

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

# **В Е С Т Н И К**

**ЛУГАНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**№ 4 (5)  
2025**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

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

# ВЕСТНИК

ЛУГАНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

№4 (5) 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

№ 4 (5) 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 № 9 от 20.02.2026 г.)

© Авторы, 2025

© ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет  
имени Владимира Даля», 2025

**СО Д Е Р Ж А Н И Е****МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ****СЕНСОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
МАНИПУЛЯТОРАХ****Афанасьев А. А., Неделько А. А., Безкоровайная Н. В.----- 5****АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО  
КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ЗАЛИВОЧНОЙ МАШИНОЙ****Попов С.В., Дзюба С.И., Денисов М.В. ----- 19****ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРИВОДА СО СВОБОДНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ  
РОТОРОМ - РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ****Брешев В. Е. ----- 27****ВОССТАНОВЛЕНИЕ БАНДАЖЕЙ РОЛИКОВ МАШИН  
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК****Буранов Д.С., Ясуник С. Н. ----- 42****ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА****ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ  
ТОПЛИВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ****Васильев И. П., Антоненко Н. А. ----- 47****О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ****Насонов М. Г., Корженевская М. В., Панфилов А. М. ----- 53**

---

---

**CONTENTS****MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**

## POSITION SENSORS IN MODERN INDUSTRIAL MANIPULATORS

**Afanasiev A. A., Nedelko A. A., Bezkorovaynaya N. V.** ----- 5AUTOMATION OF DATA PROCESSING OF THE HARDWARE-SOFTWARE  
COMPLEX FOR CONTROLLING THE POURING MACHINE**Popov S.V., Dziuba S.I., Denisov M.V.** ----- 19**TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL  
AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**DEVELOPMENT OF A DRIVE WITH A FREE RING ROTOR  
AS A CUTTING TOOL AND ITS EXPERIMENTAL RESEARCH**Breshev V. E.** ----- 27

## REPAIR OF BANDS AND ROLLS OF CONTINUOUS CASTING MACHINES

**Buranov D.S., Yasunik S. N.** ----- 42**MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**

## INCREASE IN EFFICIENCY OF USE OF ALTERNATIVE FUELS OF PLANT ORIGIN

**Vasilyev I. P., Antonenko N. A.** ----- 47

## ON THE POSSIBILITY OF USING GAS DIESEL ENGINES IN AGRICULTURE

**Nasanov M. G., Korzhenevskaya M. V., Panfilov A. M.** ----- 53

---

## МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 620.179.14

### СЕНСОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРАХ

Афанасьев А. А., Неделько А. А., Безкоровайная Н. В.

### POSITION SENSORS IN MODERN INDUSTRIAL MANIPULATORS

Afanasiev A. A., Nedelko A. A., Bezkorovaynaya N. V.

***Аннотация.** В статье кратко рассматривается строение промышленного робота-манипулятора. Рассмотрено, какие сенсоры применяются для контроля и мониторинга перемещения в рабочей зоне, а также в системах обратной связи приводов двигателей. Подробно остановились на сенсорах на основе магнитного поля: линейки перемещения, магнитные энкодеры. Разберем принцип работы сенсоров, их параметры, строение и область применения. Сравним преимущества и недостатки изучаемых сенсоров на основании полученных данных, выберем оптимальный вариант для конкретного промышленного производства.*

***Ключевые слова:** магнитный энкодер, магнитные линейки, магнитные сенсоры, абсолютные сенсоры, инкрементальные сенсоры.*

***Abstract.** The paper briefly discusses the structure of an industrial robot arm. It is considered which sensors are used to monitor and monitor movement in the work area, as well as in feedback systems for motor drives. We discussed in detail sensors based on a magnetic field: displacement rulers, magnetic encoders. Let's analyze the principle of operation of sensors, their parameters, structure and scope of application. Let's compare the advantages and disadvantages of the studied sensors, based on the data obtained, we will choose the best option for a specific industrial production.*

***Key words:** magnetic encoder, magnetic rulers, magnetic sensors, absolute sensors, incremental sensors.*

---

**Введение.** Развитие технологий автоматизации процессов привело к широкому распространению видов промышленных роботов, выполняющих те или иные производственные операции. Эффективность и стабильность работы таких роботов зависят от различных факторов, среди которых важнейшую роль играет контроль перемещения рабочих органов. Эта задача решается применением

сенсоров, отслеживающих положение в рабочей зоне манипулятора.

Статья направлена на изучение сенсоров, применяемых в промышленных манипуляторах на различных производствах. Правильный выбор типа датчика позволит создать производство с оптимальным соотношением капитальных затрат и качества, уменьшить затраты на техническое обслуживание, ремонт и время простоя оборудования.

На производстве все больше применяются роботизированные системы. В промышленности широкое применение нашли роботизированные системы

манипуляторного типа. Данный вид предназначен для замены человека на различных участках опасного производства.

Манипуляторы – пространственная совокупность рычажных механизмов и систем приводов, осуществляющая под управлением программируемого автоматического устройства (ПАУ) или человека-оператора действие, аналогичные действиям руки человека (рис. 1).

Перемещение осуществляется вдоль оси в зависимости от выполняемых манипулятором задач, количество осей от 4 до 7 (звеньев, суставов) (рис. 2.) [1].



Рис. 1. Разновидность промышленных манипуляторов

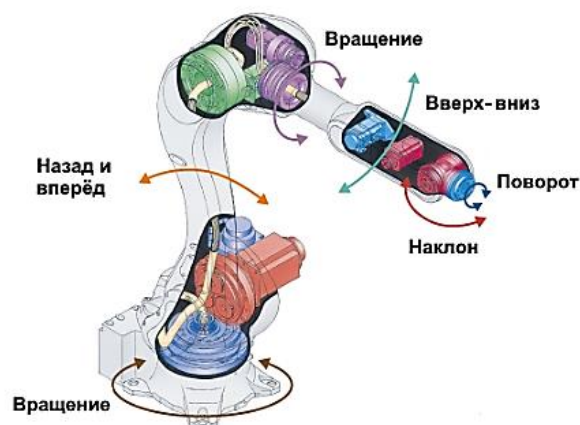


Рис. 2. Оси вращения и расположение моторов и редукторов манипулятора

На каждую ось установлен двигатель с редуктором и системой обратной связи, контролируемой сенсором. Ниже

рассмотрим, какие сенсоры применяются для контроля перемещения.

Сенсоры (датчики) – это устройства, предназначенные для преобразования

физической величины (перемещения, вращения, давления) в электрические сигналы для последующего подключения к контрольно-измерительной системе.

В манипуляторах широко применяются такие типы сенсоров: магнитные, различные энкодеры, потенциометры, индукционные, бесконтактные. Их условно можно разделить по способу подключения к контроллеру: аналоговые, цифровые, токовая петля.

Для преобразования перемещения в сенсорах применяют такие физические явления: магнитное поле, световое излучение, электромагнитную индукцию, изменение сопротивления материала.

По назначению сенсоры можно разделить на:

- инкрементальные, выдающие последовательность электрических импульсов, соответствующих углу поворота и т.д. (рис. 3а);

- абсолютные, выдающие численное значение угла поворота, перемещения и т.д. На диске имеются дополнительные дорожки для кодировки положения, независимо от начального положения,

сохраняющие показания при отключении питания (рис. 3б).

Отличие абсолютного от инкрементального сенсора, наличие в первом дополнительных кодовых дорожек, в зависимости от разрешения таких дорожек может быть от 3 и более (рис. 3).

