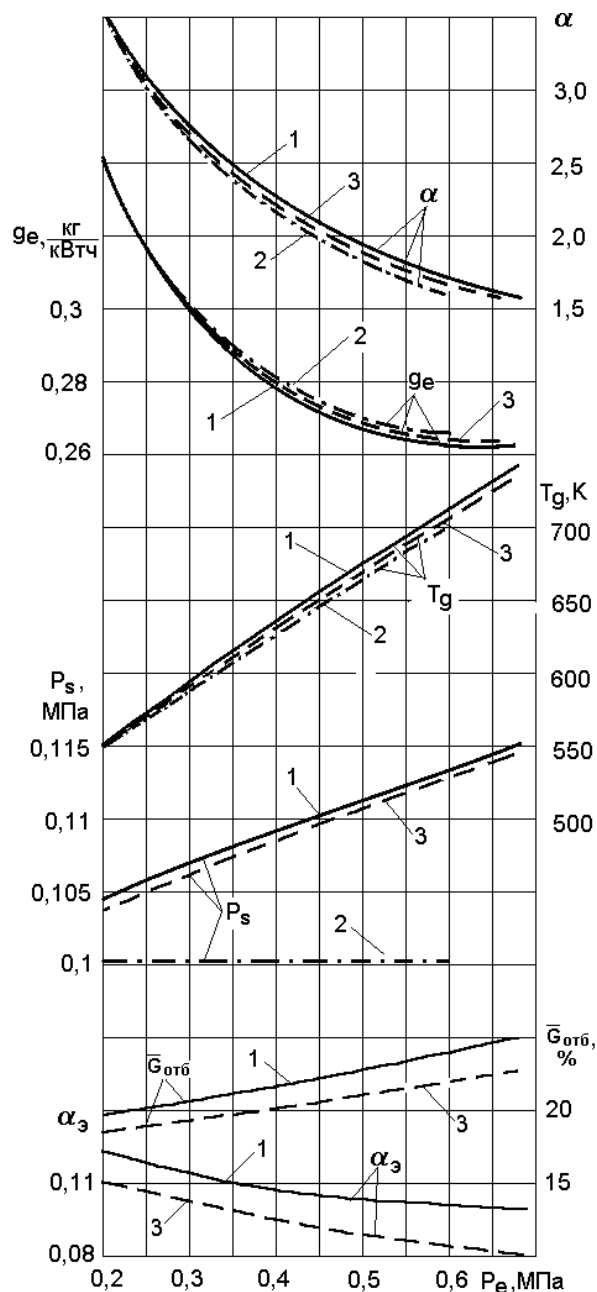


Рис. 3. Влияние нагрузки на показатели работы дизеля 6Ч12/14 при частоте вращения коленчатого вала $n=1500 \text{ мин}^{-1}$:

1 – с ЭСН-11; 2 – без наддува; 3 – с ЭСН-10

Наибольшие выбросы NO_x наблюдаются в зоне высоких нагрузок (0,8-0,95) от номинальной мощности), где

сочетаются высокие температурные режимы и избыток кислорода (рис. 4). Это обусловлено максимальным тепловыделением при сгорании, оптимальным коэффициентом избытка воздуха, достаточным временем для протекания термических реакций.

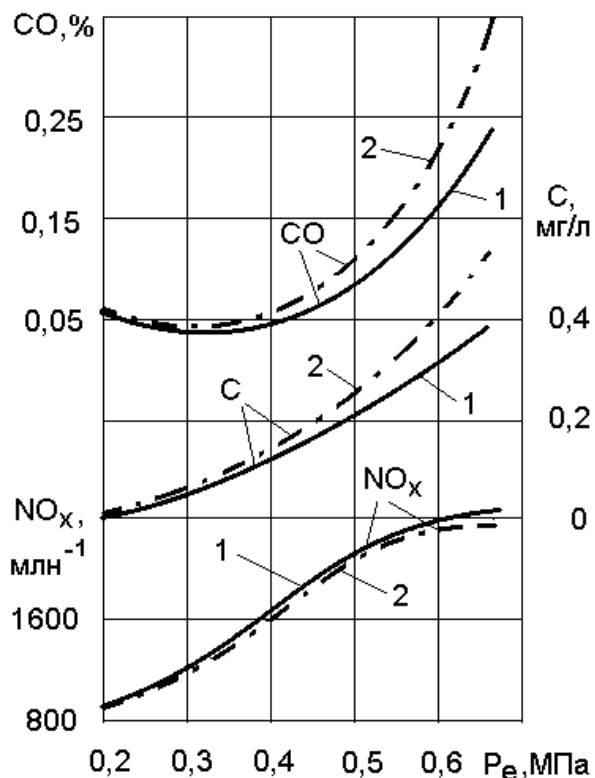


Рис. 4. Изменение выбросов токсичных компонентов в выпускных газах дизеля 6Ч12/14 по нагрузочной характеристике при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$: 1 — с ЭСН-11; 2 — без наддува

Для двигателей с ЭСН характерны следующие особенности образования NO_x : повышение давления наддува увеличивает плотность заряда и температуру сгорания, улучшенная продувка цилиндров обеспечивает большее содержание кислорода, рост механического КПД снижает относительную долю тепловых потерь. Таким образом, применение систем наддува требует особого внимания к контролю температурных режимов и

оптимизации состава рабочей смеси для минимизации экологической нагрузки.

Важно учитывать, что нагрузка 0,59 МПа достигается базовым двигателем при коэффициенте избытка воздуха 1,65, а ДВС с ЭСН-11 при 1,75. Поэтому сравнивать выбросы NO_x при одинаковой нагрузке для этих двигателей некорректно, так как номинальная нагрузка базового двигателя (0,59 МПа) является для дизеля с ЭСН-11 лишь частичной.

Для объективной оценки эмиссии NO_x необходимо сопоставлять режимы работы с одинаковым коэффициентом избытка воздуха. В этом случае увеличение выбросов оксидов азота в дизеле с ЭСН-11 по сравнению с базовым двигателем объясняется исключительно ростом температуры сгорания из-за повышенного давления наддува.

На номинальном режиме работы дизеля с ЭСН-11 (при коэффициенте избытка воздуха 1,65) повышение температуры сгорания на 40-45 К приводит к увеличению выбросов NO_x до 2440 млн^{-1} , что составляет 104,6% от номинального значения выбросов базового двигателя. Это подтверждает, что основной вклад в рост эмиссии NO_x вносит температурный фактор, обусловленный применением системы наддува.

Высокие температуры сгорания и повышенное содержание кислорода в отработавших газах способствуют эффективному окислению углеродных частиц. Существенный вклад в снижение сажеобразования вносит оптимизированная продувка цилиндров, реализованная в двигателе с ЭСН-11. Наиболее критичной проблема дымности становится в условиях перегрузки силовых установок транспортных средств. Примечательно, что именно показатель дымности часто

становится лимитирующим фактором при форсировании мощности по внешней скоростной характеристике. Сравнительный анализ демонстрирует: при повышении нагрузки до уровня $Ne=1,3$ ($P_e=0,67$ МПа) базовый двигатель показывает концентрацию сажи $0,55$ мг/л, тогда как модификация с ЭСН-11 сохраняет этот показатель на уровне $0,37$ мг/л. Экспериментально подтвержденное снижение сажеобразования на $32,7\%$ подтверждает эффективность технических решений, реализованных в системе наддува ЭСН-11 для выполнения современных экологических требований.

Сокращение содержания сажи в отработавших газах напрямую коррелирует со снижением выбросов оксида углерода (СО) во всех режимах работы дизеля с системой ЭСН-11. На номинальной нагрузке уменьшение выбросов СО достигает 31% , а при 50% -процентной нагрузке – 16% . Однако при низких нагрузках (около $0,2$ МПа) наблюдается обратная тенденция – незначительный рост выбросов СО, что объясняется снижением средней температуры цикла, ухудшением полноты сгорания топлива, недостаточной активностью окислительных процессов. Данная зависимость подтверждает, что эффективность снижения выбросов напрямую связана с термодинамическим совершенством рабочего процесса, которое обеспечивается системой ЭСН-11 преимущественно в средних и высоких нагрузочных режимах.

Проведенные 200-часовые испытания ЭСН подтвердили высокую надежность конструкции и простоту технического обслуживания, что обусловлено отсутствием сложных механических вытеснителей и дисковых газораспределительных механизмов.

Ключевые наблюдения такие: рабочие характеристики компрессора КТС существенно зависели от величины зазора между ротором и статором, в тестируемой конструкции поддерживался зазор $0,08-0,1$ мм, а уменьшение зазора ниже $0,08$ мм вызывало риск заклинивания ротора от термических деформаций, увеличение зазора до $0,15$ мм приводило к росту утечек рабочего тела на 3% и снижению эффективности системы.

Инженерный компромисс заключается в поддержании минимально возможного зазора, исключающего термическое заклинивание, но предотвращающего чрезмерные утечки. Данный параметр требует точного контроля при производстве и эксплуатации для сохранения энергетической эффективности системы наддува.

Программа дальнейшего совершенствования ЭСН включает внедрение продвинутых технологий уплотнения в зоне сопряжения ротор-статор. Перспективным направлением является применение керамических материалов для изготовления ротора, характеризующихся сниженным коэффициентом термического расширения. Результаты испытаний подтвердили функциональную состоятельность системы в составе силовой установки, потенциал повышения эффективных показателей ДВС, перспективность технологий утилизации сбросного тепла.

Список источников

1. Пат. RU 2189497 F04B19/24 (2000.06) Компрессор теплового сжатия/ А.И.Крайнюк, А.Е.Богославский, Ю.В.Сторчеус, А.А.Данилейченко, И.П.Васильев, А.А. Крайнюк; опубл. 20.09.2002. Бюл. №26.
2. Данилейченко А.А., Быкадоров В.В., Брянецев М.А. Рабочий цикл компрессора

каскадно-теплого сжатия // Проблемы развития технологий технических сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: Материалы международной научно-практической конференции 15-16 ноября 2017 года, г. Воронеж. – ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – Ч. I, С.66-69.

3. Данилейченко А.А., Брянцев М.А., Ковтун А.С., Доценко Д.М. Принципы организации рабочих процессов теплоэнергетических машин каскадного сжатия научной школы А.И.Крайнюка // Симпозиум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых в рамках 5-ой Международной научно-практической конференции «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития - ТМТЛ'19» 18 апреля 2019 года, г. Луганск. – ЛНУ им.В.Даля, 2017. С.274-294.

4. Данилейченко А.А., Брянцев М.А., Ковтун А.С. Моделирование рабочего процесса компрессора теплового сжатия// Энергоэффективность автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, Альтернативные источники энергии: материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием 14-17 мая 2019 года, г. Воронеж. – ФГБОУ ВО Воронежский ГЛУ им. Ф.Г.Морозова, 2019. С.251-257.

5. Данилейченко А.А., Брянцев М.А., Куликов Ю.А. Моделирование рабочего процесса компрессора теплового сжатия // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2020. – № 7(37). – С. 50-53.

6. Брянцев М.А., Савельев А.А., Базовой А.А.Одноступенчатые агрегаты каскадного сжатия // VI Республиканская научно-практическая интернет конференция преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы гуманитарных, естественных и технических наук» 28-29 октября 2020 года, г. Донецк. – ГО ВПО ДНУ экономики и торговли им. М.Туган-Барановского, 2020. – С. 44-46.

7. Вербицкий А.И., Цыганков Д.Н., Суворов К.В.Упрощенный расчет рабочего процесса компрессора теплового сжатия // VI Республиканская научно-практическая интернет конференция преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы гуманитарных, естественных и технических наук» 28-29 октября 2020 года, г. Донецк. – ГО ВПО ДНУ экономики и торговли им. М.Туган-Барановского, 2020. – С. 51-53.

8. Данилейченко А.А., Брянцев М.А. Разработка и исследование компрессора каскадно-теплого сжатия для наддува четырехтактного двигателя. – Луганск: изд-во ЛГУ им. В.Даля, 2022. – 170 с.

9. Дьяконов А.А., Сверлов Д.С., Брянцев М.А. Выбор размерных параметров утилизационной системы каскадно-теплого сжатия силовой установки тепловоза // Материалы студенческой открытой интернет – конференции «Первый шаг в науку» 5-6 марта 2024 года, г. Горловка. – АДИ ФГБОУ ВО «ДОННТУ», 2024. – С. 34-40.

10. Брянцев М.А., Данилейченко А.А., Ковтун А.С., Доценко Д.М. Расчет размерных параметров утилизационной системы каскадно-теплого сжатия силовой установки тепловоза // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2024. – № 7(85). – С. 27-33.

References

1. Patent. RU 2189497 F04B19/24 (2000.06) Thermal compression compressor / A.I. Kraynyuk, A.E. Bogoslavsky, Yu.V. Storcheus, A.A. Danileychenko, I.P. Vasiliev, A.A. Kraynyuk; publ. 20.09.2002. Bulletin No. 26.

2. Danileychenko A.A., Bykadorov V.V., Bryancev M.A. Working cycle of a cascade thermal compression compressor // Problems of development of technologies for technical service maintenance and use of technical means in the agro-industrial complex: Proceedings of the international scientific and practical conference, November 15-16, 2017, Voronezh. – Voronezh

State Agrarian University, 2017. – Part I, pp. 66-69.

3. Danileichenko A.A., Bryancev M.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M. Principles of organizing the working processes of heat power machines with cascade compression of the scientific school of A.I. Kraynyuk // Symposium of students, master's students, postgraduates and young scientists within the framework of the 5th International scientific and practical conference "Technologies, materials, transport and logistics: development prospects - TMTL'19" April 18, 2019, Luhansk. – LNU named after V.Dal, 2017. pp. 274-294.

4. Danileichenko A.A., Bryancev M.A., Kovtun A.S. Modeling the operating process of a thermal compression compressor // Energy efficiency of vehicles: nanotechnology, information and communication systems, alternative energy sources: proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation, May 14-17, 2019, Voronezh. - Voronezh State Linguistic University named after F.G. Morozov, 2019. pp. 251-257.

5. Danileichenko A.A., Bryancev M.A., Kulikov Yu.A. Modeling the operating process of a thermal compression compressor // Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University. - 2020. - No. 7 (37). - P. 50-53.

6. Bryancev M.A., Saveliev A.A., Bazovoy A.A. Single-stage cascade compression units // VI Republican scientific and practical Internet conference of teachers, young scientists, graduate students and students "Modern problems of humanitarian, natural and technical sciences" October 28-29, 2020, Donetsk. - State Higher

Professional Education DNU of Economics and Trade named after M.Tugan-Baranovsky, 2020. - P. 44-46. 7. Verbitsky A.I., Tsygankov D.N., Suvorov K.V. Simplified calculation of the working process of a thermal compression compressor // VI Republican scientific and practical Internet conference of teachers, young scientists, graduate students and students "Modern problems of humanitarian, natural and technical sciences" October 28-29, 2020, Donetsk. - State Higher Professional Education DNU of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky, 2020. – P. 51-53.

8. Danileichenko A.A., Bryancev M.A. Development and study of a cascade-thermal compression compressor for supercharging a four-stroke engine. – Lugansk: Publishing House of Leningrad State University named after V.Dal, 2022. – 170 p.

9. Dyakonov A.A., Sverlov D.S., Bryancev M.A. Selection of dimensional parameters of a cascade-thermal compression utilization system of a diesel locomotive power plant // Proceedings of the student open internet conference "First Step into Science" March 5-6, 2024, Gorlovka. – ADI FGBOU VO "DONNTU", 2024. – P. 34-40.

10. Bryancev M.A., Danileichenko A.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M. Calculation of dimensional parameters of the utilization system of cascade-thermal compression of the power plant of a diesel locomotive // Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University. - 2024. - No. 7 (85). - P. 27-33.

Статья поступила в редакцию 24.06.2025

Информация об авторах

Брянцев Максим Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
E-mail: 280376@rambler.ru

Данилейченко Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 6030-1239, *Автор ID:* 1185129
E-mail: 280376@rambler.ru

Ковтун Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
E-mail: 280376@rambler.ru

Доценко Данил Михайлович, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 7253-4759, *Автор ID:* 944876
E-mail: 280376@rambler.ru

Information about the authors

Bryantsev Maksim Anatolievich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» Department of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
E-mail: 280376@rambler.ru

Danileychenko Alexander Anatolievich, candidate of sciences, a dosent of the chair «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 6030-1239, *AuthorID:* 1185129
E-mail: 280376@rambler.ru

Kovtun Alexander Sergeevich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» Department of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
E-mail: 280376@rambler.ru

Dotsenko Danil Mikhailovich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 7253-4759, *AuthorID:* 944876
E-mail: 280376@rambler.ru

Для цитирования:

Брянцев М.А., Данилейченко А.А., Ковтун А.С., Доценко Д.М. Показатели работы дизеля 6ч12/14 с компрессором каскадно-теплового сжатия // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 21-30.