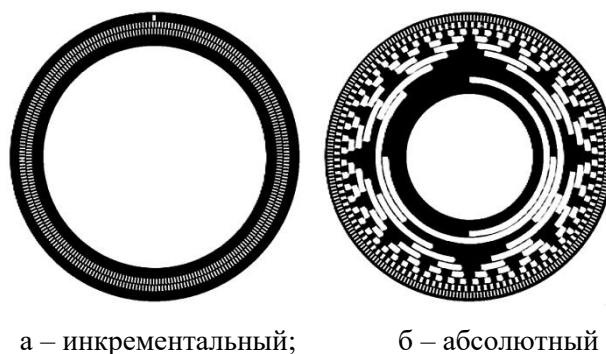


Рис. 3. Диски инкрементального и абсолютного сенсора

### Сенсоры, применяемые в промышленных роботах:

1. Оптические энкодеры. Оптические сенсоры широко применяются в различных узлах манипуляторов. Работа основана на детектировании светового излучения (рис. 4).

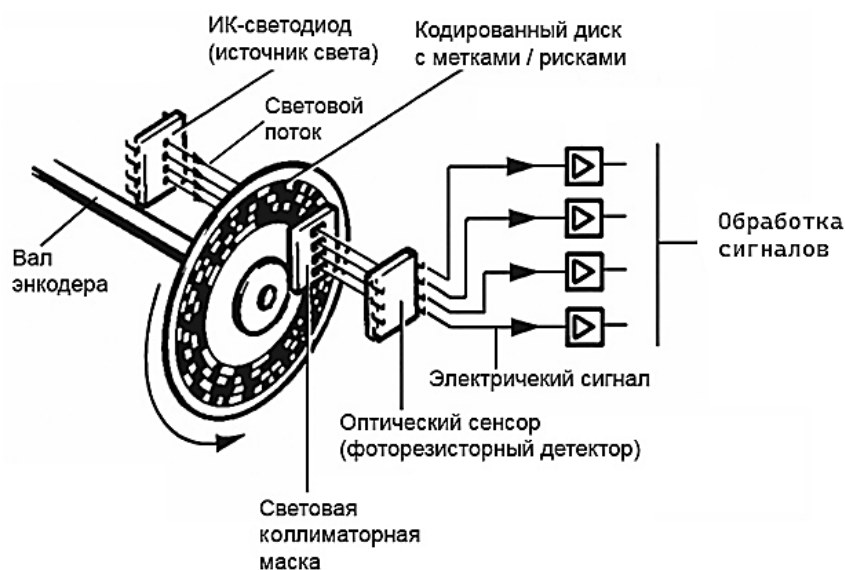


Рис. 4. Работа оптического сенсора

Принцип работы. Инфракрасный светодиод излучает световой поток, проходя сквозь диск с метками, вращаясь, диск пропускает или задерживает световой поток. Детектирующая матрица принимает поступающее чередование света и

преобразует в электрические импульсы, поступающие на плату обработки и последующего формирования выходного сигнала. На рис. 5 изображен внешний вид сенсора.



Рис. 5. Внешний вид оптического сенсора

Оптические энкодеры контролируют величины: угол поворота, скорость и контроль вращения, обратную связь привода двигателя.

Оптические энкодеры бывают: инкрементальные и абсолютные (рис. 3).

Оптические сенсоры по типу выходного сигнала производятся двух видов:

- аналоговые, инкрементальные (рис. 6);  
- цифровые абсолютные; дополнительный контроллер формирует цифровой выходной сигнал [3].

Специальный внешний кожух (крышка корпуса) защищает сенсор от внешней среды (рис. 5).

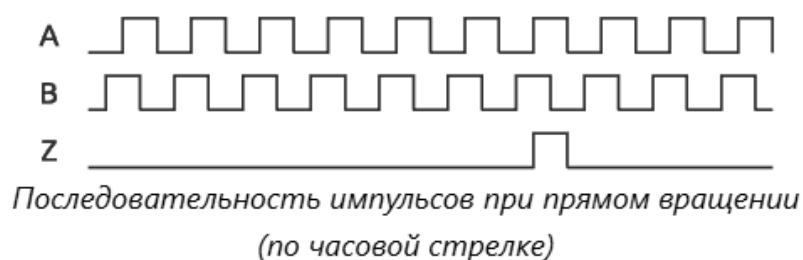


Рис. 6. Форма выходного аналогового сигнала

Параметры оптических энкодеров с различной разрешающей способностью представлены в табл.1.

2. Потенциометры. В манипуляторах применяются для контроля угла поворота и

линейного перемещения. Работают по принципу изменения сопротивления резистивной дорожки при перемещении центрального ползункового контакта. На боковые контакты подается

стабилизированное напряжение, перемещая центральный контакт, на нем происходит изменение напряжения, которое подается на контрольно-измерительное устройство для дальнейшей обработки. Простота конструкции и низкая стоимость делают их

привлекательными, хотя ограничения связаны с износом скользящих контактов.

В промышленных манипуляторах применяются два вида потенциометров: осевые (рис. 7,а) [4] и линейные (рис.7, б) [5].

Таблица 1

Параметры энкодера

Модификация	PRI40	PRI50	PRI58
Диаметр корпуса, мм	40	50	58
Тип вала	цельный		
Разрешение, имп/об	100, 200, 360, 500, 600	100, 200, 360, 500, 600, 720, 1000, 1024, 1800, 2000, 2048, 2500, 3600, 4000, 4096, 5000	
Выходной сигнал	аналоговый, цифровой		
Напряжение питания, В	пост. от 5 до 24		
Макс. скорость вращения, об/мин	3500		
Степень защиты	IP54		
Рабочая температура, °С	-20...+80		
Материал корпуса	Алюминий		
Диаметр вала, мм	4/6	6/8/10	
Крепление	3 отверстия М3		



а – осевой;



б – линейный

Рис. 7. Осевые и линейные потенциометры

Изменение сопротивления происходит: в осевых сенсорах изменение угла поворота сенсора, в линейных сенсорах перемещение ползунка вдоль оси корпуса.

Контролируемые величины: угол поворота в осевом и линейное перемещение в линейном.

Основные параметры потенциометров: сопротивление сенсора и линейность характеристики при смещении.

3. Индуктивные сенсоры. Принцип работы индукционного датчика основан на изменении индукционного поля датчика. В катушке сенсора генератор создает магнитное поле, при сближении с объектом управления происходит изменение

амплитуды генератора. Компаратор измеряет уровень амплитуды и формирует выходной сигнал, в зависимости от назначения внутренний контакт замыкается или размыкается. Внутреннее строение сенсора и функциональная схема изображены на рис. 8 [6], внешний вид представлен на рис. 9 [7].

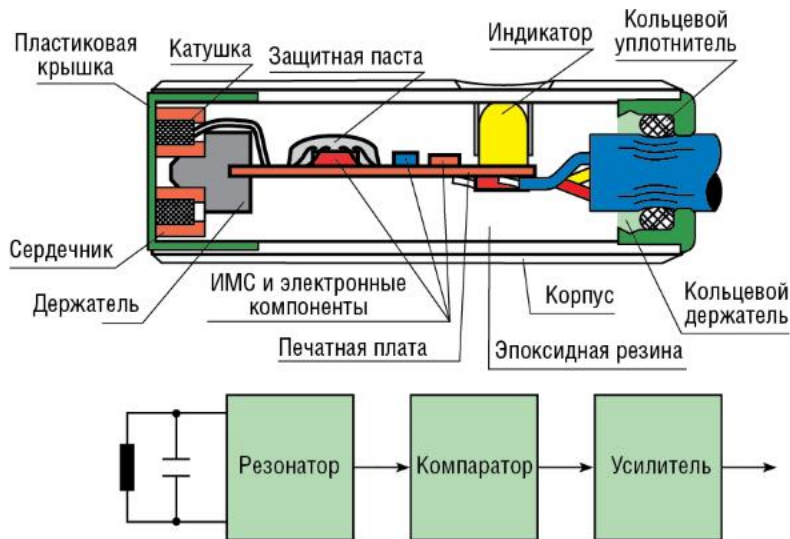


Рис. 8. Внутреннее строение и функциональная схема



Рис. 9. Индукционный сенсор

Материал объекта управления: металлический, ферромагнитный металл.