For citation:

Bryantsev M.A, Danileychenko A.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M. Working parameters of the diesel 6 fs12/14 with a cascade thermal compression compressor // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 21-30.

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Добрыднев А. В., Безкоровайный В. С., Безкоровайная Н. В., Киреева М. А.

MAGNETIC DEVICES FOR MONITORING THE CONDITION OF COMPONENTS OF ROBOTIC MACHINES AND MECHANISMS

Dobrydnev A. V., Bezkorovainiy V. S., Bezkorovainiya N. V., Kireeva M. A.

Аннотация. Актуальность использования феррозондов для контроля узлов роботизированных машин и механизмов нарастает в условиях современного производства, где высокие требования к надежности и эффективности оборудования становятся критически важными. Внедрение магнитных устройств для мониторинга состояния узлов позволяет осуществлять диагностику в реальном времени, минимизируя возможность аварийных ситуаций и простоев. Феррозонды представляют собой магнитные датчики, которые реагируют на изменения магнитных полей, возникающих в результате износа или повреждения элементов механизмов. Они способны обнаруживать даже незначительные дефекты, что позволяет производить своевременное обслуживание и замену деталей, предотвращая более серьезные поломки. Благодаря высокой чувствительности и быстродействию феррозондов, предприятия могут значительно повысить уровень контроля за состоянием своих машин.

В условиях роботизации, где автоматизация процессов становится нормой, использование магнитных устройств для контроля состояния узлов оснащает производителей актуальной информацией о производительности и возможных сбоях. Это, в свою очередь, способствует повышению общих показателей эффективности. Также стоит отметить, что феррозонды могут интегрироваться в существующие системы управления и мониторинга, что делает их внедрение более простым и экономически оправданным.

Применение магнитных устройств, таких как феррозонды, в системе контроля состояния узлов роботизированных машин и механизмов представляет собой перспективное направление. Оно не только способствует улучшению технического состояния оборудования, но и позволяет оптимизировать производственные процессы, снижая затраты и повышая безопасность на предприятиях.

Ключевые слова: феррозондовый датчик, неразрушающий контроль, дефекты, магнитные поля, дефектоскоп, датчик, узлы механизмов, роботизированные машины, системы, безопасность, мониторинг состояния.

Abstract. The relevance of using ferroprobe to control components of robotic machines and mechanisms is increasing in modern production conditions, where high requirements for reliability and efficiency of equipment are becoming critically important. The introduction of magnetic devices for monitoring the condition of nodes allows for real-time diagnostics, minimizing the possibility of emergencies and downtime. Ferroprobe are magnetic sensors that respond to changes in magnetic fields

resulting from wear or damage to mechanical elements. They are able to detect even minor defects, which allows for timely maintenance and replacement of parts, preventing more serious breakdowns. Due to the high sensitivity and speed of ferroprobe, enterprises can significantly increase the level of control over the condition of their machines.

In the context of robotics, where process automation is becoming the norm, the use of magnetic devices to monitor the condition of nodes equips manufacturers with up-to-date information about performance and possible failures. This, in turn, contributes to an increase in overall performance indicators. It is also worth noting that ferroprobe can be integrated into existing management and monitoring systems, which makes their implementation simpler and economically feasible.

The use of magnetic devices, such as ferroprobe, in a system for monitoring the condition of components of robotic machines and mechanisms is a promising area. It not only helps to improve the technical condition of the equipment, but also optimizes production processes, reducing costs and increasing safety at enterprises.

Key words: ferroprobe sensor, non-destructive testing, defects, magnetic fields, flaw detector, sensor, machine components, robotic machines, systems, safety, condition monitoring.

Введение. Современные технологии автоматизации и роботизации находят все большее применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства (рис. 1), что способствует повышению эффективности, производительности и безопасности процессов [1, 2].



Рис. 1. Роботизированные машины и механизмы

Роботизированные системы занимают примерно 30-50% на производстве в развитых странах и продолжают набирать популярность благодаря своим высоким производственным показателям и надежности. В автоматизации процессов они помогают улучшить эффективность, снизить затраты и минимизировать ошибки, что делает их незаменимыми в

современных условиях конкурентной борьбы.

Однако существует множество проблем, связанных с состоянием машин и механизмов, которые могут негативно сказаться на общей надежности и эффективности их работы. Основными из этих проблем являются [3,4]:

- износ деталей и узлов – постоянная эксплуатация приводит к естественному износу механических и движущихся частей (подшипники, шестерни, ремни). Износ может вызывать перегрев и повышенные вибрации, что в конечном итоге может привести к поломке и авариям (рис. 2);



Рис. 2. Износ деталей и узлов манипулятора

- коррозионные повреждения – влияние окружающей среды (влаги, химические вещества) может приводить к коррозии металлических компонентов. Это особенно критично для узлов, подверженных воздействию влаги, что снижает прочность и может вызвать их разрушение (рис. 3) [5];

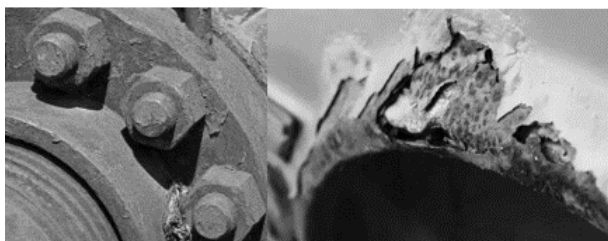


Рис. 3. Коррозионные повреждения металлических узлов

- перегрузка систем – эксплуатация машин с превышением их предельных нагрузок или в условиях, для которых они не предназначены, может привести к значительному снижению надежности механизмов и аварийным ситуациям (рис. 4) [6].

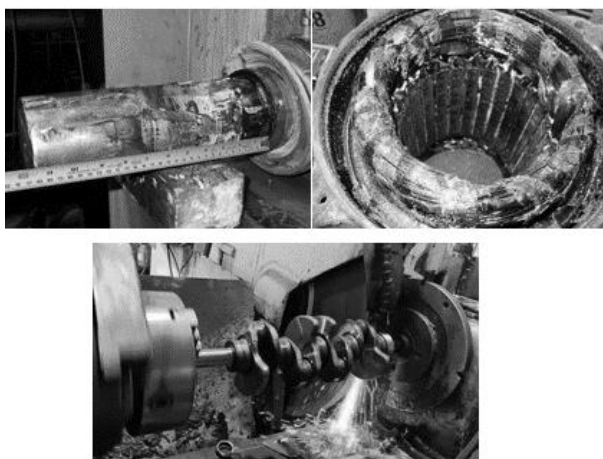


Рис. 4. Превышение предельной нагрузки роботизированных систем

Проблемы, связанные с техническим состоянием узлов роботизированных машин и механизмов, представляют собой серьезную угрозу, поскольку они могут значительно увеличить риск возникновения

аварий. Это, в свою очередь, может поставить под угрозу жизни и здоровье людей, работающих с такими системами или находящихся в их непосредственной близости (рис. 5). В связи с вышеизложенным, возникла острая необходимость в надежных и эффективных методах контроля состояния автоматизированных систем [7].



Рис. 5. Разрушение роботизированных систем

Одним из таких методов является феррозондовый метод (ФМ), который внедряется для мониторинга состояния роботизированных систем в рамках неразрушающего контроля (НК).

Феррозондовый метод НК основан на регистрации параметров магнитного поля на поверхности намагниченного контролируемого изделия с помощью феррозондов (рис. 6). Этот метод позволяет эффективно обнаруживать такие несоответствия, как несплошности, трещины, волосины, внутренние поры и т.д., за счет сопоставления полученных данных с эталонными значениями, полученными от бездефектной детали [8].



Рис. 6. Контроль деталей и узлов

В процессе применения феррозондового метода возможны различные подходы к сканированию. Для более простых задач может быть использован один феррозондовый преобразователь, который осуществляет построчное сканирование поверхности объекта. Однако для повышения эффективности и ускорения процесса контроля целесообразно применение феррозондовой матрицы. Такой подход обеспечивает более широкий охват поверхности детали и позволяет одновременно анализировать большие участки, что существенно увеличивает производительность контроля [9].

Достоинства метода:

- магнитные поля, применяемые при контроле детали, глубоко проникающие в объект, позволяют обнаруживать поверхностные и подповерхностные несплошности глубиной до 40 мм;
- не зависит от качества поверхности, в отличие от других методов НК, таких как ультразвуковой или радиографический, магнитный метод не требует значительного предшествующего ремонта, то есть механической обработки поверхности объекта от шероховатости литых деталей, сварочных швов, что позволяет существенно экономить время;

- высокая чувствительность к дефектам позволяет обнаруживать наиболее мелкие трещины и дефекты на поверхности материалов от 1 мкм и глубиной от 50 мкм, что делает его особенно полезным для контроля состояния узлов с высокими требованиями по надежности;

Недостатки метода:

- жесткие требования к намагничиванию контролируемых объектов, что требует создания

намагничивающих устройств и соответствующего оборудования;

- специфичные настройки дефектоскопов, которые требуют специальных настроенных образцов с моделями дефектов. Каждая настройка параметров должна показывать малое отклонение от допустимого параметра;

- ограниченность по материалам: – магнитный метод эффективен только для ферромагнитных материалов, что ограничивает его применение. Для немагнитных материалов, таких как алюминий или медь, этот метод не может быть использован;

- чувствительность к внешним условиям – результаты контроля могут быть искажены влиянием внешних магнитных полей, что требует соблюдения определенных условий при проведении контроля.

Для повышения безопасной эксплуатации роботизированных машин и механизмов применяются феррозондовые магнитные методы неразрушающего контроля (рис. 7), которые позволяют эффективно выявлять дефекты и повреждения в материалах без их разрушения [10, 11].



Рис. 7. Дефектоскоп-измеритель феррозондовый Ф-205.60

Прибор, представленный на рис. 7, является дефектоскопом Ф – 205.60, который предназначен для контроля ферромагнитных деталей на наличие дефектов. Производит измерения нормальной составляющей напряженности и градиента магнитного поля, с возможностью оценивания амплитуды и периода напряженности магнитного поля с последующей визуализацией данных на графическом дисплее [12].

Далее рассмотрим основные этапы проведения неразрушающего контроля (рис. 8):

1. Подготовка объекта контроля

Перед началом контроля необходимо полностью очистить поверхность изделия от посторонних загрязнений, таких как ржавчина, налет, металлическая пыль и других примесей. Этот процесс может включать как механическую обработку (например, шлифовку или использование скребков), так и химическую (например, применение растворителей). Также критически важно, чтобы объект был совершенно сухим, поскольку наличие влаги может повлиять на результаты намагничивания [13].

2. Намагничивание [14]

1. Выбор способа намагничивания зависит от типа дефектоскопа и контролируемого материала, после выбирается метод намагничивания – контактный (с использованием электромагнитов или постоянных магнитов) или бесконтактный (при помощи индукционных катушек).

2. Феррозондовый дефектоскоп настраивается на необходимые параметры, такие как сила тока, частота и направление магнитного поля.

3. Объект намагничивается, создается однородное магнитное поле. При этом

важно следить за тем, чтобы магнитная индукция была достаточной для выявления дефектов.

3. Сканирование

1. Выбирается режим сканирования или по заданной траектории в зависимости от типа дефектов, которые планируется выявить: линейное, точечное.

2. Сканер водится по обследуемой поверхности и в процессе сканирования происходит измерение магнитного поля и выявление аномалий. Это могут быть трещины, включения, поры или другие дефекты.

3. Собираются данные о намагничивании и выявленных аномалиях и регистрируются в системе.

4. Анализ результатов [14]

1. Полученные данные анализируются специалистом. На этом этапе важно правильно интерпретировать результаты и определить степень серьезности выявленных дефектов.

2. Оформляется отчет по результатам проверки, включающий описание методов, условий испытания и выявленные дефекты.

Данный процесс требует строгого соблюдения всех этапов для обеспечения качества и точности результатов (рис. 8).

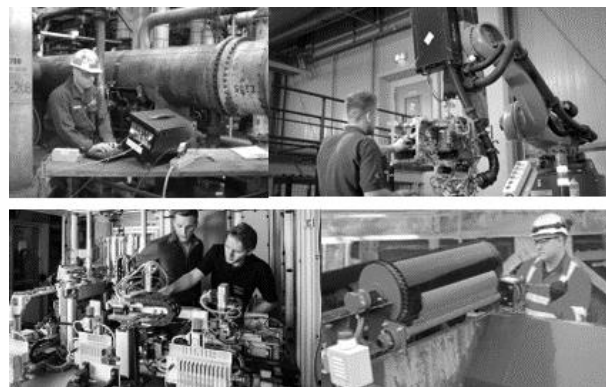


Рис. 8. Диагностика узлов роботизированных систем

Вывод. Феррозондовые дефектоскопы позволяют проводить НК роботизированных узлов машин и механизмов, что существенно снижает риск аварийных ситуаций (рис. 5). Выявление дефектов на ранних стадиях, таких как трещины, коррозия или другие повреждения, дает возможность проводить своевременные ремонтные работы и предотвращать серьезные инциденты. Это особенно важно в областях с высокой интенсивностью использования роботизированных систем, где даже малейшая неисправность может привести к катастрофическим последствиям [15].

Использование феррозондов для мониторинга состояния узлов машин обеспечивает постоянный контроль за изменениями в магнитных свойствах материалов. Это позволяет оперативно реагировать на недостатки в работе механизмов и повышает общую эффективность производственных процессов. Таким образом, феррозондовые устройства могут стать неотъемлемой частью системы управления качеством и надежностью в современных производственных условиях, особенно в областях с высокой степенью автоматизации и интенсивной эксплуатации оборудования.

Список источников

1. Дианов В. Н. Диагностика скрытых дефектов робототехнических комплексов / В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян, С. Г. Дусеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 189-198.
2. Бигус Г. А. Диагностика технических устройств / Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
3. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2010.
4. Тимофеев А. В. Функциональная диагностика и дефектоустойчивое управление мехатронными системами и роботами // Труды СПИИРАН, вып. 2, т. 1, СПб.: СПИИРАН, 2004.
5. Проблемы создания гибких производственных систем и роботизированных технологических комплексов. Сб. научных трудов // под ред. В. А. Кудинова и Л. Ю. Лищинского. – М.: ОНТИ ЭНИМС, 1986. – 176 с.
6. Кравцов А. Г. Промышленные роботы : учебное пособие / А. Г. Кравцов, К. В. Марусич. – Саратов : Ай Пи Ар Медиа, 2019. – 95 с.
7. Рожанская, И. В. Использование роботов-манипуляторов в неразрушающем контроле / И. В. Рожанская, Р. М. Галаган // Новые направления развития приборостроения : материалы 10-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 26-28 апреля 2017 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 178.
8. Холодилов О. В. Методы и средства неразрушающего контроля (акустический): лабораторный практикум/ О. В. Холодилов, В. В. Бурченков, А. В. Янчилик. – Гомель: БелГУТ, 2017.
9. Черемушкина М. С., Соловьев В. А. Построение системы диагностики конвейерного транспорта//Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. –№3-3.
10. Афанасьев Ю. В. Феррозонды [Текст]. – Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1969. – 166 с.
11. Копотун Е. А. Феррозондовый метод контроля: учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Основы технической диагностики» / Е. А. Копотун, А. В. Челохьян, Б. Е. Копотун; Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2010. – 28 с.
12. Михальцевич Г. А. Магнитный дефектоскоп с феррозондовым датчиком. В

материалах Седьмой международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2009.

13. Официальный сайт: электрон. путеводитель/ ООО Микроакустика. 1992. URL: <https://mikroakustika.ru/index.php?lang=rus&l1=1&l2=5&l3=272&n=f215&ysclid=m1dc7rdm31203676224> (дата обращения: 18.05.2025)

14. Толмачев И. И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008.

15. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 томах, под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 6: Кн. 1: Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2004.

References

1. Dianov V. N. Diagnostics of hidden defects of robotic complexes / V. N. Dianov, T. A. Gevondyan, S. G. Duseev // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. The Volga region. Technical sciences.* - 2013. - № 3 (27). - Pp. 189-198.

2. Bigus G. A. Diagnostics of technical devices / Bigus G. A., Daniev Yu.F., Bystrova N. A., Galkin D. I. – М.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014.

3. Egorov I. N. Positional force control of robotic and mechatronic devices, Vladimir: Publishing House of the All-Russian State University, 2010.

4. Timofeev A.V. Functional diagnostics and defect-resistant control of mechatronic systems and robots // *Proceedings of SPIIRAN*, vol. 2, vol. 1, St. Petersburg: SPIIRAN, 2004.