Выходной сигнал сенсора: дискретный (вкл/выкл) или аналоговый, уровень сигнала изменяется в зависимости от расстояния до объекта управления.

Индукционные сенсоры контролируют линейное перемещение исполнительных органов манипулятора и обрабатываемой заготовки.

Параметры индукционного датчика приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры индукционного датчика**

Параметр	Значение
Измеряемый параметр	приближение металл объекта
Дальность макс., мм	1,5
Частота срабатывания, Гц	1500
Напряжение питание пост., В	10-30
Рабочий ток макс., мА	200
Конфигурация выхода	PNP/NO NC, NPN/NO
Класс защиты	IP67

Область применения индукционных сенсоров: начальное положение робота, наличие детали, начальное положение заготовки, контроль зон безопасности, перемещения в рабочей зоне.

4. Магнитные сенсоры. Принцип работы основан на чередовании магнитных полюсов или измерении интенсивности магнитного поля. Сенсоры, работающие на данном принципе в промышленных манипуляторах:

- магнитные линейки (линейные, радиальные и аксиальные) (рис. 10) [9];
- магнитные энкодеры (рис. 12) [9];
- герконы (рис. 16).



Рис. 10. Магнитные измерительные линейки круговая и линейная

Магнитная полоса. В современных магнитных линейках в качестве источника магнитного поля используется магнитная полоса (рис. 11). Форма полосы различается в зависимости от плоскости

установки. В промышленных манипуляторах нашли применение два вида магнитный полос: кольцевые (радиальная и аксиальная) и прямые (рис. 11).



Рис. 11. Радиальные, аксиальные и прямые магнитные полосы

Стандартные магнитные полосы производятся с шагом магнитных полюсов 2+2 мм и 5+5 мм, производитель может отдельно изготовить ленту с нужным шагом, встречаются полосы с шагом 1+1 мм. Расстояние между полюсами определяет точность измерения.

Магнитная полоса состоит из трех основных элементов:

- 1) защитная полоса из нержавеющей стали;
- 2) магнитная полоса с чередующимися магнитными полюсами;
- 3) клеевая основа для крепления полосы на плоскости оборудования.

Строение магнитной полосы изображено на рис. 12 [8].

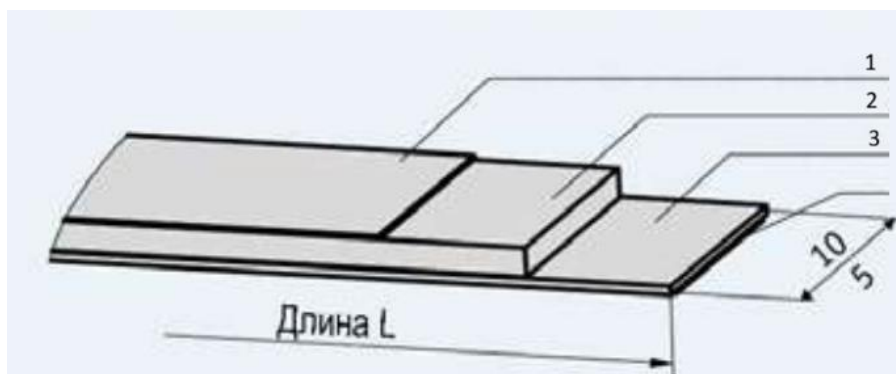


Рис. 12. Строение магнитной ленты

Расположение магнитных полюсов на полосе представлено на рис. 13, между магнитными полюсами на равном расстоянии присутствуют метки отсчета опорных точек [8].



Рис. 13. Расположение магнитных меток

Параметры магнитной полосы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры магнитной полосы в составе линейки МВ-100

Параметр	Значение
Шаг полюсов, мм	2+2, 5+5
Длина измерения, м	от 0,5 до 9
Размеры, ширина/толщина, мм	5/1.4, 10/1.4
Класс точности, мкм	10 или 50
Рабочая температура, °С	-20...+70
Способ монтажа	Приклеивание
Влажность, %	100

Магнитные линейки. Принцип работы основан на измерении чередования магнитного поля датчиком с последующим преобразованием в электрические сигналы. Сенсор перемещается вдоль линейки, фиксирует изменения в магнитном поле и

преобразует их в электрические сигналы с последующим преобразованием положения.

Магнитная линейка состоит из таких, основных компонентов:

- магнитный элемент (магнитная полоса) (рис. 12);

- магнитный датчик, улавливающий изменение в магнитном элементе;

- платы управления, обработка магнитных меток и вывод данных положения (рис. 14).

Параметры магнитной линейки на основе датчика LM10 представлены в табл. 4.

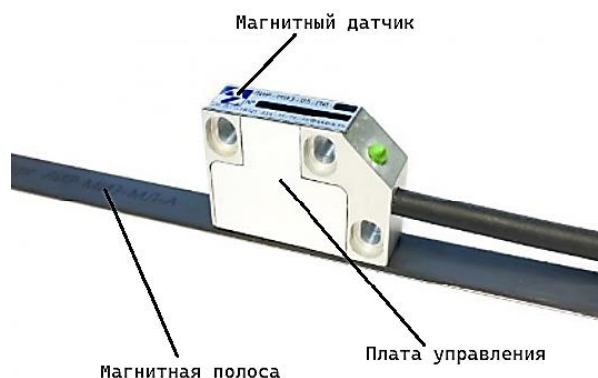


Рис. 14. Элементы магнитной линейки

Таблица 4

**Параметры магнитной линейки на основе датчика LM10**

Параметр	Значение
Длина изм. перемещения, м	От 0.5 до 10
Погрешность изм. мкм/м	$\pm 20$ или $\pm 40$
Напряжение питания, В	5 пост.
Выходной сигнал	цифровой
Рабочая температура, °С	-10...+80
Длина кабеля, м	1
Степень защиты	IP68

5. Магнитные энкодеры. Принцип работы энкодера основан на преобразовании вращения магнитного диска, считываемого магниточувствительными датчиками, в электрические сигналы (рис. 15).

Работа магнитного энкодера очень похожа на работу оптического, с той лишь разницей, что в оптическом световое излучение измеряет перемещение, а в магнитном – смещение магнитного поля, Параметры энкодера представлены в табл. 5 [10].



Рис. 15. Внешний вид магнитного энкодера

Таблица 5

**Параметры магнитного энкодера MRI 40A**

Параметр	Значение
Разрешение, имп/оборот	4...512
Макс. скорость вращения, об/мин	3500
Напряжение питания, В	5...24
Выходной сигнал	аналоговый, цифровой
Рабочая температура, °С	-20...+80
Длина кабеля, м	2,5...10
Степень защиты	IP54

Контролируемая величина: угол поворота, скорость вращения, контроль вращения, обратная связь привода двигателя.

6. Герконовые сенсоры. Принцип работы основан на воздействие магнитного поля на контакты сенсора. Датчик состоит из герметичной колбы с магнитомягкими контактами. В колбе находится инертный газ или вакуум. При сближении с объектом управления происходит намагничивание контактов внутри колбы и замыкание, при

удалении объекта управления контакты размагничиваются и размыкаются.

Объект управления: постоянный магнит или электромагнит.

Внутреннее строение сенсора и функциональная схема изображены на рис. 16. Внешний вид показан на рис. 13,б [13].