5. Problems of creating flexible production systems and robotic technological complexes. Collection of scientific papers // edited by V. A. Kudinov and L. Y. Lishchinsky Moscow: ONTI ENIMS, 1986. 176 p.

6. Kravtsov A. G. Industrial robots: a textbook / A. G. Kravtsov, K. V. Marusich. Saratov : AI Art Media, 2019. – 95 p.

7. Rozhanskaya, I. V. The use of robotic manipulators in non-destructive testing / I. V.

Rozhanskaya, R. M. Galagan // *New directions of instrument engineering development : proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students*, Minsk, April 26-28, 2017 : in 2 volumes / Belarusian National Technical University ; editorial board.: O. K. Gusev [et al.]. Minsk, 2017. Vol. 2. pp. 178.

8. Kholodilov O. V. Methods and means of non-destructive testing (acoustic): laboratory practice/ O. V. Kholodilov, V. V. Burchenkov, A.V. Yanchilik. Gomel: BelGUT Publ., 2017.

9. Cheremushkina M. S., Soloviev V. A. Building a conveyor transport diagnostic system//*News of TulSU. Technical sciences.* – 2010. –№3-3.

10. Afanasyev Yu.V. Ferrosondes [Text]. – Leningrad: Energy. Leningr. publishing house, 1969. - 166 p.

11. Kopotun E.A. Ferrosonde method of control: an educational and methodical manual for laboratory work in the discipline "Fundamentals of technical diagnostics" / E.A. Kopotun, A.V. Chelokhyan, B.E. Kopotun; Rostov State University of Railways. — Rostov n/A, 2010. – 28 p.

12. Mikhaltsevich G. A. Magnetic flaw detector with ferrosonde sensor. In the proceedings of the Seventh International Scientific and Technical Conference, Minsk: BNTU, 2009.

13. Official website: electron. Guidebook/ Microacoustics LLC. 1992. URL: <https://mikroakustika.ru/index.php?lang=rus&l1=1&l2=5&l3=272&n=f215&ysclid=m1dc7rdm31203676224> (accessed: 05/18/2025)

14. Tolmachev I. I. Magnetic methods of control and diagnostics: a textbook. Tomsk: TPU Publishing House, 2008.

15. Non-destructive testing: A handbook in 7 volumes, under the general editorship of V. V. Klyuev. Vol. 6: Book 1: Magnetic control methods. Moscow: Mashinostroenie, 2004.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025

Информация об авторах

Добрыднев Алексей Витальевич, аспирант кафедры «Электромеханика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 4805-3967, AuthorID: 1264623
E-mail: mushroomrace@yandex.ru

Безкоровайный Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электромеханика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 8933-5114, AuthorID: 1220764
E-mail: kaf-el-mex@yandex.ru

Безкоровайная Наталья Викторовна, преподаватель ГБОУ СПО ЛНР «Луганский колледж автосервиса им. А.А. Гизая», г. Луганск.
E-mail: myfieryfox@rambler.ru

Киреева Маргарита Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Железнодорожный транспорт Института транспорта и логистики» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 5100-7910, AuthorID: 1101119

Information about the authors

Dobrydnev Alexey Vitalievich, postgraduate student of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 4805-3967, AuthorID: 1264623
E-mail: mushroomrace@yandex.ru

Bezkorovainiy Vladimir Sergeevich, candidate of technical sciences, associate professor of «Electromechanics» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 8933-5114, AuthorID: 1220764
E-mail: kaf-el-mex@yandex.ru

Bezkorovainiya Natalia Viktorovna, lecturer of GBOU SPO LNR «Lugansk College of carservice named after A.A. Gizai», Lugansk.
E-mail: myfieryfox@rambler.ru

Kireeva Margarita Anatolyevna, senior lecturer «Department of railway transport of the institute of transport and logistics» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 5100-7910, AuthorID: 1101119

Для цитирования:

Добрыднев А. В., Безкоровайный В.С., Безкоровайная Н.В., Киреева М.А. Магнитные устройства для контроля состояния узлов роботизированных машин и механизмов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 31-38.

For citation:

Dobrydnev A.V., Bezkorovainiy V.S., Bezkorovainiya N.V., Kireeva M.A. Magnetic devices for monitoring the condition of nodes of robotic machines and mechanisms // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 31-38.

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 631.354:621.43:62-24

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИРАБОТКОЙ

Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю.

INCREASING THE DURABILITY OF THE MAIN CONNECTIONS OF ENGINES BY ELECTROCHEMICAL-MECHANICAL RUNNING IN

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu.

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических исследований электрохимико-механической приработки (ЭХМП) основных сопряжений двигателей. Показано влияние различных факторов на эффективность приработки.

Ключевые слова: ремонт, двигатели, основные сопряжения, трущиеся поверхности, надежность, долговечность, электрохимико-механическая приработка, макрогеометрия.

Abstract. This article presents the results of theoretical studies of electrochemical-mechanical running-in (ECMH) of the main engine interfaces. The influence of various factors on the running-in efficiency is demonstrated.

Key words: repair, engines, main connections, rubbing surfaces, reliability, durability, electrochemical-mechanical running-in, macrogeometry.

Введение. Проблема надежности и долговечности автотракторных двигателей наиболее остро ощутима в сфере ремонтного производства, так при высокой стоимости ремонта срок службы капитально отремонтированного агрегата значительно меньше, чем срок службы нового, на 80%. Надежность и вероятность безотказной работы автотракторных дизелей во многом зависит от технического состояния основных сопряжений и показателей изнашивания подшипников

коленчатого вала, которые в свою очередь определяются отклонениями их формы и взаимного расположения.

Макрогеометрия узлов трения после механической обработки значительно отличается от требуемой. Шероховатость зачастую не соответствует оптимальным значениям, во многих случаях нарушена эквидистантность поверхностей. Данные процессы приводят к повышенным удельным давлениям в зоне контакта, непосредственному контактированию

металлических поверхностей и, как следствие к задирам, схватываниям и повышенному изнашиванию прирабатываемых поверхностей. Для получения необходимых параметров нужно использовать высокоэффективные способы приработки отклонений трущихся поверхностей основных сопряжений.

Для компенсации неточностей формы деталей и погрешностей сборки механизмы подвергают обкатке, при которой происходит приработка трущихся поверхностей. Наиболее эффективным приемом ускорения приработки является использование совмещенных процессов воздействия на прирабатываемые поверхности. Одним из них является электрохимико-механической приработка (ЭХМП). Процессы ЭХМП проходят в среде электролита, который влияет на эффективность процесса, режим трения прирабатываемой пары и скорость электрохимических реакций.

Сущность ЭХМ приработки заключается в следующем: деталям механизма придается рабочее движение, между деталями прокачивается электролит и пропускается переменный электрический ток. За счет совместного электрохимико-механического воздействия происходит быстрое приспособливание одной поверхности к другой. Наиболее эффективным фактором ЭХМП является электрохимический, при котором легче сравнить материал с трущейся поверхности за счет анодного растворения при гидродинамическом режиме трения. Для повышения эффективности ЭХМП необходимо повысить вязкость электролитов или увеличить скорости скольжения, то есть гарантированно обеспечить гидродинамический режим смазки. Однако повышение вязкости

электролита приводит к снижению электропроводимости разделительного слоя смазки.

Целью данной работы является теоретическое исследование влияния всех факторов ЭХМП на эффективность процесса.

Результаты исследований. Известно, что основные пары трения машин имеют различный характер взаимного перемещения. Трибосопряжения цилиндропоршневой группы работают при возвратно-поступательном движении (рис. 1), а подшипники скольжения – при вращательном (рис. 2). Очевидно, что в первом случае скорость взаимного перемещения деталей изменяется от нуля до максимума, определяемого конструктивными параметрами узла и частотой вращения коленчатого вала, а во втором – скорость зависит только от частоты вращения и на установившихся режимах постоянна.

Для аналитического определения режима трения, наличия и толщины разделительного слоя электролита между трущимися деталями используют критерий Зоммерфельда S_m [1]. Для приработки деталей типа поршневых колец в сопряжениях кольца-гильза (с возвратно-поступательным взаимным перемещением) он равен:

$$S_m = \frac{\mu \cdot V}{P \cdot b}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость смазочного материала (электролита), МПа·с;

V – скорость перемещения поршня, м/с;

P – давление кольца на зеркало цилиндра от сил упругости, МПа;

b – высота кольца, м.

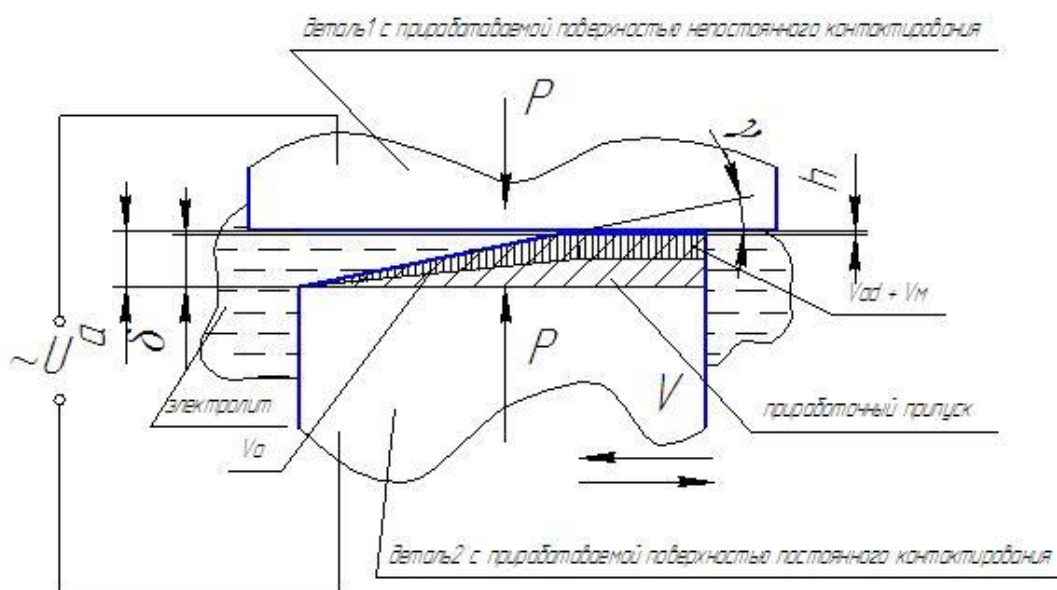


Рис. 1. Схема ЭХМП деталей с возвратно-поступательным взаимным перемещением:

δ – максимальная величина приработочного припуска; V_a – скорость электрохимического съема материала с поверхности детали на зазоре; V_{ad} – скорость электрохимического съема материала с поверхности детали при механической активации; V_m – скорость механического съема материала с поверхности детали; h – радиальный межэлектродный зазор в зоне жидкостного трения; γ – угол перекоса прирабатываемых поверхностей; a – зазор в сопряжении, зависящий от величины γ

Зная, что $S_m = 10^{-5}$ соответствует переходному режиму трения, нетрудно установить изменение видов смазки при перемещении поршня. За двойной ход поршня исследуемые поверхности взаимодействуют при различных режимах трения: граничной, переходной и гидродинамической смазке.

Согласно гидродинамической теории смазки толщина пленки, разделяющей кольцо и гильзу, находится по формуле [1]:

$$h = \sqrt{S_m}. \quad (2)$$

Можно утверждать, что при гидродинамической смазке на прирабатываемых поверхностях протекает чисто электрохимическая реакция: ток

проходит через детали, разделенные слоем электролита. Следствием этого является травление поверхности при их анодной поляризации с частотой переменного тока. Режим граничного и переходного трения, помимо прочего, способствует активированию поверхностей, что усиливает эффект электрохимической реакции при жидкостном трении.

Что касается приработки подшипников скольжения, то необходимо учитывать частоту вращения вала ω и наличие макрогеометрических отклонений δ (рис. 2).

Из рис. 1 и 2 очевидно, что любой процесс макроприработки двух поверхностей можно свести к приработке одной плоскости, наклоненной с углом перекоса γ , по отношению к другой.

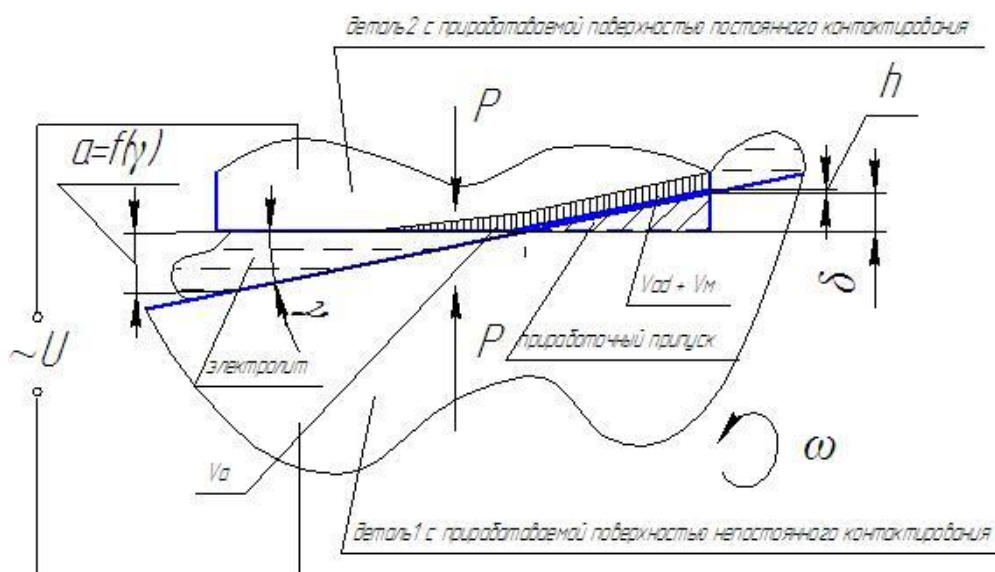


Рис. 2. Схема ЭХМП деталей с вращательным взаимным перемещением

Гидродинамическая теория трения говорит о том, что толщина пленки между валом и опорами зависит от частоты вращения вала. Кроме этого, важными параметрами являются свойства смазочной среды и геометрические параметры подшипников скольжения. Существующие законы гидродинамической смазки позволяют описать минимальную толщину масляной пленки свободно вращающегося вала. Она находится по формуле:

$$h_{\min} = \frac{d^2 n \eta}{18,36 k S c}, \quad (3)$$

где d – диаметр вала, мм;

n – частота вращения вала, мин^{-1} ;

η – динамическая вязкость масла, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

k – нагрузка на вал, Па ;

S – зазор, мм;

c – поправка Глюмбеля.

С помощью формулы (3) можно определить минимальную толщину слоя электролита при ЭХМП в зоне непосредственного контакта трущихся

поверхностей вала и подшипника без учета макрогеометрических отклонений (рис. 2).

Выделим факторы, влияющие на изменение величины погрешности формы детали $d\delta/dt$ и отношение скорости электрохимического съема на участке с депассивацией поверхности к скорости съема на участке без депассивации V_{dl}/V_a . Предположим, что материал детали на участке механического активирования снимается в виде микрообъемов металла, тогда

$$V_{dl} = V_m + V_{ad}, \quad (4)$$

где V_m – скорость механического съема хрома;

V_{ad} – скорость анодного растворения металла при механической депассивации.

Составляющую V_{ad} можно выразить исходя из законов Фарадея и Ома [2] с учетом периодического прерывания анодного растворения в рассматриваемой точке поверхности кольца вследствие падения напряжения при механическом активировании (в зонах граничного трения)

$$V_{ad} = 0,5 \cdot (1 - \kappa) \frac{c}{\rho} \cdot \eta_{ad} \frac{(U - \varphi_{ad} + \varphi_k)}{h} x, \quad (5)$$

где 0,5 – коэффициент, учитывающий переменный ток;

κ – коэффициент, учитывающий долю граничного трения ($S_m < 10^{-5}$) в общем времени цикла (один оборот коленчатого вала);

U – рабочее напряжение, В;

φ_{ad} – анодный потенциал при механической активации, В;

φ_k – потенциал катода, В;

η_{ad} – анодный выход по току при механическом активировании, %;

χ – удельная электропроводимость электролита, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$;

ρ – плотность материала, г/см^3 ;

c – электрохимический эквивалент материала анода, $\text{г/А} \cdot \text{ч}$;

h – радиальный межэлектродный зазор в зоне жидкостного трения, см.

По аналогии с выражением (5) скорость съема металла на участке анодного растворения составит

$$V_a = 0,5 \cdot (1 - \kappa) \frac{c}{\rho} \cdot \eta_a \frac{(U - \varphi_a + \varphi_k)}{(h + \delta)} x, \quad (6)$$

где η_a – анодный выход по току, %;

φ_a – анодный потенциал, В;

δ – максимальная величина приработочного припуска, см.

Подставляя (5), (6) в (5), получим (7)

$$\frac{d\delta}{dt} = V_M + 0,5 \cdot (1 - \kappa) \frac{c}{\rho} \cdot \frac{\chi}{h} \left[\eta_{ad} (u - \varphi_{ad} + \varphi_k) - \eta_a \cdot \frac{1}{(1 + \delta / h)} (u - \varphi_a + \varphi_k) \right]. \quad (7)$$

Отсюда следует, что скорость уменьшения просвета зависит, кроме механического (V_M), геометрического (δ) и от электрохимических факторов, таких как удельная электропроводимость χ , значения анодных потенциалов φ_{ad} , φ_a и выходов по току η_{ad} , η_a . Механическое активирование снижает анодный потенциал [3], а подтверждение того, что анодный выход по току возрастает в результате периодического механического воздействия, представлено в источнике [4].

Таким образом, выбор режимов ЭХМП можно осуществить на основе информации о величинах φ_{ad} и φ_a , η_{ad} и η_a при определенных условиях приработки. Ускорению приработки деталей способствует уменьшение коэффициента k , который выражает долю граничного трения в общем времени цикла. В свою очередь, k зависит от критерия Зоммерфельда S_m . Из

рис.1 видно, что с увеличением скорости перемещения поршня V и динамической вязкости μ создаются условия гидродинамической смазки в сопряжении с возвратно-поступательным движением. Для таких деталей можно выразить коэффициент k функцией скорости поршня V и коэффициента динамической вязкости μ , то есть $k = f(V, \mu)$.

Толщина пленки h , разделяющей детали при возвратно-поступательном движении (2), также является функцией скорости поршня V и динамической вязкости μ , однако увеличение h приведет к повышению переходного сопротивления слоя электролита.

Согласно (7) для увеличения скорости приработки деталей необходимо, чтобы величина h была минимальной, но при этом обеспечивались бы условия гидродинамической смазки. Снижение несущей способности электролита с целью

уменьшения h возможно за счет газообразования. При электрохимико-механической приработке электролит заполняется пузырьками газа за счет электрохимических процессов, протекающих на поверхностях пары трения. Известно, что газообразование зависит от токовых параметров. Поток газа с жидкостью обладает высокой степенью сжимаемости, что может быть использовано для уменьшения h в процессе приработки с использованием ЭХМП. Некоторое количество пузырьков газа будет способствовать локализации процесса анодного растворения, которая широко применяется во многих технологических схемах электрохимической размерной обработки деталей машин [5, 6, 7].

Наглядное представление об условиях перехода из одного режима трения f в другой представлено на диаграмме Герси, в которой коэффициент трения связан с параметром $\mu V/P$ [8]. Этот параметр называют характеристикой режима подшипника. На диаграмме линия aa , проходящая через точку минимума коэффициента трения, разделяет области трения при жидкостной и других видах смазки [9] (рис. 3).

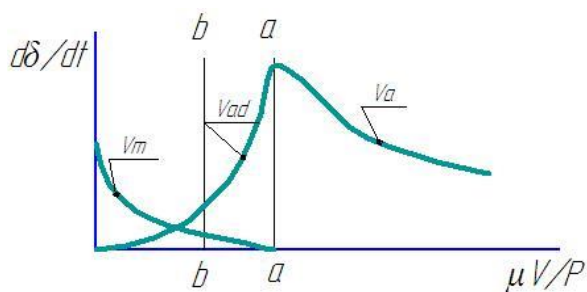


Рис. 3. Скорость уменьшения макрогеометрической погрешности формы детали при ЭХМП

Из рис. 3 видно, что уменьшение макрогеометрической погрешности

(конусности) $d\delta/dt$ за счет механического изнашивания V_m возможно только при сухом и граничном видах трения. Причем на процесс улучшения макрогеометрии деталей сопряжения влияет то, что чем больше разделяемая поверхность слоем смазки, тем меньше влияние механического изнашивания. При жидкостном трении механический фактор отсутствует.

Исследование анодного выхода по току η_{ad} в паре трения с вращательным взаимным перемещением представлено в источнике [8]. Наиболее интенсивно процесс ЭХМП трибосистемы вал – вкладыш будет протекать при выходах по току η_{ad} , близких к 100%. Такие значения наблюдались при плотностях тока менее 1000 A/m^2 . При большой плотности тока (рис. 4) эффективность процесса снижена, износ происходит за счёт механического фактора и выход по току не превышает 10%.

Влияние электрохимического фактора усиливается с разделением трущихся поверхностей слоем электролита (V_{ad} возрастает при граничном трении). Однако при этом необходимо обеспечить минимальный межэлектродный зазор, так как с его увеличением растет сопротивление слоя электролита, что приводит к замедлению электрохимических реакций (V_a снижается при жидкостном трении с ростом толщины слоя электролита).

Экспериментальное подтверждение улучшения триботехнических характеристик поверхностей трения при ЭХМП представлено в источнике [8]. Использование данного высокоэффективного способа формирования поверхностей деталей позволяет значительно повысить их ресурс.

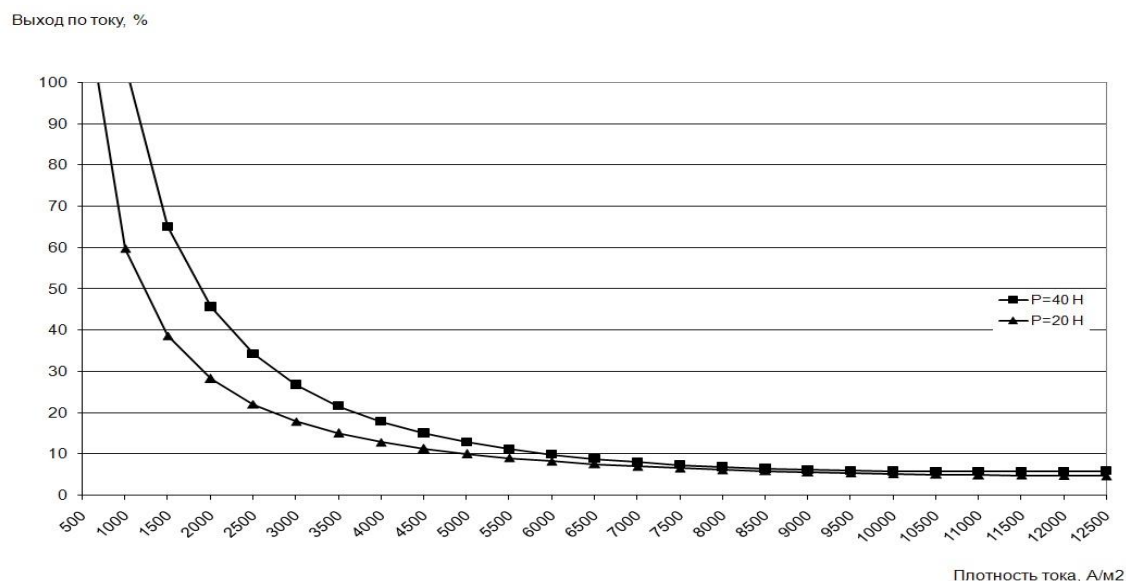


Рис. 4. Влияние плотности тока на выход по току при ЭХМП

Выводы. 1. ЭХМП основных сопряжений двигателей является высокоэффективным процессом приработки трущихся поверхностей: кроме механического воздействия, характеризуемого V_M , процесс приработки ускоряется за счет электрохимических процессов.

2. Ускорение макроприработки возможно за счет подбора оптимального состава электролита. Он должен обладать низкой электропроводимостью, пассивирующими свойствами, а также способствовать поддержанию гидродинамического режима смазки.

3. Имеется возможность управлять процессами приработки за счет изменения скоростного показателя — частоты вращения коленчатого вала и токовых параметров I и U . Режим ЭХМП должен обеспечивать высокий выход по току η_{ad} и минимальный зазор h .

Список источников

1. Семенов В.С. Режим смазки пары трения поршневое кольцо- цилиндровая втулка ДВС// Двигателестроение. — 1991.— №10-11.— С.19-23.

2. Любимов В.В., Китаев Ю.В. Влияние анионного состава электролита на выравнивающие свойства электрохимической обработки с периодической абразивной депассивацией // Электронная обработка материалов. — 1983.— №5. — С.13-17.

3. Каданер Л.И., Котляр А.М., Щербак М.В. и др. Методика исследования кинетики анодного растворения металлов в условиях их абразивного разрушения// Электронная обработка материалов. — 1971. — №1. — С.15-20.

4. Зайдман Г.Н., Верховецкий И.Н. Электрохимическая размерная обработка чугуна при абразивном воздействии// Электронная обработка материалов. — 1971. — №2. — С.17-21.

5. Петров Ю.Н., Корчагин Г.Н., Зайдман Г.Н., Саушкин Б.П. Основы повышения точности электрохимического формообразования. — Кишинев, 1977. — 152с.

6. Мороз И.И. Основы повышения точности электрохимического формообразования. — Кишинев: Штиинца, 1977. — 293с.

7. Замота Т.Н., Чижевская Д.Ю., Бондарец О.А. Повышение долговечности ресурсопределяющих сопряжений машин электрохимико-механической приработкой: Монография / Т.Н. Замота, Д.Ю. Чижевская, О.А. Бондарец. — Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля; ИП Орехов Д.А., 2025. — 430 с.

References

1. Semenov V.S. Lubrication regime of the piston ring-cylinder liner friction pair of the internal combustion engine // Engine building. – 1991. – №. 10-11. – Pp. 19-23.
2. Lyubimov V.V., Kitaev Yu.V. Influence of the anionic composition of the electrolyte on the leveling properties of electrochemical machining with periodic abrasive depassivation // Electronic processing of materials. – 1983. – №. 5. – Pp. 13-17.
3. Kadaner L.I., Kotlyar A.M., Shcherbak M.V. et al. Methodology for studying the kinetics of anodic dissolution of metals under conditions of their abrasive destruction // Electronic processing of materials. – 1971. – № 1. – Pp. 15-20.
4. Zaidman G.N., Verkhovetskiy I.N. Electrochemical dimensional machining of cast iron under abrasive action // Electronic processing of materials. – 1971. – №. 2. – P. 17-21.

5. Petrov Yu.N., Korchagin G.N., Zaidman G.N., Saushkin B.P. Fundamentals of improving the accuracy of electrochemical shaping. – Chisinau, 1977. – 152 p.

6. Moroz I.I. Fundamentals of improving the accuracy of electrochemical shaping. – Chisinau: Shtiintsa, 1977. – 293 p.

7. Zamota T.N., Chizhevskaya D.Yu., Bondarets O.A. Increasing the durability of resource-determining machine joints by electrochemical-mechanical running-in: Monograph / T.N. Zamota, D.Yu. Chizhevskaya, O.A. Bondarets. – Lugansk: Publishing house of Leningrad State University named after V. Dahl; IP Orekhov D.A., 2025. – 430 p.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025

Информация об авторах

Замота Тарас Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118
E-mail: zamota71@gmail.com

Information about the authors

Zamota Taras Nikolaevich, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Department of Automobile Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118
E-mail: zamota71@gmail.com

Чижевская Дарья Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550
E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Chizhevskaya Darya, candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor of the «Automobile Transport» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550
E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Для цитирования:

Замота Т. Н., Чижевская Д.Ю. Повышение долговечности основных сопряжений двигателей электрохимико-механической приработкой // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 39-46.

For citation:

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu. Increasing the durability of the main connections of engines by electrochemical-mechanical running in // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 39-46.

УДК 533.9

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ ВАЛКОВ

Корсунов К. А., Эссельбах Р. В.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SURFACE PLASMA HARDENING OF ROLLS

Korsunov K. A., Esselbakh R. V.

Аннотация. В работе представлена комплексная методика расчета технологических параметров процесса электролитно-плазменной закалки вращающихся деталей, разработанная на основе данных математического моделирования физических процессов в системе "плазменный разряд – вращающийся анод – жидкий электролит". Методика реализована в форме инженерной номограммы и таблицы рекомендуемых режимов, обеспечивающих технологам возможность оперативного определения оптимальных значений силы тока и скорости вращения для получения заданной глубины упрочненного слоя. Экспериментальная верификация методики подтвердила высокую точность прогнозирования с погрешностью не более 12%.

Ключевые слова: плазменная закалка, математическое моделирование, номограмма, технологические параметры, валки, оптимизация режимов, электролит.

Abstract. This paper presents a comprehensive methodology for calculating the technological parameters of the electrolyte-plasma hardening process for rotating parts. Developed based on data from mathematical modeling of the physical processes in the "plasma discharge - rotating anode - liquid electrolyte" system, the methodology is implemented as an engineering nomogram and a table of recommended operating regimes. These tools enable technologists to quickly determine the optimal values of current and rotational speed to achieve a specified hardened case depth. Experimental verification of the methodology confirmed a high prediction accuracy, with an error not exceeding 12%.

Key words: plasma hardening, mathematical modeling, nomogram, technological parameters, rolls, process optimization, electrolyte.

Введение. Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к долговечности и износостойкости вращающихся деталей, таких как прокатные валки, оси и шкивы [1]. Электролитно-плазменная закалка представляет собой перспективный метод поверхностного упрочнения, позволяющий

достигать высокой твердости поверхности при сохранении вязкой сердцевины детали [2]. Однако широкое внедрение данной технологии сдерживается сложностью подбора оптимальных технологических параметров, требующей проведения многочисленных дорогостоящих экспериментов.

Комплексные математические модели, адекватно описывающие взаимосвязанные физические процессы теплопереноса, плазмообразования и фазовых превращений, остаются малодоступными для непосредственного использования в технологических службах предприятий [3]. Существует устойчивая потребность в простых и удобных инструментах, позволяющих назначать рациональные режимы обработки без глубокого погружения в физику процесса [4].

Основная часть. Статья направлена на преодоление разрыва между фундаментальными исследованиями и практическими нуждами производства путем разработки инженерной методики расчета технологических параметров плазменной закалки, основанной на данных математического моделирования и представленной в форме, удобной для промышленного применения.

Основу методики составили результаты многовариантных параметрических исследований комплексной математической модели, разработанной авторами ранее [5]. Модель интегрирует такими физические аспекты процесса:

- уравнения нестационарной теплопроводности в цилиндрической системе координат с учетом температурной зависимости термофизических свойств стали 45 [6];
- кинетику фазовых превращений, включающую прогрев до аустенитного состояния и последующее мартенситное превращение при охлаждении;
- динамику плазменного разряда в жидком электролите, описываемую уравнениями вольт-амперных характеристик с учетом состава раствора [7];
- влияние вращения детали на процессы теплоотвода, стабильность

дугового разряда и унос паровой фазы из межэлектродного промежутка.

Верификация математической модели и разработанной методики проводилась на специализированной экспериментальной установке, разработанной авторами (рис. 1).

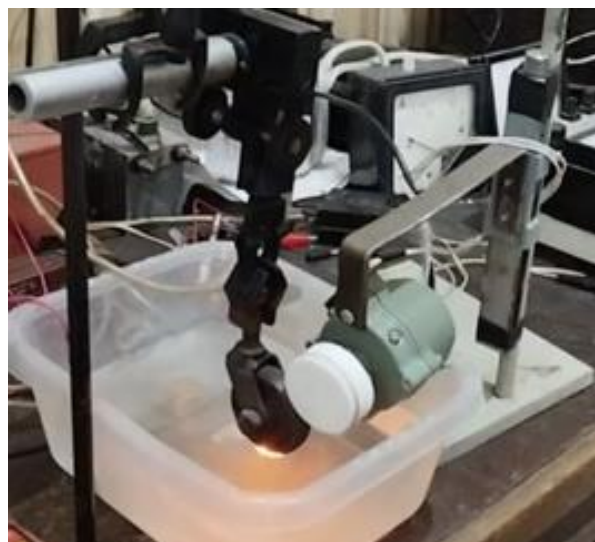


Рис. 1. Установка плазменного упрочнения

Для составления методики были исследованы такие диапазоны технологических параметров: диаметр валка от 30 до 150 мм, сила тока дуги от 3 до 7 А, скорость вращения от 5 до 25 об/мин, три типа электролитов ($NaCl$, Na_2CO_3 , $Na_2CO_3 + Ca$). Для каждого сочетания параметров проводилось компьютерное моделирование с оценкой глубины упрочненного слоя, температурного поля и конечной твердости поверхности.

На основе анализа полученных данных методом нелинейного регрессионного анализа [8] была получена эмпирическая зависимость для глубины упрочненного слоя (h):

$$h = 0.8 \cdot \ln(I) \cdot \left(\frac{25}{\omega}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{D}{70}\right)^{0.3},$$

где I – сила тока, ω – скорость вращения, D – диаметр валка.