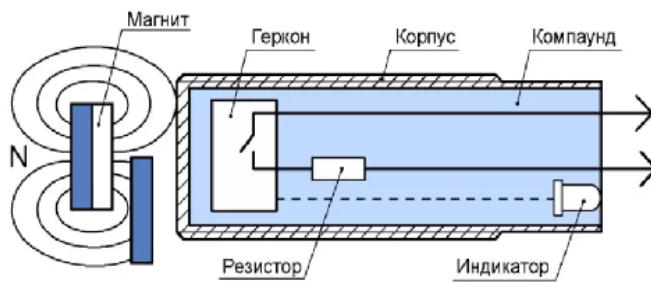
Контролируемые величины: наличие объекта управления.

Параметры геркона приведены в табл. 6 [13].

Таблица 6

Параметры индукционного датчика

Параметр	Значение
Измеряемая величина	положение
Время вкл/выкл, мс	0,5/0,03
Частота срабатывания, Гц	800
Напряжение питание, В	пост., перем. от 30 до 220
Выходной ток макс., мА	500
Количество контактов, шт	2
Размеры: ширина/высота/длина, мм	6.4/4.3/33.4
Температура эксплуатации, °С	-40...+120



а – строение



б – внешний вид

Рис. 16. Строение и внешний вид герконового сенсора

Область применения: положение манипулятора, наличие детали, начальное положение механизма, контроль перемещения, рабочая зона безопасности манипулятора.

**Выводы.** Выбор сенсора, определяется спецификой производственного процесса, условиями окружающей среды. Правильный подбор и грамотное размещение датчиков обеспечивают надежную продолжительную и

эффективную работу промышленных манипуляторов, повышая общую эффективность и качество выпускаемой продукции, помогают инженерам проектировать эффективные и надежные роботизированные системы, уменьшая капитальные затраты на техническое

обслуживание, ремонт и простой манипуляторов.

Рассмотренные в статье сенсоры сведены в таблицу и определены оптимальные условия эксплуатации, (табл. 7).

Таблица 7

**Восприимчивость сенсоров к условиям эксплуатации**

Условия эксплуатации	Сенсоры				
	Магнитные	Оптические	Индукционные	Потенциометры	Герконовые
Запыленность	Низкая	Высокая	Низкая	Средняя	Низкая
Высокое загрязнение	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая
Акустическая зашумленность	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая
Высокая температура	Средняя	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя
Низкая температура	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая
Электромагнитные помехи	Высокая	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя

### Список источников

1. Робовизард. Как устроен промышленный робот? Краткий гид по структуре и движениям работа. URL: <https://www.robowizard.ru/blog/kak-ustroeny-promyshlennye-roboty?ysclid=mmdx83rfm1922456274> (дата обращения: 12.04.2026).

2. Виды промышленных роботов / М. Е. Чураков, Д. А. Михалев, Я. Д. Сергеев [и др.] // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Сборник XI Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию кафедры электротехники в Омском сельскохозяйственном институте им. С. М. Кирова (Технического сервиса, механики и электротехники) ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 29 февраля 2024 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2024. – С. 377-381. – EDN JJXBVA.

3. КИП-сервис. URL: [https://kipservis.ru/opkon/opkon\\_pri.htm?ysclid=mmnf83efbh193354083#link\\_doc](https://kipservis.ru/opkon/opkon_pri.htm?ysclid=mmnf83efbh193354083#link_doc) (дата обращения: 12.04.2026).

4. Bourns. 3590 - Precision Potentiometer. URL: <https://cdn.zener.ru/media/PDF/1459681.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).

5. Русавтоматизация. Датчики положения потенциометрические серии LWH. URL: <https://rusautomation.ru/catalog/documents/lwh-passport.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).

6. Мозоляк Евгений. Индуктивные датчики положения фирмы Pepperl+Fuchs. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/125302/> (дата обращения: 12.04.2026).

7. Autonics. Cylindrical Capacitive Proximity Sensors. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/190/DOC059190182.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).

8. MagLine. Магнитные линейные и угловые измерительные системы. URL: [http://process-control.net/assets/catalog/catalog-siko-global/Magline\\_2011a\\_rus.pdf](http://process-control.net/assets/catalog/catalog-siko-global/Magline_2011a_rus.pdf) (дата обращения: 12.04.2026).

9. RLS. LM10 incremental magnetic encoder system. URL: <https://f-enco.ru/upload/iblock/822/Opisanie-Enkoder-LM10-RLS.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).

10. ОПКОН. Энкодеры и датчики перемещения. URL:

[https://ftp.totalkip.ru/report.local/catalogue/catalogue\\_opkon\\_8668.pdf](https://ftp.totalkip.ru/report.local/catalogue/catalogue_opkon_8668.pdf) (дата обращения: 12.04.2026).

11. MRI. Magnetic Incremental Encoder. URL: [https://ftp.totalkip.ru/report.local/to/TO\\_opkon\\_8206.pdf](https://ftp.totalkip.ru/report.local/to/TO_opkon_8206.pdf) (дата обращения: 12.04.2026).

12. F-enco. Инкрементальный магнитный кольцевой энкодер LM10 + ring RLS. URL: <https://f-enco.ru/catalog/magnitnye-koltsevoye-inkrementnye/inkrementalnuu-magnitnyu-koltsevoiy-enkoder-lm10/> (дата обращения: 12.04.2026).

13. Промышленная автоматизация. Датчик положения Festo SME-8-K-24-S6. URL: <https://industriation.ru/161756/> (дата обращения: 12.04.2026).

14. Электротехника производственное объединение. URL: [https://www.elektrotehnik.ru/pdf/03.%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5,%20%D0%BF%D1%83%D1%82%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D0%B2%D1%8B%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8/05.%20%D0%92%D0%9F%D0%9A.pdf?ysclid=mmlkn dugfe913637570\\$](https://www.elektrotehnik.ru/pdf/03.%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5,%20%D0%BF%D1%83%D1%82%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D0%B2%D1%8B%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8/05.%20%D0%92%D0%9F%D0%9A.pdf?ysclid=mmlkn dugfe913637570$) (дата обращения: 12.04.2026).

15. MEYERTEC. Концевые выключатели. URL: [https://owen.ru/uploads/326/re\\_mtb4-ms\\_limit\\_switches.pdf?ysclid=mmlklualh6823428711](https://owen.ru/uploads/326/re_mtb4-ms_limit_switches.pdf?ysclid=mmlklualh6823428711) (дата обращения: 12.04.2026).

16. Смирнов А. Б., Тимофеев А. Н. Промышленные и сервисные роботы: учеб. пособие. – СПб, 2019. – 139 с.

17. Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. - СПб: Университет ИТМО, 2017. - 169 с.

18. Малахова В. В. Программно управляемая роботизированная платформа / В. В. Малахова, О. В. Малахов, Я. О. Малахова // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2024. – № 9(87). – С. 51-55. – EDN TLWXYK.

19. Драчев Д. В. Автоматизация технологической операции упаковывания сыпучего материала в сетки / Д. В. Драчев, В. В. Малахова // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический

университет им. В. Г. Шухова, 2021. – С. 1632-1634. – EDN BBDUPB.

## References

1. Robovizard. How does an industrial robot work? A short guide to the structure and movements of the robot. URL: <https://www.robowizard.ru/blog/kak-ustroyeny-promyshlennye-roboty?ysclid=mmdx83rfm1922456274> (accessed: 04.12.2026).

2. Types of industrial robots / М. Е. Churakov, D. А. Mikhalev, Ya. D. Sergeev [et al.] // Scientific and technical support of the agroindustrial complex, state and prospects of development: Collection of the XI International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of the Department of Electrical Engineering at the Omsk Agricultural Institute named after S. M. Kirov (Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering) Omsk State Agrarian University, Omsk, February 29 In 2024. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, 2024. pp. 377-381. EDN JJXBBA.

3. KIP-service. URL: [https://kipservis.ru/opkon/opkon\\_pri.htm?ysclid=mmnf83efbh193354083#link\\_doc](https://kipservis.ru/opkon/opkon_pri.htm?ysclid=mmnf83efbh193354083#link_doc) (accessed: 12.04.2026).