Для визуализации характера данной зависимости и упрощения ее восприятия было построено семейство кривых «глубина упрочненного слоя – сила тока» для различных скоростей вращения при диаметре вала 70 мм (рис. 2). Как видно из

графиков, зависимость имеет выраженный нелинейный характер, а увеличение скорости вращения детали при постоянной силе тока приводит к уменьшению глубины прогрева, что полностью согласуется с физической моделью процесса [9].

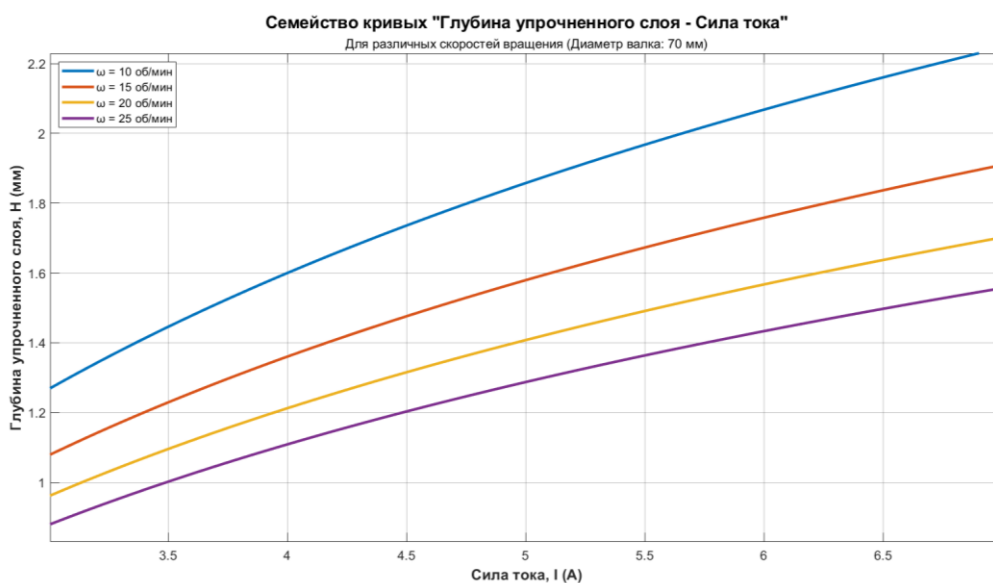


Рис. 2. Зависимость глубины упрочненного слоя от силы тока для различных скоростей вращения (диаметр вала 70 мм)

Несмотря на наглядность графического представления зависимостей, практическое использование формулы и семейства кривых для оперативного подбора режимов в условиях производства может оставаться затруднительным. Для максимального упрощения процедуры выбора параметров была разработана номограмма [10], позволяющая определять параметры обработки для валков диаметром 70 мм при использовании наиболее эффективного электролита $Na_2CO_3 + Ca$ (рис. 3). Номограмма представляет собой контурный график с изолиниями постоянной глубины упрочненного слоя в координатах "сила тока – скорость вращения".

Работа с номограммой не требует специальной подготовки. Исходя из требуемой глубины упрочненного слоя,

находим соответствующую изолинию на номограмме и выбираем любую точку на этой линии, определяя таким образом значения силы тока и скорости вращения. Например, для получения глубины слоя 1.0 мм можно выбрать точку с параметрами $I=5.2$ А, $\omega=15$ об/мин.

Цветовая градация фона номограммы позволяет визуально оценивать зоны оптимальных режимов: синие области соответствуют недостаточному прогреву, красные – перегреву поверхности, зеленые – оптимальным условиям обработки. Для оперативной работы и быстрого назначения режимов на основе статистического анализа результатов моделирования и экспериментальных данных составлена таблица типовых параметров обработки (табл. 1).

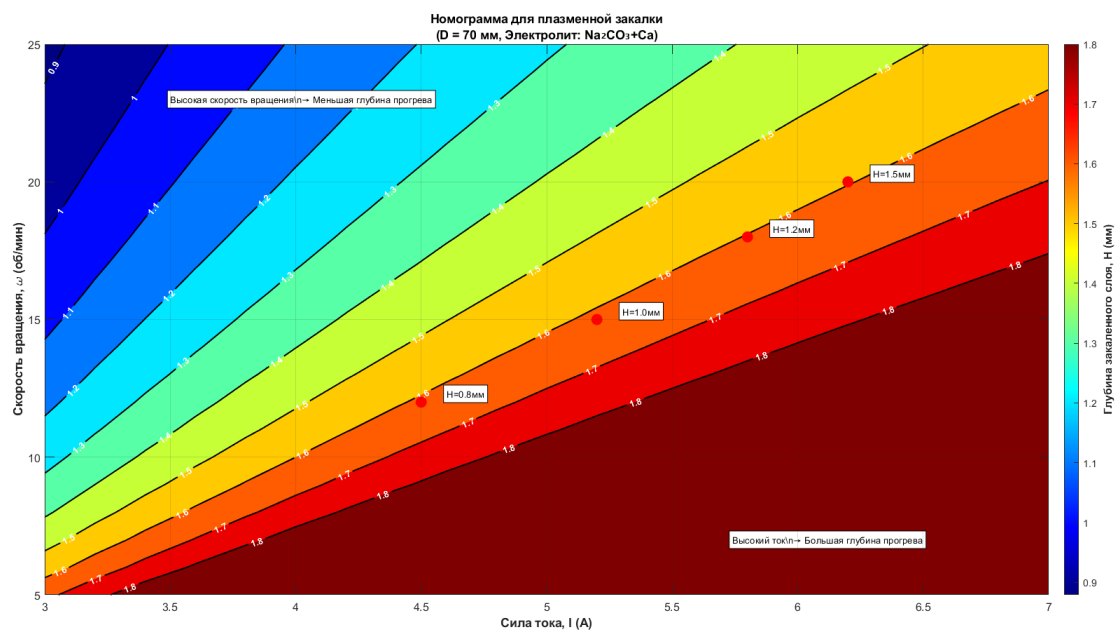


Рис. 3. Номограмма для подбора параметров плазменной закалки валков 70 мм

Таблица 1

Рекомендуемые параметры закалки для валков Ø70 мм (электролит $Na_2CO_3 + Ca$)

Сила тока, I (А)	Скорость вращения, ω (об/мин)	Глубина слоя, H (мм)	Твердость поверхности (HRC)
4.5	12	0.8	54-56
5.2	15	1.0	55-57
5.8	18	1.2	54-56

Для валков, отличающихся от стандартного диаметра 70 мм, разработана простая методика коррекции параметров. Силу тока следует умножить на коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$I_{\text{коррек}} = I_{\text{табл}} \cdot \left(\frac{D}{70}\right)^{0.3},$$

где $I_{\text{табл}}$ – значение тока из табл. 1, D – фактический диаметр валка. Скорость вращения при этом остается неизменной, так как ее влияние на глубину прогрева слабее зависит от диаметра детали.

Разработанная методика прошла комплексную экспериментальную проверку. Сравнение прогнозируемых и фактических параметров обработки показало высокую точность методики.

Для валка диаметром 70 мм при режиме $I=5.2$ А, $\omega=15$ об/мин прогнозируемая глубина слоя составила 1.05 мм, фактическая – 1.02 мм (погрешность +2.9%). Для валка диаметром 100 мм при скорректированном токе $I=5.8$ А получена глубина 1.18 мм при прогнозе 1.15 мм (погрешность 2.6%).

Средняя погрешность прогнозирования глубины упрочненного слоя по всем экспериментам составила 9.5%, максимальная погрешность не превысила 12%. Твердость поверхности во всех случаях находилась в диапазоне 55-57 HRC, что полностью соответствовало прогнозу.

Разработанная методика обеспечивает существенные преимущества для промышленных предприятий:

- Сокращение времени переналадки оборудования – подбор режимов для новой детали сокращается с нескольких часов (при экспериментальном методе) до 5 – 10 минут (при использовании номограммы или таблицы). Это особенно важно в условиях мелкосерийного производства.

- Снижение производственного брака на 25 – 30% за счет исключения неоптимальных режимов обработки, приводящих к недостаточному упрочнению или перегреву поверхности.

- Экономия энергетических ресурсов до 20% за счет работы в зонах максимального КПД процесса. Методика позволяет избежать режимов с повышенным энергопотреблением и низкой эффективностью.

- Стандартизация технологических процессов для всего парка оборудования предприятия. Методика обеспечивает воспроизводимость результатов независимо от квалификации оператора.

- Упрощение внедрения технологии на новых производствах. Предприятиям не требуется проводить собственные дорогостоящие исследования – достаточно использовать готовые рекомендации.

Выводы. Разработанная методика представляет собой законченный научно-прикладной продукт, завершающий цепочку преобразований "фундаментальная модель → верификация → инженерный инструмент". Номограмма и таблица рекомендуемых режимов позволяющих назначать оптимальные параметры обработки без глубокого знания физики процесса, обеспечивая стабильно высокое качество упрочнения.

Основные преимущества предложенного подхода: простота использования, высокая точность прогнозирования, адаптивность к различным производственным условиям. Методика успешно прошла

производственные испытания и готова к широкому внедрению в машиностроительной отрасли. Перспективы дальнейших исследований включают разработку аналогичных методик для легированных сталей и чугунов, а также разработку коррекций для обработки деталей сложной геометрической формы.

Список источников

1. Картонова Л.В., Кечин В.А. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие. Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. – 128 с.
2. Корсунов К.А., Эссельбах Р.В., Малюта Е.В. Плазменное поверхностное упрочнение плазмотроном с жидким электродом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 5 (165). – С. 30-39.
3. Бычкова Е.В. Поверхностное упрочнение деталей из стали и чугуна плазменной закалкой / Нижний Тагил: Коммерческое предложение, 2012.
4. Малюта Е.Р., Корсунов К.А., Эссельбах Р.В. Упрочнение конструкционных материалов плазмотроном с жидким электродом // Металлургия XXI столетия глазами молодых: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 28–29 мая 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 177-179.
5. Корсунов К.А., Эссельбах Р.В. Комплексное математическое моделирование процесса поверхностной закалки вращающихся деталей в плазмотроне с жидким электродом // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 3. – С. 92-101.
6. Радько С.И., Урбах Э.К. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – № 1 (25). – С. 212-215.

7. Александров Д.В., Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю. Введение в гидродинамику: [учеб. пособие]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 112 с.

8. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.

9. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2011. – 448 с.

10. Хованский Г.С. Основы номографии. – М.: Наука, 1976.

References

1. Kartanova L.V., Kechin V.A. Theory and technology of heat treatment: ucheb. posobie. Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovykh. – Vladimir : Izd-vo VIGU, 2020. – 128 p.

2. Korsunov K.A., Essel'bakh R.V., Malyuta E.V. Plasma surface hardening using a liquid electrode plasma torch // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 5 (165). – P. 30-39.

3. Bychkova E.V. Surface hardening of steel and cast iron parts by plasma hardening / Nizhniy Tagil: Kommercheskoe predlozhenie, 2012.

4. Malyuta E.R., Korsunov K.A., Essel'bakh R.V. Hardening of structural materials using a plasma torch with a liquid electrode // Metallurgiya XXI stoletiya glazami molodykh: materialy

Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov, Donetsk, 28–29 maya 2024 goda. – Donetsk: Donetskii natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2024. – P. 177-179.

5. Korsunov K.A., Essel'bakh R.V. Complex mathematical modeling of the surface hardening process of rotating parts in a plasma torch with a liquid electrode // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. – 2025. – № 3. – P. 92-101.

6. Rad'ko S.I., Urbach E.K. The design of an electric arc plasma torch and modeling of its energy characteristics // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. – 2021. – № 1 (25). – P. 212-215.

7. Aleksandrov D.V., Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. Introduction to Fluid Dynamics: [ucheb. posobie]. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2012. – 112 p.

8. Demidenko E.Z. Linear and nonlinear regression. – Moscow: Finansy i statistika, 1981. – 302 p.

9. Golant V.E., Zhilinskiy A.P., Sakharov I.E. Fundamentals of Plasma Physics. – 2nd ed., rev. and add. – St. Petersburg: Lan', 2011. – 448 p.

10. Khovanskiy G.S. Basics of nomography. – Moscow: Nauka, 1976.

Статья поступила в редакцию 20.06.2025

Информация об авторах

Корсунов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

SPIN-код: 4174-9186, AuthorID: 1185459

E-mail: korsunof@mail.ru

Эссельбах Роман Вадимович, старший преподаватель кафедры электроники и радиофизики ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск, ЛНР.

SPIN-код: 9984-4356, AuthorID: 1287838

E-mail: diabazer@yandex.ru

Information about the authors

Korsunov Konstantin, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

SPIN-код: 4174-9186, AuthorID: 1185459

E-mail: korsunof@mail.ru

Esselbakh Roman, senior Lecturer of the Department of Electronics and Radiophysics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Donbass State Technical University», Alchevsk, LPR.

SPIN-код: 9984-4356, AuthorID: 1287838

E-mail: diabazer@yandex.ru

Для цитирования:

Корсунов К. А., Эссельбах Р. В. Разработка методики расчета технологических параметров поверхностной плазменной закалки валков // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 47-53.

For citation:

Korsunov K. A., Esselbakh R. V. Development of a methodology for calculating the technological parameters of surface plasma hardening of rolls // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 47-53.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 631.361.022

СИСТЕМНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЯДА ТИПОРАЗМЕРОВ МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СЕЛЕКЦИОННЫХ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ АКСИАЛЬНО-РОТОРНОГО ТИПА

Бахарев Д. Н., Пастухов А. Г., Вольвак С. Ф.

SYSTEM JUSTIFICATION OF A NUMBER OF TYPES AND SIZES OF THRESHER-SEPARATOR DEVICES FOR SELECTIVE GRAIN HARVESTERS OF THE AXIAL-ROTOR TYPE

Pastukhov A. G., Bakharev D. N., Volvak S. F.

Аннотация. Размерные параметры и масса селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа в значительной степени определяются габаритами молотильно-сепарирующего устройства. В статье методами теории подобия размерности обоснован ряд типоразмеров молотильно-сепарирующих устройств селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа. Реализовано решение π -теоремы без поисковых экспериментальных исследований. Установлено, что для роторных селекционных зерноуборочных комбайнов с диаметром ротора 0,6 метра увеличение диаметра на 10, 20, 30 и 40% приводит к росту пропускной способности с 3,5 кг/с на 4,24; 5,04; 5,92 и 6,86 кг/с соответственно. При этом масса молотильно-сепарирующего устройства возрастёт с 650 кг до 865,2; 1123,2; 1428,1 и 1783,6 кг соответственно.

Ключевые слова: теории подобия размерности, селекционный зерноуборочный комбайн аксиально-роторного типа, ряд типоразмеров.

Abstract. The dimensional parameters and mass of axial-rotor type selection grain harvesters are largely determined by the dimensions of the threshing and separating device. In this article, a number of standard sizes of threshing and separating devices for axial-rotor type selective grain harvesters are substantiated using the methods of similarity theory of dimensionality. The π -theorem was solved without experimental research. It has been established that for rotary selective grain harvesters with a rotor diameter of 0.6 meters, an increase in diameter by 10, 20, 30, and 40% leads to an increase in throughput from 3.5 kg/s to 4.24; 5.04; 5.92; and 6.86 kg/s respectively. At the same time, the mass of the threshing and separating device will increase from 650 kg to 865.2; 1123.2; 1428.1 and 1783.6 kg, respectively.

Key words: dimensional similarity theories, axial-rotary selective grain harvester, range of sizes.

Введение. Технологический процесс уборки зерновых культур, выполняемый зерноуборочными комбайнами аксиально-роторного типа, весьма сложный. Здесь взаимосвязаны процессы среза растений, их транспортировки в молотильно-сепарирующее устройство (МСУ), обмолота, сепарации, накопления урожая в зерновом бункере, измельчения незерновой части урожая и ее разбрасывание по полю, а также разгрузка зернового бункера (рис. 1). Для выполнения уборки зерновых

культур на небольших селекционных участках нужны оптимизированные по размерам и производительности комбайны, осуществляющие обмолот с минимальным количеством макро- и микроповреждений зерна [1-3]. Такой обмолот требует использования щадящих скоростных режимов работы молотильного аппарата, а это наиболее просто достигается путем применения роторов с диаметром D не менее 0,6 метра. Диаметр конструктивно связан с длиной L и массой m ротора.