4. Bourns. 3590 - Precision Potentiometer. URL: <https://cdn.zener.ru/media/PDF/1459681.pdf> (accessed: 12.04.2026).

5. Rusautomation. Potentiometric position sensors of the LWH series. URL: <https://rusautomation.ru/catalog/documents/lwh-passport.pdf> (accessed: 04/12/2026).

6. Evgeny Mozolyak. Inductive position sensors from Pepperl+Fuchs. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/125302/> (accessed: 12.04.2026).

7. Autonics. Cylindrical Capacitive Proximity Sensors. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/190/DOC059190182.pdf> (accessed: 12.04.2026).

8. MagLine. Magnetic linear and angular measuring systems. URL: [http://process-control.net/assets/catalog/catalog-siko-global/Magline\\_2011a\\_rus.pdf](http://process-control.net/assets/catalog/catalog-siko-global/Magline_2011a_rus.pdf) (accessed: 12.04.2026).

9. RLS. LM10 incremental magnetic encoder system. URL: <https://f->

enco.ru/upload/iblock/822/Opisanie-Enkoder-LM10-RLS.pdf (accessed: 12.04.2026).

10. OPKON. Encoders and motion sensors. URL:

[https://ftp.totalkip.ru/report.local/catalogue/catalogue\\_opkon\\_8668.pdf](https://ftp.totalkip.ru/report.local/catalogue/catalogue_opkon_8668.pdf) (accessed: 12.04.2026).

11. MRI. Magnetic Incremental Encoder. URL: [https://ftp.totalkip.ru/report.local/to/TO\\_opkon\\_8206.pdf](https://ftp.totalkip.ru/report.local/to/TO_opkon_8206.pdf) (date of access: 12.04.2026).

12. F-enco. Incremental magnetic ring encoder LM10 + ring RLS. URL: <https://f-enco.ru/catalog/magnitnye-koltsevye-inkrementnye/inkrementalnyy-magnitnyy-koltsevyy-enkoder-lm10/> (accessed: 12.04.2026).

13. Industrial automation. Position sensor Festo SME-8-K-24-S6. URL: <https://industriation.ru/161756/> (accessed: 12.04.2026).

14. Electrical engineering production association. URL:

<https://www.elektrotehnik.ru/pdf/03.%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5,%20%D0%BF%D1%83%D1%82%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D0%B2%D1%8B%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8/05>.

[%20%D0%92%D0%9F%D0%9A.pdf?ysclid=mmlkn dugfe913637570\\$](#) (accessed: 12.04.2026).

15. MEYERTEC. Limit switches. URL:

[https://owen.ru/uploads/326/re\\_mtb4-ms\\_limit\\_switches.pdf?ysclid=mmlklualh6823428711](https://owen.ru/uploads/326/re_mtb4-ms_limit_switches.pdf?ysclid=mmlklualh6823428711) (accessed: 12.04.2026).

16. Smirnov A. B., Timofeev A. N. Industrial and service robots: textbook. stipend. – St. Petersburg, 2019. – 139 p.

17. Vlasov S. M., Boikov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V. Contactless means of local orientation of robots. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 169 p.

18. Malakhova V. V. Software-controlled robotic platform / V. V. Malakhova, O. V. Malakhov, Ya. O. Malakhova // Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. – 2024. – № 9(87). – Pp. 51-55. – EDN TLWXYK.

19. Drachev D. V. Automation of the technological operation of packing bulk material into grids / D. V. Drachev, V. V. Malakhova // Education. Science. Production: XIII International Youth Forum, Belgorod, October 08-09, 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2021. pp. 1632-1634. EDN BBDUPB.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025*

### Информация об авторах

**Афанасьев Александр Александрович**, младший научный сотрудник, НИЛ ТЭД, Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

*SPIN-код: 5971-4573, AuthorID: 1181713*

**E-mail:** al32@mail.ru

**Неделько Александр Андреевич**, младший научный сотрудник МНИЛ ПРОГРЕСС.

*SPIN-код: 5414-0388, AuthorID: 1334104*

**Безкоровайная Наталья Викторовна**, преподаватель Луганский колледж автосервиса имени А. А. Гизая.

*SPIN-код: 1373-7639, AuthorID: 1341128*

**E-mail:** bezkornv@mail.ru

### Information about the authors

**Afanasyev Alexander Alexandrovich**, a junior Researcher, NIL TED of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 5971-4573, AuthorID: 1181713*

**E-mail:** al32@mail.ru

**Nedelko Alexander Andreevich**, a junior researcher at the MNIL of Progress.

*SPIN-код: 5414-0388, AuthorID: 1334104*

**Bezkorovaynaya Natalia Viktorovna**, lecturer, Lugansk College of car service named after A. A. Gizai.

*SPIN-код: 1373-7639, AuthorID: 1341128*

**E-mail:** bezkornv@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Афанасьев А. А., Неделько А. А., Безкоровайная Н. В. Сенсоры положения в современных промышленных манипуляторах // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Машиностроение. – 2025 – № 4(5). – С. 5-18.

**For citation:**

Afanasyev A. A., Nedelko A. A., Bezkorovainaya N. V. Position sensors in modern industrial manipulators // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Engineering. – 2025 – № 4(5). – P. 5-18.

---

УДК 621.74

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ЗАЛИВОЧНОЙ МАШИНОЙ****Попов С. В., Дзюба С. И., Денисов М. В.****AUTOMATION OF DATA PROCESSING OF THE HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR CONTROLLING THE POURING MACHINE****Popov S. V., Dziuba S. I., Denisov M. V.**

***Аннотация.** В статье рассматривается проблема автоматизации обработки данных программно-аппаратного комплекса управления заливочной машиной линии Heinrich Wagner Sinto (HWS). При ручных операциях снижается производительность и увеличивает вероятность ошибок. Разработан программный модуль на языке C++ Builder, обеспечивающий автоматическую разрезку, обрезку и сохранение графиков заливки. Внедрение системы позволяет повысить качество заливаемых форм и эффективность работы операторов.*

***Ключевые слова:** заливочная машина, автоматизация, обработка данных, программно-аппаратный комплекс, паттерн заливки, алгоритм.*

***Abstract.** The article discusses the problem of automating data processing for the hardware-software complex controlling the pouring machine of the HWS line. Manual operations reduce productivity and increase the likelihood of errors. A software module developed in C++ Builder provides automatic cutting, trimming, and saving of pouring graphs. Implementation of the system allows improving the quality of poured molds and the efficiency of operators.*

***Key words:** pouring machine, automation, data processing, hardware-software complex, pouring pattern, algorithm.*

**Введение.** Повышение эффективности литейного производства напрямую связано с уровнем автоматизации технологических процессов. Качество получаемых отливок во многом определяется стабильностью параметров процесса заливки. Внедрение автоматизированных информационных систем позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, снизить вероятность ошибок при обработке данных

и обеспечить повторяемость технологических режимов.

На современных формовочных линиях, таких как линия Heinrich Wagner Sinto (HWS), используются заливочные машины серии P, оснащенные системой управления на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) Siemens. При этом сам процесс заливки происходит полуавтоматически, т. е. требует некоторого участия оператора в процессе

непосредственно заливки металла. При высокой производительности формовочной линии и продолжительных рабочих сменах эти повторяющиеся действия требующие высокой концентрации и сопровождающиеся вспышками на экране при начале заливки вызывают сильную усталость оператора, что приводит к снижению качества отливок.

Для преодоления этой проблемы был разработан программно-аппаратный комплекс автоматической заливки. Этот многоканальный комплекс записывает действия оператора в процессе заливки и сохраняет их на ПК для дальнейших отображения и обработки. А также позволяет проводить подготовку данных и их статистическую обработку для формирования паттерна заливки, который представляет собой схему усреднённых и оптимизированных действий оператора заливки для каждого вида продукции. Затем эти паттерны действий сохраняются по указанному пути, откуда потом автоматически выбираются при появлении данного вида продукции и загружаются для исполнения. При выполнении условий начала заливки начинается воспроизведение загруженного паттерна. При этом оператор присутствует на рабочем месте, наблюдает за процессом, может вмешаться и подкорректировать его или, при возникновении внештатной ситуации, перехватить контроль полностью.

При появлении нового вида продукции в течении одной или нескольких рабочих смен оператор заливки вручную «под запись» заливает формы и создаёт статистику (это несколько тысяч залитых опок – заливок). После окончания смены подготовленный сотрудник обрабатывает эти данные и создает «паттерн заливки» этой продукции, который в дальнейшем

используется для автоматической заливки. Процесс обработки данных состоит из их нормирования и статистической обработки путём усреднения и исключения артефактов. Нормирование данных это разделение записанных данных на части – заливки и обрезка незначущих нулей в начале и конце отрезков.

Существующий алгоритм работы предполагает разделение циклов заливки и обрезку графиков в полуавтоматическом режиме – ручной запуск каждой операции. Усреднение параметров и исключение артефактов выполняется вручную. Это приводит к увеличению времени обработки и субъективности в процессе анализа. Отсутствие автоматизированной обработки графиков заливки снижает общую производительность редактора заливок и затрудняет оценку точности процесса.

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование программного обеспечения системы автоматической заливки путем автоматизации обработки данных. Целью исследования является разработка системы автоматизации обработки данных для программно-аппаратного комплекса управления заливочной машиной линии HWS. Основное назначение системы – обеспечить автоматизацию рутинных операций обработки графиков заливок.

**Основная часть.** Объектом автоматизации является заливочная машина серии P, установленная на линии формовки HWS. Машина предназначена для заливки в полуавтоматическом и полностью автоматическом режиме железосодержащих сплавов (серый чугун, чугун с шаровидным графитом, высокопрочный чугун, сталь). Управление машиной осуществляется при помощи программируемого логического контроллера Siemens S7-300-Technology-

SPS. Опционально для этих заливочных машин производитель разработал системы автоматической заливки обеспечивающие управление весом и уровнем заполнения при заливке [1].

Существуют также аналоги заливочных машин немецкого производителя *Heinrich Wagner Sinto*, такие как серии GIMA и FVNX, которые обладают системой воспроизведения (TEACHING-PLAYBACK SYSTEM), позволяющей сохранять и повторять заливку автоматически [2]. Однако данные аналоги имеют высокую себестоимость и в текущих условиях недоступны для приобретения из-за санкционных ограничений. Эта система является нашим прямым аналогом.

Заливочные машины перемещаются вдоль линии заливки автоматической формовочной линии HWS для непрерывной заливки металла в опоки.

Существующее программное обеспечение для анализа данных заливки позволяет оператору «снимать», записывать и просматривать графики процесса, однако функции обработки данных реализованы недостаточно эффективно. Структурная схема программы включает главную форму, панель подключения устройств, панель обработки графиков и окно статистики. Общий алгоритм работы программы представлен на рис. 1.

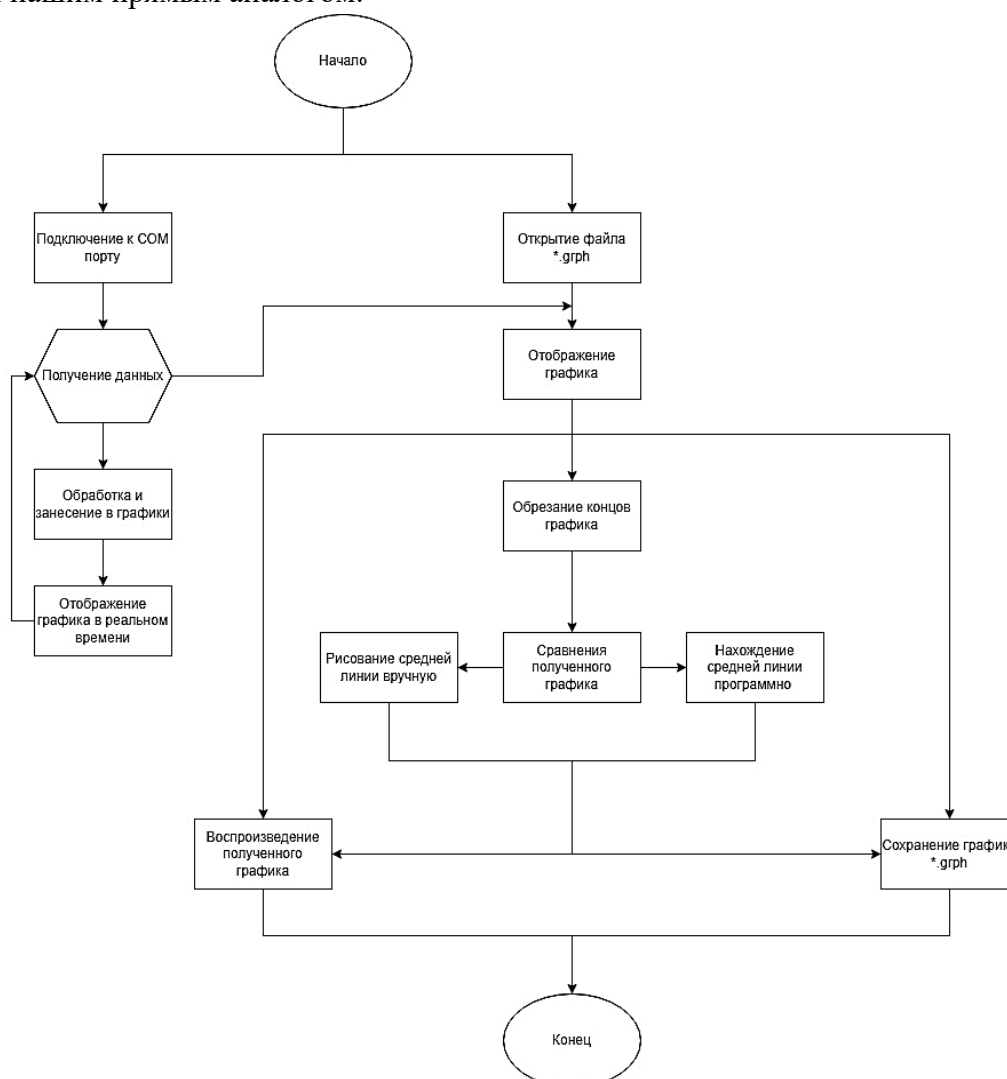


Рис. 1. Общий алгоритм работы программы

Анализ работы существующего программного обеспечения выявил ряд недостатков, снижающих эффективность обработки. Разделение циклов заливки для последующего сравнения осуществляется вручную через выделение области нажатиями мыши. Полученную информацию необходимо предварительно обрабатывать, убирая ненужные части графика, не относящиеся к циклу заливки. Выполняется это с помощью панели «Обработка графиков», используя кнопки «Обрезать перед» и «Обрезать за». После первичной обработки графика открывается отдельная форма приложения, в которой выполняется статистическая обработка данных. Для получения усредненных параметров требуется загрузка нескольких заливок в окно статистики и ручное выделение точек по каждому импульсу с учетом усреднения их длины.

На данный момент программа подготовки данных не способна обрабатывать данные в автоматическом режиме. У нее есть возможность записывать и воспроизводить данные, но без автоматической статистической обработки.

В связи с этим было принято решение автоматизировать обработку данных существующего программно-аппаратного комплекса.