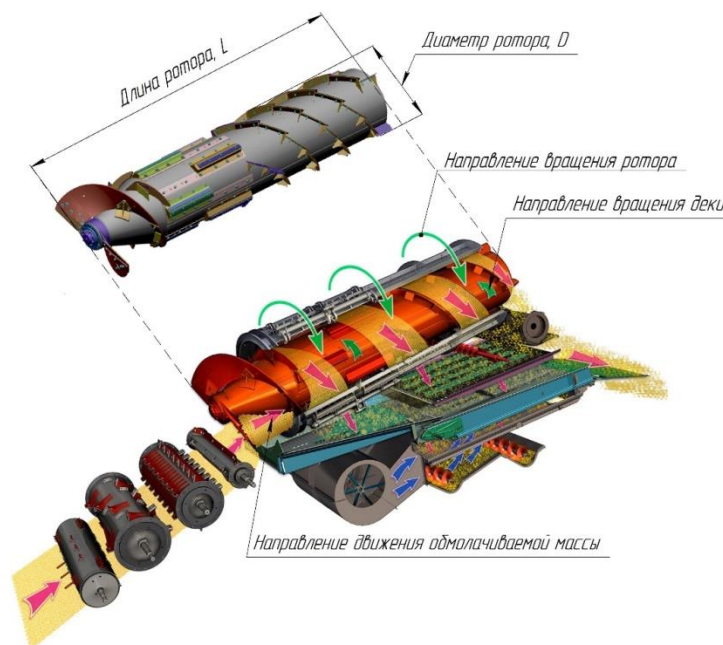


Рис. 1. Аксиально-роторная система обмолота и чистки зерна конструкции Ростсельмаш

Поскольку размерные параметры и общую конструктивную массу селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа в значительной степени определяют габариты МСУ, возникает необходимость обоснования ряда его рациональных типоразмеров [4-7], то есть опираясь на существующие конструктивные особенности наиболее эффективных МСУ, создать ряд комбайнов различных размеров и производительности. Здесь целесообразно использовать методы теории подобия размерности [8, 9].

В настоящее время применяются такие аксиально-роторные селекционные зерноуборочные комбайны ALMACO R1, BAURAL DP 4000, BAURAL SP 2100 [1-3]. Однако МСУ данных комбайнов по ряду эксплуатационных и качественных показателей работы уступают, конструкции МСУ, разработанного в Ростсельмаш. Но МСУ конструкции Ростсельмаш обладает большими габаритными размерами, не позволяющими его использовать в селекционных комбайнах малой производительности. Данное МСУ

необходимо отмасштабировать. Для этого целесообразно спрогнозировать ожидаемый результат получения новых конструктивно-технологических параметров. Это возможно сделать, исключительно опираясь на реальные значения конструктивных параметров существующих роторных селекционных комбайнов (прототипов).

Анализ литературных источников. В источнике [4] представлены результаты аналитического обоснования размерных характеристик ротора МСУ для кукурузоуборочного комбайна. Установлена взаимосвязь диаметра ротора и его длины. Однако отсутствует описание зависимости изменения массы ротора от увеличения его габаритных размеров.

В источнике [6] предложены пути совершенствования аксиально-роторных МСУ, обоснованы длины активных рабочих участков ротора и деки и их влияние на пропускную способность МСУ в целом. При этом закономерности изменения массы МСУ также не описаны.

В источнике [7] представлены результаты оценки эффективности работы ряда серийных зерноуборочных комбайнов с аксиально-роторным МСУ, доказывающие высокую эффективность данного типа молотильного устройства по минимизации показателей макро- и микроповреждений зерна. Исследование выполнено с учетом диаметра и длины роторов МСУ, однако, без анализа их массы.

Следовательно, в настоящее время соотношение длин и диаметров существующих аксиально-роторных МСУ зерноуборочных комбайнов, в том числе и селекционных, изучено достаточно всесторонне. Однако неизученной остается закономерность изменения массы данных

устройств при расширении ряда их типоразмеров.

Цель исследования. Методами системного анализа установить взаимосвязанные закономерности изменения массы аксиально-роторных МСУ селекционных зерноуборочных комбайнов и их пропускной способности при расширении ряда их типоразмеров.

Результаты исследования. Системный подход к расширению ряда типоразмеров МСУ для селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа можно обеспечить путем реализации методов теории подобия размерностей [8, 9]. Данный подход позволяет спрогнозировать увеличение пропускной способности новой модели комбайна q_m и массы m_m аксиально-роторного МСУ при увеличении диаметра ротора. В рамках данного исследования принят ряд увеличений диаметра ротора на 10, 20, 30 и 40% ($D_m = 1,1D_n$, $D_m = 1,2D_n$, $D_m = 1,3D_n$, $D_m = 1,4D_n$). При этом для современных роторных селекционных комбайнов в качестве базовых значений сравниваемых факторов принята: пропускная способность $q_n = 3,5$ кг/с, диаметр ротора $D_n = 0,6$ м, скорость осевого перемещения обмолачиваемой массы внутри МСУ $v = 0,6$ м/с, полная конструктивная масса МСУ $m_n = 650$ кг; среднее значение плотности обмолачиваемой массы, проходящей через МСУ $\rho = 70$ кг/м³ (для зерновых культур).

По известной методике теории подобия вышеприведенные факторы можно обозначить через $x_1 \dots x_k$. Тогда обобщенная зависимость между факторами примет вид [8-9]:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (1)$$

где y – оценочная функция;

x_1, x_2, \dots, x_k – факторы;

k – число факторов, $k=1, 2, \dots, n$.

Согласно π -теореме оценочная функция (1) может быть представлена в виде [8-9]:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}), \quad (2)$$

где $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$ – критерии подобия;

n – число величин, влияющих на процесс;

m – число величин, имеющих основные размерности.

Для масштабируемых МСУ в качестве основных факторов приняты три величины ($m=3$) – D , v и ρ , так как они независимы одна от другой, и любая комбинация, например, двух величин, не дает размерности третьей. Число входящих в уравнение величин $n_i=5$, а число возможных критериев подобия $n_i-m_i=2$.

$$\pi_1 = \frac{q}{l^{a_1} v^{a_2} \rho^{a_3}}; \quad \pi_2 = \frac{m}{l^{b_1} v^{b_2} \rho^{b_3}}. \quad (3)$$

Уравнение размерностей выражения π_1 :

$$MT^{-1} = [L]^{a_1} [LT^{-1}]^{a_2} [L^{-3}M]^{a_3}. \quad (4)$$

Из (4), двигаясь справа налево по мере появления конкретной величины методами теории подобия размерности, получены выражения:

для массы $1=a_3$ или $a_3=1$;

для времени $-1=-a_2$ или $a_2=1$;

для диаметра $0=a_1+a_2-3a_3$.

Следовательно, $a_1=-a_2+3a_3$

или $a_1=-1+3 \cdot 1=2$.

Уравнение размерностей выражения π_2 :

$$M = [L]^{b_1} [LT^{-1}]^{b_2} [L^{-3}M]^{b_3}. \quad (5)$$

Для (5), также как и для (4), получены выражения:

для массы $1=b_3$ или $b_3=1$;

для диаметра $0=b_1+b_2-3b_3$;

для времени $0=-b_2$ или $b_2=0$.

Следовательно, $b_1=-b_2+3b_3$

или $b_1=0+3 \cdot 1=3$.

При подстановке показателей степеней в (3) для π_1 и π_2 формируются критерии подобия:

$$\pi_1 = \frac{q}{D^2 v \rho}; \quad \pi_2 = \frac{m}{D^3 \rho}. \quad (6)$$

На основании (6) выражается масштабный множитель подачи:

$$\frac{q_n}{D_n^2 v_n \rho_n} = \frac{q_m}{D_m^2 v_m \rho_m},$$

где n – индекс фактора для прототипа (натурного образца);

m – индекс фактора для масштабируемой модели.

Тогда:

$$k_q = \frac{q_n}{q_m} = \frac{D_n^2 v_n \rho_n}{D_m^2 v_m \rho_m}. \quad (7)$$

Принято допущение, что $v_n=v_m$, а также $\rho_n=\rho_m$, что не противоречит физике реального процесса обмолота. Тогда:

$$q_m = \frac{q_n \cdot D_n^2}{D_n^2}. \quad (8)$$

Подчеркивая тот факт, что увеличение диаметра ротора ограничено ростом массы МСУ, из (6) формируется соответствующий массовый масштабный множитель:

$$\frac{m_n}{D_n^3 \rho_n} = \frac{m_m}{D_m^3 \rho_m},$$

тогда

$$k_m = \frac{m_n}{m_m} = \frac{D_n^3 \rho_n}{D_m^3 \rho_m}. \quad (9)$$

При допущении, что $\rho_n=\rho_m$ массовый масштабный множитель принимает вид:

$$m_m = \frac{m_n \cdot D_m^3}{D_n^3} . \quad (10)$$

На основании (8) и (10) расчетным путем установлено, что при увеличении диаметра ротора на 10; 20; 30 и 40% пропускная способность комбайна изменится с 3,5 кг/с на 4,24; 5,04; 5,92 и 6,86 кг/с соответственно. Однако при этом полная конструктивная масса МСУ возрастёт с 650 кг до 865,2; 1123,2; 1428,1 и 1783,6 кг соответственно.

Для графоаналитического анализа полученного результата, основанного на численных значениях q_n , q_{m1} , q_{m2} , q_{m3} , q_{m4} и m_n , m_{m1} , m_{m2} , m_{m3} , m_{m4} , построены графические зависимости, проведена их аппроксимация, получены уравнения аппроксимации $y=f(x)$, описывающие процесс с максимальным приближением R^2 (рис. 2 и 3).

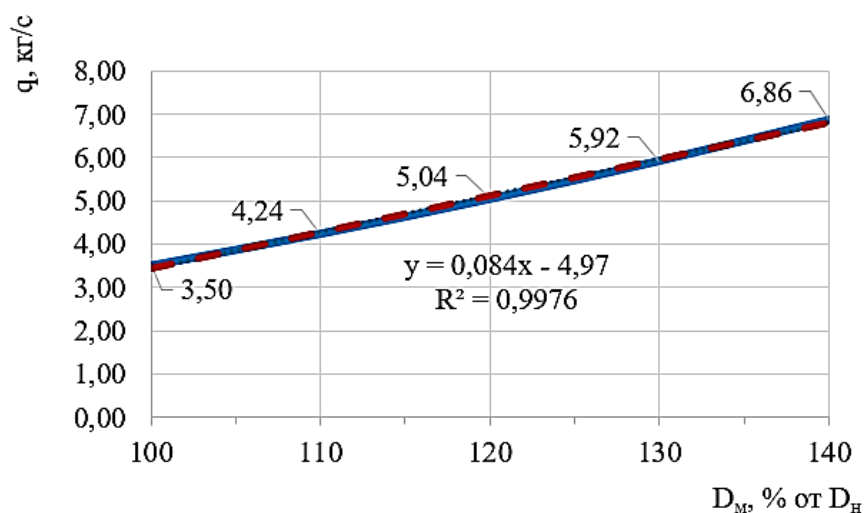


Рис. 2. Прогноз роста пропускной способности аксиально-роторного МСУ в зависимости от увеличения диаметра ротора

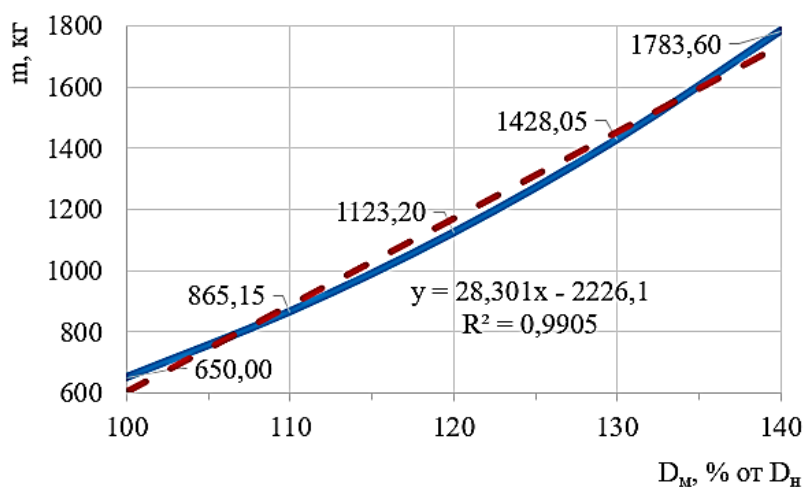


Рис. 3. Прогноз роста массы аксиально-роторного МСУ в зависимости от увеличения диаметра ротора

Полученные уравнения аппроксимации показывают зависимость анализируемой пропускной способности q и массы МСУ m от изменения диаметра его ротора D . При этом можно делать прогноз вариации анализируемых показателей при дальнейшем изменении массы ротора в большую или меньшую сторону. Следует отметить, что предложенный подход не требует проведения дорогостоящих и энергоёмких экспериментальных исследований, поэтому может быть рекомендован при формировании технических заданий и эскизных проектов.

Выводы. 1. Системное обоснование ряда типоразмеров МСУ для селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа целесообразно осуществлять методами теории подобия размерности.

2. При реализации данных методов установлено, что:

- при увеличении диаметра ротора селекционного зерноуборочного комбайна аксиально-роторного типа на 10; 20; 30 и 40% пропускная способность комбайна изменится с 3,5 кг/с на 4,24; 5,04; 5,92 и 6,86 кг/с соответственно. При этом закономерность процесса увеличения пропускной способности с достоверностью в 99% описывается линейной функцией $y = 0,084x - 4,97$;

- при увеличении диаметра ротора селекционного зерноуборочного комбайна аксиально-роторного типа на 10; 20; 30 и 40% полная конструктивная масса ротора возрастёт с 650 кг до 865,2; 1123,2; 1428,1 и 1783,6 кг соответственно. При этом закономерность процесса увеличения массы ротора с достоверностью в 99% описывается степенной функцией $y = 28,301x - 2226,1$.

3. Полученные уравнения аппроксимации позволяют осуществлять обоснованный прогноз изменения анализируемых величин при расширении ряда типоразмеров селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа.

4. Предложенный подход не требует проведения экспериментальных исследований, поэтому рекомендован для применения разработчиками комбайновой техники на этапе формирования технических заданий и эскизных проектов.

Список источников

1. Гольяпин В.Я., Мишуров Н.П. Машинно-технологическое обеспечение селекции и семеноводства зерновых культур: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020 – 96 с.

2. Редреев Г.В., Янковский К.А., Голованов Д.А., Помогаев В.М., Демчук Е.В. Результаты полевых испытаний селекционного комбайна КС-130-SE // Вестник Омского ГАУ. – 2024. – № 3 (55). – С. 132–143.

3. Анализ моделей, технических характеристик и конструктивных особенностей селекционных и семеноводческих зерноуборочных комбайнов / Е.В. Демчук, Д.А. Голованов, Е.И. Мальцева, К.А. Янковский // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3(51). – С. 204-215. – EDN VKSYRR.

4. Бахарев Д.Н. Аналитическое обоснование размерных характеристик ротора молотильно-сепарирующего устройства для кукурузоуборочного комбайна / Д.Н. Бахарев, А.А. Добрицкий // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2023. – № 2(38). – С. 11-16. – EDN DKTOMF.

5. Пневматическая система дифференцированного обмолота кукурузы / А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак, Р.В. Черников // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13, № 4. –

С. 42-47. – DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-42-47. – EDN ZIADQG.

6. Совершенствование аксиально-роторных молотильно-сепарирующих устройств / В.И. Пляка, Н.В. Алдошин, А.И. Панов // *Агроинженерия*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 16-21.

7. Оценка эффективности работы зерноуборочного комбайна с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством / В.И. Оробинский, В.П. Шацкий [и др.] // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2020. – Т. 13, № 1(64). – С. 12-18.

8. Алешкин В.Р., Рошин П.М. *Механизация животноводства* – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.

9. Бахарев Д. Н. Бионические основы разработки и конструирования эффективных шипов молотильно-сепарирующих устройств для кукурузы / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. – 2017. – № 3(15). – С. 3-13. – EDN ZVHQPZ.

References

1. Goltypin V.Ya., Mishurov N.P. *Machine and Technological Support for Breeding and Seed Production of Grain Crops: Analytical Review*. Moscow: Rosinformagrotekh, 2020, 96 p.

2. Redreev G.V., Yankovsky K.A., Golovanov D.A., Pomogaev V.M., Demchuk E.V. Results of Field Trials of the KS-130-SE Breeding Combine // *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. 2024. No. 3 (55). Pp. 132–143.

3. Analysis of Models, Technical Characteristics, and Design Features of Breeding and Seed Production Grain Harvesters / E.V.

Demchuk, D.A. Golovanov, E.I. Maltseva, and K.A. Yankovsky // *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. – 2023. – No. 3(51). – Pp. 204-215. – EDN VKSYRR.

4. Bakharev D.N. Analytical substantiation of the dimensional characteristics of the rotor of the threshing and separating device for a corn harvester / D.N. Bakharev, A.A. Dobritsky // *Innovations in the AIC: Problems and Prospects*. – 2023. – No. 2(38). – Pp. 11-16. – EDN DKTOMF.