Для разработки модуля автоматизации была выбрана среда разработки Embarcadero RAD Studio XE и язык программирования C++ Builder. Выбор обусловлен необходимостью совместимости с существующим программным обеспечением службы АСУ ТП предприятия, которое написано на данном языке. C++ является компилируемым статически типизированным языком общего назначения, поддерживающим процедурное, объектно-ориентированное и обобщенное программирование, что позволяет

обеспечить высокую производительность приложения [3].

Алгоритм автоматизации обработки данных включает функции разделения, обрезки и распределения графиков по файлам. Блок-схема алгоритма программы после внедрения функций автоматизации представлена на рис. 2.

Процесс автоматической обработки инициируется пользователем нажатием кнопки «Обработка» на панели управления. Сначала указывается необходимость обрезки пустых мест графиков, не относящихся к заливке, с помощью чекбокса «Авто обрезка». Затем указывается директория для хранения нарезанных графиков через кнопку «Папка». После выбора файла формата .grph запускается функция автоматической нарезки.

Функция автоматического разделения графика реализована на основе анализа массива данных точек. Алгоритм определяет начало и конец цикла заливки путем подсчета последовательности нулевых значений сигнала. Если количество нулевых точек превышает пороговое значение (200 пикселей по оси времени), фиксируется окончание текущего цикла заливки и начало следующего. Для каждого выделенного цикла вызывается процедура обрезки (AutoTrim), которая удаляет пустые участки в начале и конце выделенного фрагмента. Далее выполняется сохранение фрагмента в отдельный файл с автоматической нумерацией (при включенной опции «Авто инк»).

Интерфейс разработанного модуля максимально упрощен для снижения вероятности ошибок оператора. Основные действия сведены к выбору папки сохранения и запуску автоматического разделения. Структурная схема разрабатываемого программного модуля представлена на рис. 3.