5. A.G. Pastukhov, D.N. Bakharev, S.F. Volvak, R.V. Chernikov. Pneumatic System for Differential Threshing of Corn. *Agricultural Machinery and Technologies*. – 2019. – Vol. 13, No. 4. – Pp. 42-47. – DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-42-47. – EDN ZIADQG.

6. Improvement of Axial-Rotor Threshing and Separating Devices / V.I. Plyaka, N.V. Aldoshin, A.I. Panov // *Agroengineering*. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – Pp. 16-21.

7. Evaluation of the efficiency of a grain harvester with an axially-rotary threshing and separating device / V.I. Orobinsky, V.P. Shatsky [et al.] // *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. – 2020. – Vol. 13, No. 1(64). – Pp. 12-18.

8. Aleshkin V.R., Roshchin P.M. *Mechanization of Animal Husbandry*. Moscow: Agropromizdat, 1985. 336 p.

9. Bakharev D.N., Volvak S.F. Bionic Fundamentals of Developing and Designing Efficient Threshing and Separating Devices for Corn. *Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects*. – 2017. – No. 3(15). – Pp. 3-13. – EDN ZVHQPZ.

Статья поступила в редакцию 15.07.2025

Информация об авторах

Бахарев Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 1175-0650, AuthorID: 925271
E-mail: baharevdn_82@mail.ru

Пастухов Александр Геннадиевич, доктор технических наук, профессор инженерного факультета ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина», г. Белгород.
SPIN-код: 3891-3927, AuthorID: 575599
E-mail: pastukhov_ag@mail.ru

Вольвак Сергей Федорович, кандидат технических наук, профессор инженерного факультета ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина», г. Белгород.
SPIN-код: 7701-7068, AuthorID: 770984
E-mail: volvak.s@yandex.ru

Information about the authors

Bakharev Dmitry Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobile Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 1175-0650, AuthorID: 925271
E-mail: baharevdn_82@mail.ru

Pastukhov Alexander Gennadievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Engineering of the Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod.
SPIN-код: 3891-3927, AuthorID: 575599
E-mail: pastukhov_ag@mail.ru

Volvak Sergey Fedorovich Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Engineering of the Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod.
SPIN-код: 7701-7068, AuthorID: 770984
E-mail: volvak.s@yandex.ru

Для цитирования:

Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г., Вольвак С.Ф. Системное обоснование ряда типоразмеров молотильно-сепарирующих устройств для селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 54-61.

For citation:

Bakharev D.N., Pastukhov A.G., Volvak S.F. System justification of a number of types and sizes of thresher-separator devices for selective grain harvesters of the axial-rotor type // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 54-61.

УДК 621.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРОЦЕСС «LURGI»

Никитин Ю. Н., Чижевская Д. Ю., Дубасов А. В., Сало В. И.

IMPROVEMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM OF COAL GAS GENERATORS USING THE "LURGI" PROCESS

Nikitin Yu. N., Chizhevskaya D. Yu., Dubasov A. V., Salo V. I.

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы использования газификации угля для сельскохозяйственных предприятий. На основании анализа литературных источников усовершенствована транспортная системы подачи угля в газогенератор и золоудаления процесса «Lurgi», применение которой позволит повысить эффективность газогенераторов. Генераторный газ, полученный с использованием технологии «Lurgi», может быть использован для получения качественных моторных топлив для производства электроэнергии и выработки тепловой энергии.

Ключевые слова: уголь, газогенератор, сельское хозяйство, транспортная система, генераторный газ, моторное топливо, тепловая энергия.

Abstract. This article examines the potential of coal gasification for agricultural enterprises. Based on a literature review, the Lurgi process's coal feed and ash removal systems have been optimized, which will improve the efficiency of gasifiers. Generator gas produced using the Lurgi technology can be used to produce high-quality motor fuels for electricity and thermal energy generation.

Keywords: coal, gas generator, agriculture, transport system, generator gas, motor fuel, thermal energy.

Введение. Уголь по-прежнему занимает очень прочные позиции, несмотря на глобальное лидерство нефти и газа как первичных источников энергии. Роль угля в энергетическом балансе большинства стран будет возрастать в 21 веке несмотря на то, что возобновляемые источники энергии ждет бум в течение следующего десятилетия. Это связано в первую очередь с ростом издержек на добычу нефти и газа, так и с перспективой их исчерпания в ближайшем будущем. Запасы угля в мире на порядок превышают запасы нефти и

газа. В настоящий момент доля угля в мировом топливно-энергетическом балансе составляет около 23%. Объем добычи угля в РФ на 2020 г. составляет 440 млн т, и за восемь лет прирост достиг 30%, или почти 100 млн т. При этом на основе угля производится 38% электрической энергии. Прирост потребления угля за период 2000-2020 гг., по прогнозам Международного энергетического агентства должен составить 40-45%. Южная Африка использует уголь для выработки 94%, а

Китай и Индия – до 70-75% электроэнергии [1, 2, 3].

В мире начинают формироваться региональные программы энергоснабжения, ориентированные на локальные источники энергии, чтобы ослабить зависимость от конъюнктуры мирового энергетического рынка. Программы включают газификацию угля как альтернативный источник газа для промышленности и сельского хозяйства. Размещение энерготехнологических предприятий, производящих продукты углепереработки, на коротком расстоянии от угледобывающих предприятий позволит снизить транспортные расходы. В свою очередь повышение добавочной стоимости с одной тонны угля поспособствует увеличению налогооблагаемой базы и экономическому росту в угольных регионах. На текущий момент строятся новые заводы и разрабатываются технологии улавливания CO_2 для более чистого производства угольного газа. В целом предвидится довольно большой отраслевой рост [1, 4].

Мировой рынок газифицированного угля в период 2021-2025 годов, по данным ReportLinker, вырастет на \$12,75 млрд. Это среднегодовой темп роста на 21%. Рынок добычи угля в 2021 году оценивается в \$790 млрд. Прогнозируется, что он будет расти более медленными темпами: на 2% ежегодно до 2025 года [5].

Россия располагает более чем 20 % мировых запасов угля, поэтому технология газификации угля для нее имеет стратегическое значение [5].

Основными недостатками этой альтернативы по сравнению с нефтегазовыми технологиями являются: более высокая капиталоемкость основных процессов и значительные затраты на

очистку газа от вредных примесей. Однако при сравнении с традиционными технологиями сжигания угля существуют весомые преимущества: очистка газа перед сжиганием дешевле, чем очистка дымовых выбросов угольных электростанций. При сжигании генераторного газа, полученного из угля, существенно снижаются выбросы оксидов азота и углекислого газа. Удельные суммарные выбросы NO_x , SO_x , CO и пыли составляют 0,3 кг/Гкал, что в 25-30 раз ниже, чем у ТЭЦ или угольной котельной (сжигание угля является источником более чем 70% выбросов CO_2), ниже действующих нормативов и на два порядка ниже, чем в коксохимическом производстве. Применение технологии газификации позволяет в отдельных случаях на 95% сократить выброс основных загрязняющих веществ [1, 2, 6].

Проблема энергодефицита электроэнергии для регионов Российской Федерации стоит довольно остро, так по данным экспертов ЭКОПСИ [7], объем прогнозируемого к 2030 году энергодефицита в стране может достигнуть 14,2 ГВт. Наибольший энергодефицит приходится на сельскохозяйственное производство, качество энергии, поставляемой предприятиям агропромышленного комплекса, находится на низком уровне [8].

Выработка собственной электроэнергии с использованием стационарных электростанций, способных работать как на традиционном моторном топливе, так и на альтернативных моторных топливах (генераторный газ), является одним из вариантов устранения дефицита электроэнергии агропромышленных комплексов [9, 10].

Сельскохозяйственные объекты сохраняются сложности в подключении к

магистральному газу: много производств построено вдали от газопроводов. В то время как газификация является стимулом для развития сельхозпроизводства, создания новых агропредприятий [11].

Генераторный газ, произведенный газификацией каменного и бурого угля позволяет использовать его в сельском хозяйстве для сушильных агрегатов различного предназначения, в том числе зерносушилки, агрегаты витаминно-травяной муки, для котельных, работающих на природном газе либо мазуте и для выработки электроэнергии при помощи автономных энергоблоков, работающих на газе из угля. Станции газификации угля могут быть расположены на удалении от потребителей. Особенно актуальным является использование газификации угля для удаленных сельскохозяйственных предприятий, расположенных на территории угольных бассейнов [12].

Создание эффективных технологий газификации угля, позволяющих получать конкурентоспособные продукты и генерировать электрическую и тепловую энергии, в том числе для сельского хозяйства, является приоритетной задачей мировой энергетической стратегии [1, 13].

Целью исследования является совершенствование транспортной системы угольных газогенераторов, использующих процесс «Lurgi», с целью производства качественных моторных топлив и тепловой энергии для сельского хозяйства.

Метод решения. При использовании различных марок и способов газификации углей химический состав газов не одинаковый и может существенно отличаться [14].

Процесс «Lurgi» заключается в газификации угля в неподвижном слое с использованием паровоздушного или парокислородного дутья. Транспортная система подачи угля размером 5-30 мм в газогенератор и из него золы состоит из соответствующих бункеров, играющих роль шлюзов, где происходит свободное истечение продуктов газификации.

К преимуществам технологии «Lurgi» можно отнести:

1. Широкие масштабы внедрения процесса и многолетняя апробация процесса.
2. Газификация происходит под давлением, следовательно, в случае получения синтез-газа имеем экономию расходов на компрессию.

Состав газа, получаемого по методу «Lurgi», существенно зависит от уровня температур [15] (табл. 1). Показатели горючих компонентов имеют довольно большое различие.

Для экономии электроэнергии и автоматического управления процессом газификации модифицирована транспортная система подачи угля в газогенератор [15, 17] за счет применения подпружиненного штока с роликом (4), который при уменьшении массы угля в реакционной зоне перемещает решетку (3) и закрепленную на ней стойку со шлицами (5) в осевом направлении, которая через систему рычагов открывает шлюзовую емкость для угля (8) до тех пор, пока масса угля в газогенераторе не восстановится (рис. 1 а, б, в). При использовании системы автоматизированной загрузки угля продуктивность газогенератора составит 45 ± 5 тыс. м³ влажного газа в час. Экономия электроэнергии достигнет 10кВт в час.

Таблица 1

Основные показатели газификации угля топлив по методу «Lurgi»

Показатель	По данным [16]	По данным [15]
Производительность газогенератора:		
по сухому углю, т/ч	40–75	-
по сухому газу, м ³ /ч	75000	-
Коэффициент использования углерода, %	90	-
КПД газификации, %	75–85	-
Температура, °С:		
в зоне реакции	750–1100	-
газа на выходе	260–430	-
Время пребывания топлива в газогенераторе, с	≈5000	-
Расход:		
угля, кг на 1000 м ³ сухого газа	800–650	-
кислорода, м ³ на 1000 м ³ (CO+H ₂)	210–250	-
Выход сухого газа, м ³ на 1 т угля	1200–1500	-
Теплота сгорания газа, кДж/м ³	11900–16300	-
Состав сухого газа, % (об.):		
CO ₂ +H ₂ S	25–31	6
CO	17–25	58
H ₂	40–42	26
CH ₄	9–10	9
N ₂	0,5–1	1

Предложена модификация транспортной системы золоудаления процесса «Lurgi» [7] за счет снабжения решетки (5) диском (9), в нижней части которого выполнен бурт в виде эксцентрика, который контактирует с подпружиненным роликом (8), размещенным в корпусе (2). Применение предложенных нововведений позволяет встряхивать шихту и тем самым разрушать спеченные угли и золу, что облегчает процесс транспортировки золы в шлюзовую емкость для золы (7), при этом достигается экономия электроэнергии 10 кВт в час и воды 1 т в сутки (г, д, е).

Метод усовершенствования транспортной системы удаления жидкого шлака из газогенератора под давлением [17]. На под (1) газогенератора через загрузочную камеру засыпается уголь с размером частиц 5-10 мм (рис. 2, а). В результате газификации угля методом «Lurgi» образуется жидкий шлак. Жидкий шлак собирается в нижней части газогенератора и находится там до

момента поворота кислородно-газовой горелки (2). При этом давление снижается и шлак переходит через закалочную камеру (3), в которой происходит его грануляция в воде; гранулированный шлак попадает в шлюзовую емкость для золы (4) (рис. 2, б). При этом отверстие к шлюзовой емкости для золы открыто. Уровень золы в закалочной камере находится так, что бы поплавочная система (5) держала отверстие к шлюзовой емкости для золы открытым. При постепенном заполнении шлюзовой емкости для золы шлаком уровень воды в закалочной камере возрастает, и поплавковая система понемногу перемещается вниз до полного закрытия отверстия в шлюзовую емкость. Шлюзовая емкость полностью заполнена (рис. 2, в). Гранулы шлака выгружаются из шлюзовой емкости, содержащей минимум воды. Далее возвращают кислородно-газовую горелку в рабочее положение. Жидкий шлак собирается в нижней части

газогенератора и находится там до момента поворота кислородно-газовой горелки. Открывается вентиль 6, вода из закалочной камеры частично перемещается в шлюзовую

емкость и полностью заполняет ее. Поплавочная система 5 открывает отверстие шлюзовой емкости. Вентиль закрывается.

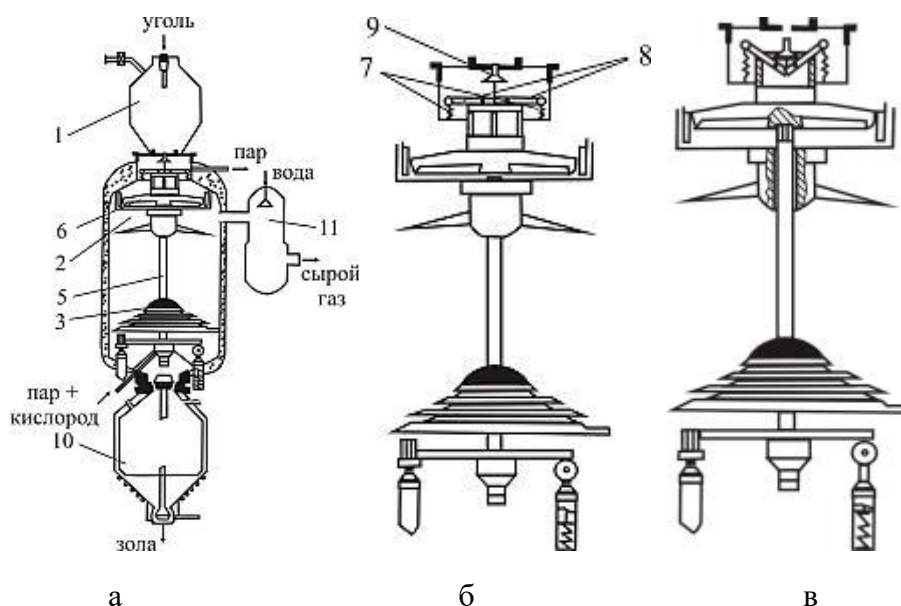
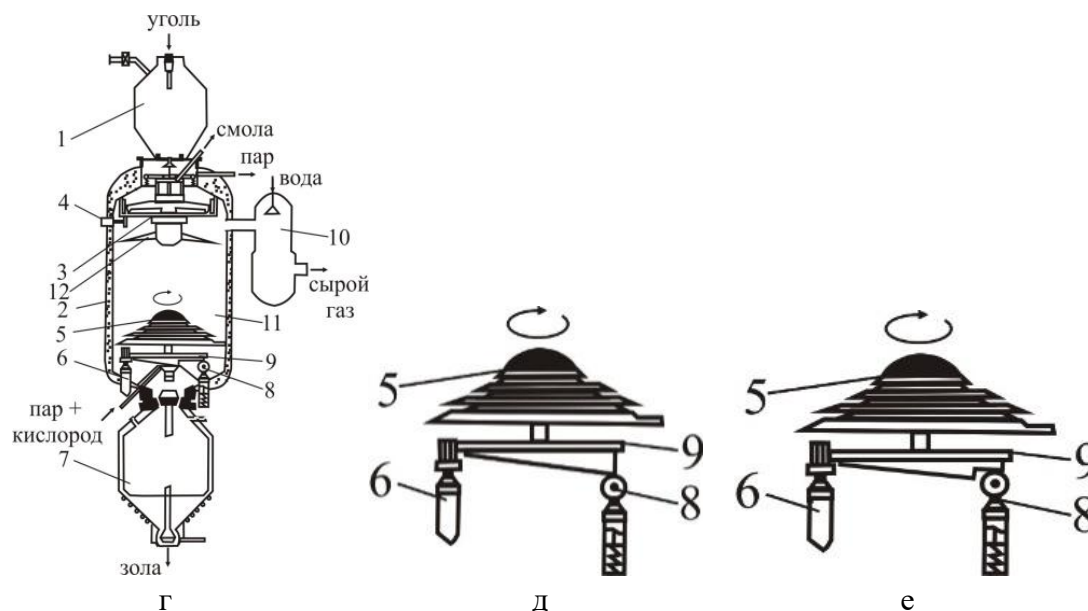


Рис. 1. Модернизированный газогенератор «Lurgi»:

а, б – шлюзовая емкость для угля в закрытом состоянии; в – шлюзовая емкость для угля в открытом состоянии: 1 – шлюзовая емкость для угля; 2 – под; 3 – решетка; 4 – подпружиненный шток с роликом; 5 – стойка со шлицами; 6 – распределитель; 7 – пружины; 8 – рычаги; 9 – клапан, 10 – шлюзовая емкость для золы; 11 – скруббер-холодильник



г – газогенератор; д – верхнее положение решетки; е – нижнее положение решетки: 1 – шлюзовая емкость для угля; 2 – охлаждаемый корпус водой; 3 – распределитель; 4 – привод; 5 – решетка; 6 – привод решетки; 7 – шлюзовая емкость для золы; 8 – подпружиненный ролик; 9 – диск, в нижней части которого выполнен борт в виде эксцентрика; 10 – скруббер-холодильник; 11 – рабочая камера; 12 – клиновидный подвижный рычаг

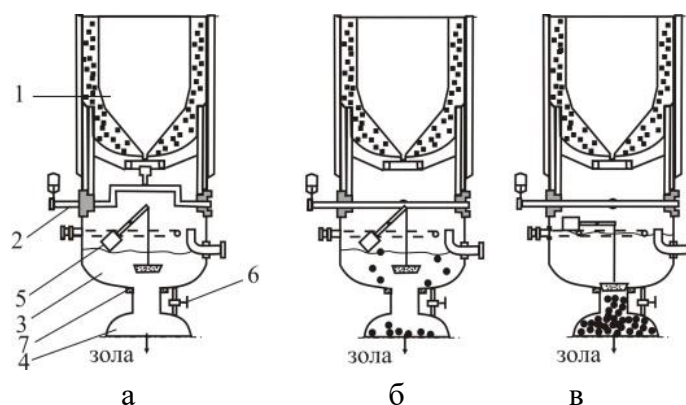


Рис. 2. Газогенератор под давлением с транспортной системой удаления жидкого шлака:

1 – под; 2 – кислородно-газовая горелка; 3 – закалочная камера; 4 – шлюзовая емкость для золы; 5 – поплавоочная система; 6 – вентиль; 7 – система подачи и стока воды

Кислородно-газовая горелка (3) включается одновременно с подачей напряжения на графитовые электроды (8) и выключается после прогрева угля до требуемой температуры. Подается газифицирующий агент под давление. Горелка потребляет небольшое количество кислорода и природного газа, поскольку предназначена не для разогрева угля, а для уменьшения перепада температуры по толщине пода. После запуска процесса газификации горелка поворачивается с помощью механизма (5) в сторону отверстия в днище пода (2), давая возможность расплавленной золе стекать в закалочную камеру (6). Применение графитовых электродов способствует улучшению транспортной системы удаления жидкого шлака (рис. 3). На под 2 газогенератора засыпается уголь с размером частиц 5-10 мм, затем на графитовые электроды 8 подается напряжение. Через угольную шихту и графитовые электроды протекает электрический ток. При выгорании углерода в зоне контакта частиц угля электрическое сопротивление угольной массы возрастает, увеличивается напряжение. Под 2 и частицы угля в зоне графитовых электродов 8 разогреваются до заданной температуры, а затем подается газифицирующий агент. В результате газификации угля образуется

жидкий шлак. Жидкий шлак из пода 2 попадает в закалочную камеру 6, а оттуда в шлюзовую емкость для золы 7.

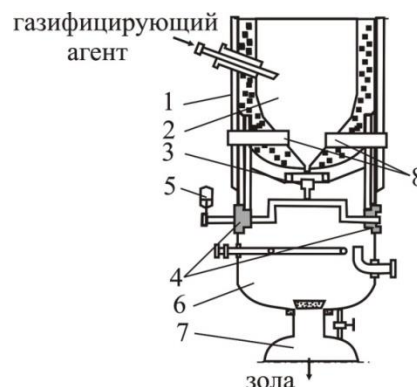


Рис. 3. Газогенератор под давлением для удаления жидкого шлака:

1 – корпус; 2 – под; 3 – кислородно-газовая горелка; 4 – подшипники скольжения; 5 – механизм поворота кислородно-газовой горелки; 6 – закалочная камера; 7 – шлюзовая емкость для золы; 8 – графитовые электроды

Синтез-газ, полученный с использованием технологии «Lurgi», по варианту [16] может быть использован для получения качественных моторных топлив. Для этого применяются альтернативные технологии получения качественных моторных топлив, включающие стадии газификации твердого сырья в смесь CO и H₂ и последующего синтеза углеводородных смесей, используемых в качестве бензина, дизельного топлива или компонентов моторных топлив (рис. 4) [16].

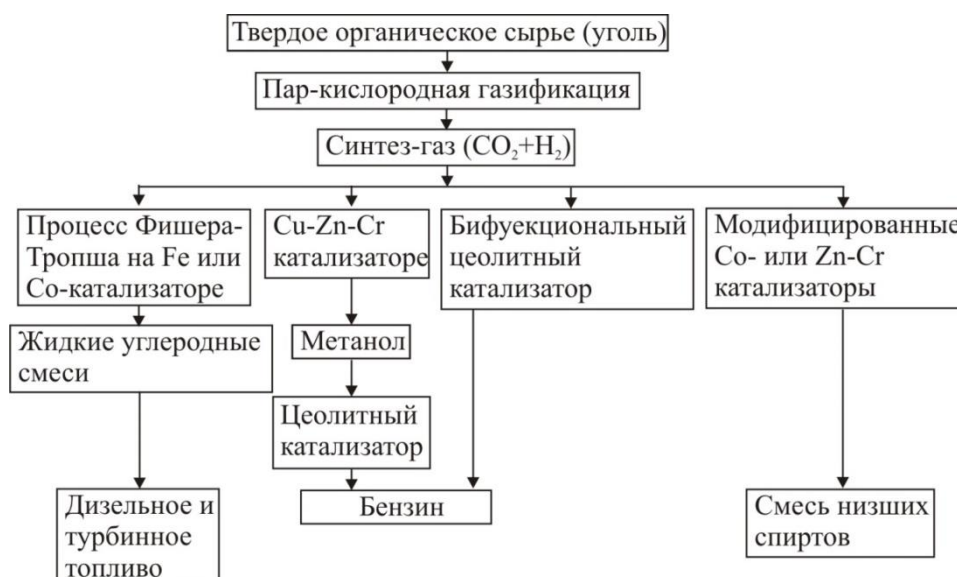


Рис. 4. Схема альтернативных технологий получения качественных моторных топлив

Выводы. 1. Рассмотрены перспективы использования газификации угля для сельского хозяйства.

2. Усовершенствованы транспортные системы подачи угля в газогенератор и золоудаления процесса «Lurgi».

3. Модернизация позволит повысить эффективность газогенераторов, использующих процесс «Lurgi».

4. Рассмотрена возможность использовать синтез-газа, полученный с использованием технологии «Lurgi» для получения качественных моторных топлив.

Список источников

1. Степанов С.Г., Исламов С.Р. Газификация угля: возврат в прошлое или шаг в будущее? // Новости теплоснабжения». – №1(77). – 2007. <http://www.nts.ru>.
2. Charles C. Mann Renewables Aren't Enough. Clean Coal Is the Future MAR 25, 2014 <https://www.wired.com/2014/03/clean-coal/>.
3. Половян А. В., Шемякина Н. В., Гриневская С. Н. Тренды угольной промышленности Донбасса // Вестник Института экономических исследований. – 2021. – №2 (22). – С. 5-20.
4. Газификация угля спустя 100 лет снова популярна. Кто в выигрыше? 4 декабря 2021 [https://investfuture.ru/articles/id/gazifikatsija-](https://investfuture.ru/articles/id/gazifikatsija-uglja-spustja-100-let-snova-populjarna-kto-v-vyigryshe)

[uglja-spustja-100-let-snova-populjarna-kto-v-vyigryshe](https://investfuture.ru) © Investfuture.ru

5. Современное применение каменного угля. Источники энергии интернет-журнал про энергию <https://beelead.com/primenenie-uglya/>.

6. Тасейко О.В., Михайлюта С.В., Спицына Т.П., Леженин А.А., Соколов В.С., Хлебопрос Р.Г. Экологическая эффективность технологии газификации угля на примере Красноярской агломерации <https://www.modernproblems.org.ru/ecology/24>].

7. Шесть шагов от энергодефицита. <https://www.rbc.ru/newspaper/2025/04/23/6806710c9a7947155691b18e>.

8. Зазуля А.Н. Использование биогазовых установок в электроснабжении сельскохозяйственных предприятий Тамбовской области / А.Н. Зазуля, А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Н.А. Хребтов//Наука в центральной России. – 2013. – № 4. – С. 66-71.

9. Калинин В.Ф. О возможностях использования альтернативных источников энергии / В.Ф. Калинин, К.А. Набатов, А.М. Шувалов, А.В. Кобелев // Вестник ТГТУ. – 2003. – №3, т. 9. – С. 450-456.

10. Кобелев А.В. Повышение эффективности систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии: дис. канд. тех. наук: 05.09.03. – Тамбов, 2004. – 145 с.

11. Специфика газификации сельскохозяйственных объектов. <https://www.gazprommap.ru/articles/farm/>.

12. Газификация угля разработка газификации угля термококс-с газификация каменного и бурого угля <http://gazogenerator.com/gazogeneratori-na-kamennom-ugle/gazifikaciya-uglya-razrabotka-gazifikacii-uglya-termokoks-s-gazifikaciya-kamennogo-i-burogo-uglya/>.

13. Пряткина В.С., Белов А.А., Иванов В.В., Балтян В.Н., Чеботарев В.И. Газификация угля и ее применение в энергетике // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2018. – №3 (199). – С. 42-47 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazifikatsiya-uglya-i-ee-primenenie-v-energetike> (дата обращения: 26.09.2022).

14. Галькеева А.А., Мингалеева Г.Р., Горбунов С.Ю. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. №11-12. С. 69-79 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-ugley-razlichnyh-marok-dlya-proizvodstva-energii-i-himicheskikh-produktov>.

15. Газификация твердого топлива [Текст] : учебное пособие / А.С. Алешина, В.В. Сергеев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т, Нац. исслед. ун-т. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 199 с.

16. Переработка углей в синтетические жидкие топлива: учебное пособие / С.Н. Козлов, А.В. Фоминых, И.Н. Филимонова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – 48 с.

17. Химические вещества из угля. Пер. с нем. / Под общ. ред. И.В. Калечица. – М.: Химия, 1988. – 616 с.

References

1. Stepanov S.G., Islamov S.R. Coal Gasification: A Return to the Past or a Step into the Future? // Heat Supply News. – No. 1 (77). – 2007, <http://www.ntsnu.ru>.

2. Charles C. Mann Renewables Aren't Enough. Clean Coal Is the Future MAR 25, 2014 <https://www.wired.com/2014/03/clean-coal/>.

3. Polovyan A.V., Shemyakina N.V., Grinevskaya S.N. Trends in the Donbass Coal Industry // Bulletin of the Institute of Economic Research. – 2021. – No. 2 (22). – Pp. 5-20.

4. Coal Gasification Is Popular Again After 100 Years. Who Wins? December 4, 2021 <https://investfuture.ru/articles/id/gazifikatsiya-uglja-spustja-100-let-snova-populjarna-kto-v-vyigryshe> © Investfuture.ru

5. Modern Use of Coal. Energy Sources online magazine about energy <https://beelead.com/primenenie-uglya/>.

6. Taseiko O.V., Mikhailyuta S.V., Spitsyna T.P., Lezhenin A.A., Sokolov V.S., Khlebopros R.G. Environmental Efficiency of Coal Gasification Technology: The Case of the Krasnoyarsk Agglomeration <https://www.modernproblems.org.ru/ecology/24>].

7. Six Steps Away from Energy Deficit. <https://www.rbc.ru/newspaper/2025/04/23/6806710c9a7947155691b18e>.

8. Zazulya A.N. Use of biogas plants in power supply of agricultural enterprises of the Tambov region / A.N. Zazulya, A.V. Kobelev, S.V. Kochergin, N.A. Khrebtov // Science in central Russia. – 2013. – No. 4. – P. 66-71.

9. Kalinin V.F. On the possibilities of using alternative energy sources / V.F. Kalinin, K.A. Nabatov, A.M. Shuvalov, A.V. Kobelev // Bulletin of TSTU. – 2003. – No. 3, v. 9. – P. 450-456.

10. Kobelev A.V. Improving the Efficiency of Power Supply Systems Using Renewable Energy Sources: Cand. Sci. (Eng.) Dissertation: 05.09.03. – Tambov, 2004. – 145 p.

11. Specifics of Gasification of Agricultural Facilities. <https://www.gazprommap.ru/articles/farm/>.

12. Coal Gasification: Development of Coal Gasification: Termokoks-S: Gasification of Hard and Brown Coal <http://gazogenerator.com/gazogeneratori-na-kamennom-ugle/gazifikaciya-uglya-razrabotka-gazifikacii-uglya-termokoks-s-gazifikaciya-kamennogo-i-burogo-uglya/>.

13. Pryatkina V.S., Belov A.A., Ivanov V.V., Baltyan V.N., Chebotarev V.I. Coal Gasification

and Its Application in Power Engineering // News of Universities. North Caucasus Region. Series: Technical Sciences. – 2018. – No. 3 (199). – Pp. 42-47.

<https://cyberleninka.ru/article/n/gazifikatsiya-uglya-i-ee-primeneniye-v-energetike>.

14. Galkeeva A.A., Mingaleeva G.R., Gorbunov S.Yu. Analysis of the Use of Various Coal Grades for the Production of Energy and Chemical Products // News of Universities. Problems of Power Engineering. 2015. No. 11-12. P. 69-79 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-ugley-razlichnyh-marok-dlya-proizvodstva-energii-i-himicheskikh-produktov> (date of access: 09/26/2022).

Информация об авторах

Никитин Юрий Николаевич, к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
E-mail: ynnikitint@mail.ru

Чижевская Дарья Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры транспортных технологий, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550
E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Дубасов Андрей Васильевич, заместитель директора Института транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.
E-mail: an_dubas30@mail.ru

Сало Владимир Иванович, к.т.н., доцент кафедры охраны труда Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

15. Gasification of solid fuel [Text]: a tutorial / A.S. Aleshina, V.V. Sergeev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, St. Petersburg State Polytechnical University, National Research University. – St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2010. – 199 p.

16. Processing of coals into synthetic liquid fuels: a tutorial / S.N. Kozlov, A.V. Fominykh, I.N. Filimonova; Alt. state. Tech. University, BTI. – Biysk: Publishing House of the Altai State Tech. University, 2011. – 48 p.

17. Chemicals from Coal. Translated from German / Under the general editorship of I.V. Kalechits. – Moscow: Chemistry, 1988. – 616 p.

Статья поступила в редакцию 12.06.2025

Information about the authors

Nikitin Yuri, Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor of the «Transport Technologies» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
E-mail: ynnikitint@mail.ru

Chizhevskaya Darya, candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor of the «Transport Technologies» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550
E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Dubasov Andrey, deputy Director of the Institute of Transport and Logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.
E-mail: an_dubas30@mail.ru

Salo Vladimir, PhD, Associate Professor of the Department of Occupational Safety of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

Для цитирования:

Никитин Ю. Н., Чижевская Д. Ю., Дубасов А. В., Сало В. И. Совершенствование транспортной системы угольных газогенераторов использующих процесс «Lurgi» // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 62-71.

For citation:

Nikitin Yu. N., Chizhevskaya D. Yu., Dubasov A. V., Salo V. I. Improvement of the transport system of coal gas generators using the "Lurgi" process // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 2(3). – P. 62-71.

**ВЕСТНИК ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ
Машиностроение
№ 2 (3) 2025**

Лит.редактор

Минина Я.В.

Рудник Ю.В.

Паталахтна Е.А.

Технический редактор

Коломиец-Кириллова Е.А.

Подписано в печати 27.10.2025.
Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Условных печатных стр. 12,51. Тираж 100 экз. Изд. № 01537.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
Луганского государственного университета
имени Владимира Даля

Адрес издательства: 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20,а.
Тел.: 7(959) 138-34-80
E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com **https://izdat.daluniver.ru/**