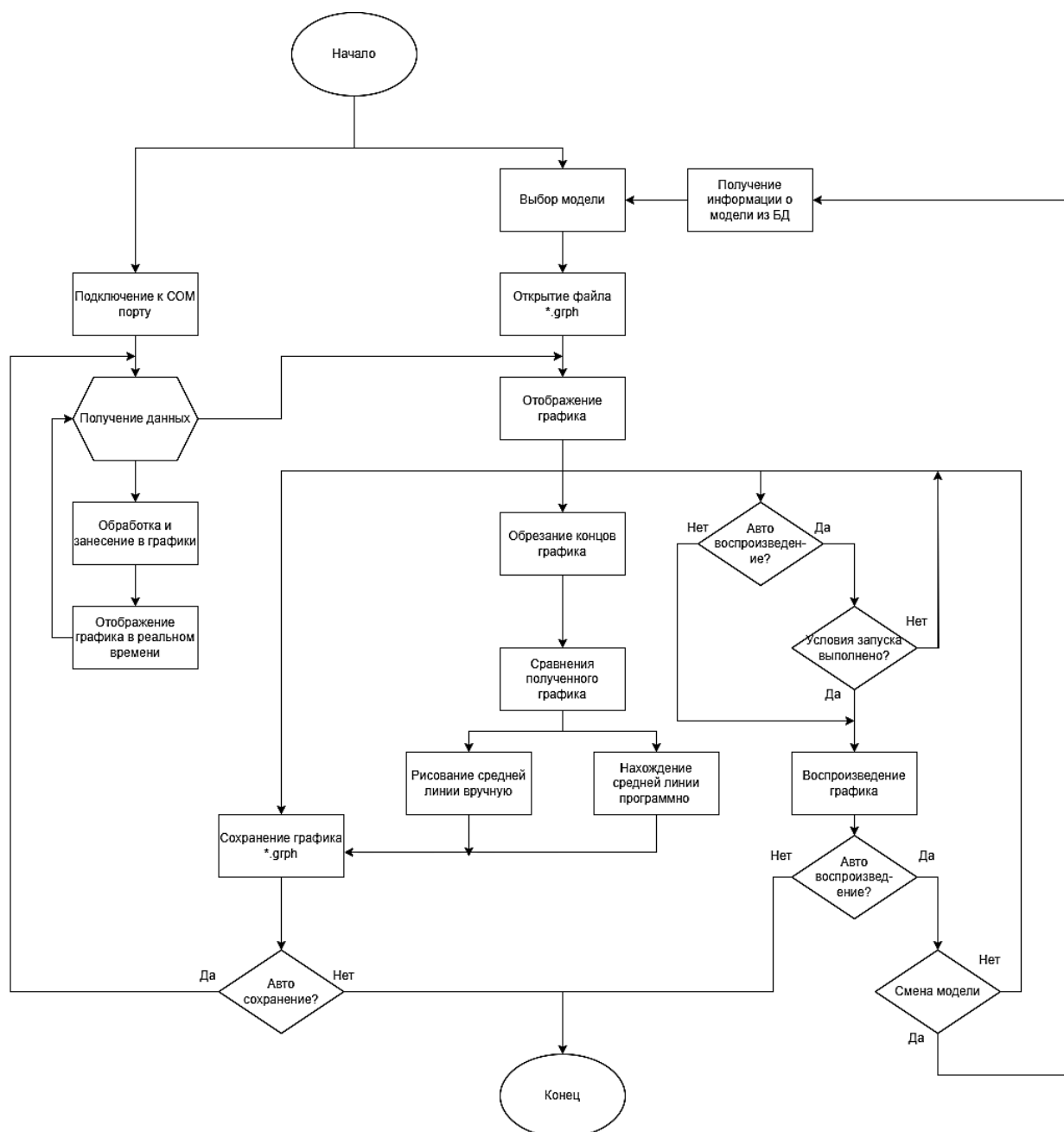


Рис. 2. Алгоритм программы после автоматизации функций обработки данных

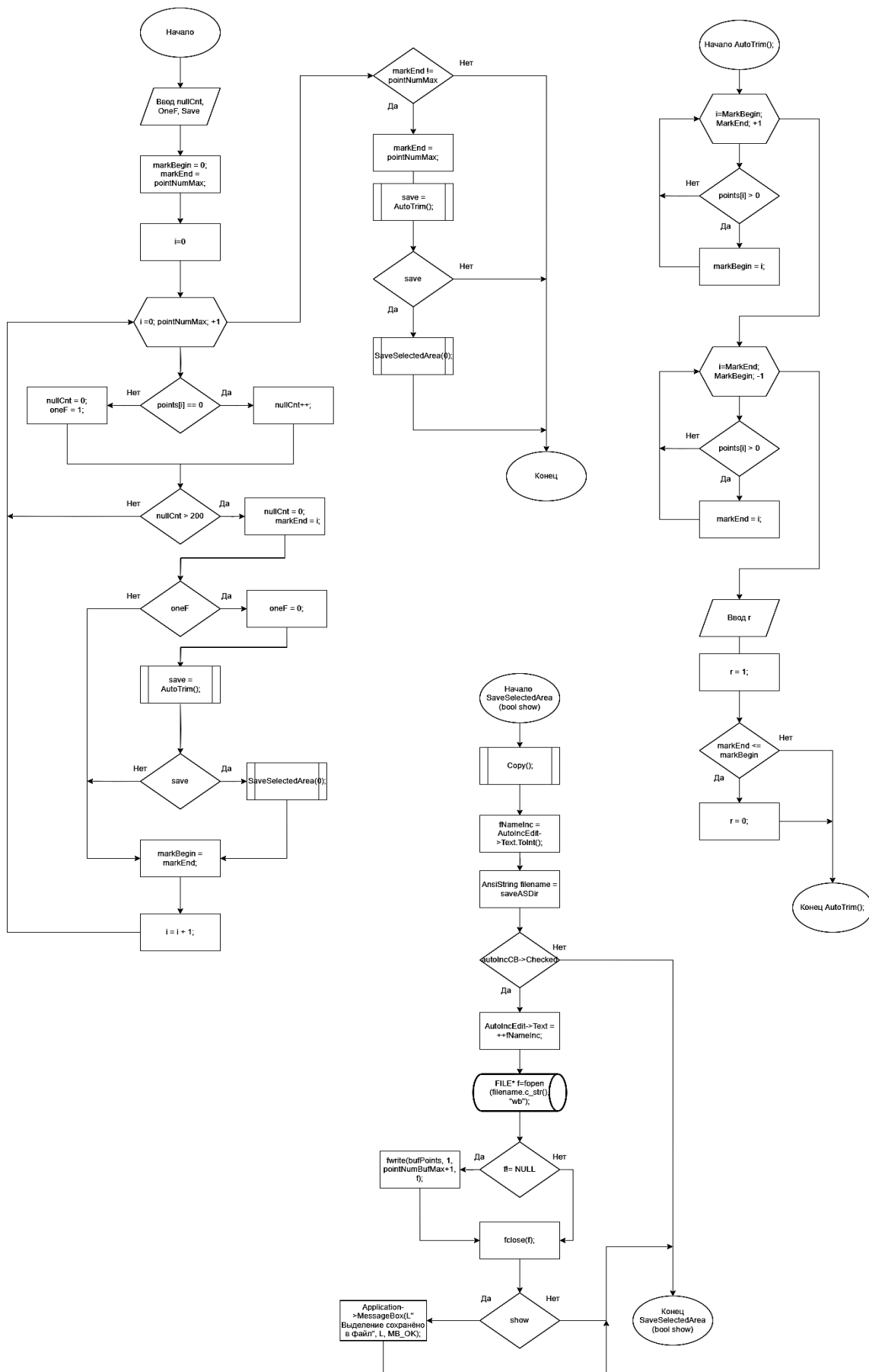


Рис. 3. Структурная схема разрабатываемого программного модуля

Автоматизация позволяет исключить ручное выделение областей графика. Пользователь выбирает исходный файл, после чего в указанной папке формируются обработанные файлы циклов заливки. Сообщения системы информируют оператора о статусе загрузки файла и успешности сохранения данных. Сравнение временных затрат на обработку одного графика вручную и в автоматическом режиме показало сокращение времени операции в 50-70 раз. Такая разница в скорости связана с огромным количеством обрабатываемых статистических данных (до нескольких тысяч) и от того, что, по мере уставания, скорость обработки данных человеком снижается.

Разработанный программный модуль интегрируется в существующую систему автоматической заливки без изменения её аппаратной части. И тем более он не затрагивает саму заливочную машину и линию HWS. Это позволяет производить все доработки без остановки производства.

В результате использования данного модуля обработки данных можно повысить скорость внедрения новой продукции и снизить издержки на неизбежный брак во время отладки при её внедрении путём исключения ошибок, связанных с человеческим фактором при обработке графиков.

**Выводы** Разработан программный модуль автоматизации обработки данных на языке C++ Builder в среде Embarcadero RAD Studio XE. Модуль реализует функции автоматического разделения циклов заливки, обрезки пустых участков графиков

и распределения обработанных данных по отдельным файлам с автоматической нумерацией. Внедрение разработанного модуля позволяет сократить время обработки одного графика заливки в 50-70 раз по сравнению с ручным режимом, исключить ошибки, связанные с человеческим фактором, повысить скорость внедрения новой продукции и снизить издержки при её внедрении.

#### Список источников

1 Интернет-сайт фирмы HWS-Sinto: [www.wagner-sinto.de](http://www.wagner-sinto.de)

2 Мельников И. А. Автоматизация заливки на АФЛ фирмы HWS-Sinto, Германия, дополнительно обеспечивает экономичность и качество / И. А. Мельников, Е. Н. Буданов. – URL: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2132/8902>. – Текст : электронный.

3 Обобщенное программирование – обзор реализаций. — Текст : электронный // Temofeev.ru : [сайт]. — URL: <https://temofeev.ru/info/articles/obobshchennoe-programmirovanie-obzor-realizatsiy/>

#### References

1. HWS-Sinto website: [www.wagner-sinto.de](http://www.wagner-sinto.de)

2. Melnikov, I. A. Automation of filling on AFL from HWS-Sinto, Germany, additionally ensures efficiency and quality / I. A. Melnikov, E. N. Budanov. – URL: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2132/8902> – Text : electronic.

3. Generalized Programming – overview of implementations. – Text : electronic // Temofeev.ru : [website]. — URL: <https://temofeev.ru/info/articles/obobshchennoe-programmirovanie-obzor-realizatsiy/>

*Статья поступила в редакцию 22.01.2026*

**Информация об авторах**

**Попов Сергей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Луганского государственного университета имени Владимира Даля», г. Луганск.

**E-mail:** popov\_s\_v@mail.ru.

**Дзюба Сергей Иванович**, заместитель начальника службы АСУТП ООО "Луганский Литейно-Механический Завод".

**E-mail:** serg\_dzuba@mail.ru.

**Денисов Максим Витальевич**, студент кафедры компьютерных систем и сетей Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

**E-mail:** maksim.denisov.03@mail.ru.

**Information about the authors**

**Popov Sergey Valerievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

**E-mail:** popov\_s\_v@mail.ru.

**Dzyuba Sergey Ivanovich**, Deputy Head of the Automated Control System at Lugansk Foundry and Mechanical Plant LLC.

**E-mail:** serg\_dzuba@mail.ru.

**Denisov Maxim Vitalievich**, student of the Department of Computer Systems and Networks, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.

**E-mail:** maksim.denisov.03@mail.ru.

---

**Для цитирования:**

Попов С.В., Дзюба С.И., Денисов М.В. Автоматизация обработки данных программно-аппаратного комплекса управления заливочной машиной // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 4(5). – С. 19-26.

**For citation:**

Popov S.V., Dzyuba S.I., Denisov M.V. Automation of data processing of the hardware-software complex for controlling the pouring machine // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 4(5). – P. 19-26.

---

## ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 681.7.054.43; 621.671

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРИВОДА СО СВОБОДНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ РОТОРОМ – РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Брешев В. Е.**

### DEVELOPMENT OF A DRIVE WITH A FREE RING ROTOR AS A CUTTING TOOL AND ITS EXPERIMENTAL RESEARCH

**Breshev V. E.**

***Аннотация.** Представлена разработанная конструкция и результаты экспериментальных исследований электромеханического привода с кольцевым ротором, который без механических опор и механического закрепления устойчиво вращается под действием электромагнитного поля. Данный привод входит в состав бесшпиндельного станка резки монокристаллов, в котором кольцевой ротор без механических опор, или «свободный» ротор, выполняет резку монокристаллов своей внутренней алмазной кромкой. Устойчивость вращения «свободного» ротора и выполнение им полезной работы обеспечивается движущими силами электромагнитной природы, которые особым образом распределены, возникают под действием вращающегося электромагнитного поля и перераспределяются в зависимости от положения вращающегося кольцевого ротора. При нахождении в центральном положении равновесия действующие на ротор движущие силы приводятся только к вращающему моменту, а при смещении – к вращающему моменту и радиальной равнодействующей движущих сил. Равнодействующая всегда направлена против возникающего смещения и обеспечивает устойчивость движения и положения «свободного» ротора. Актуальность работы заключается в том, что разрабатываемый бесшпиндельный станок резки монокристаллов с ротором-инструментом позволяет снять ограничения на размеры обрабатываемой заготовки, снизить потребляемую мощность в 2,5...3 раза, уменьшить массу и габариты станка резки в 5...10 раз. Разработаны: принцип функционирования привода со «свободным» ротором, который устойчиво вращается под действием вращающегося электромагнитного поля; математическая модель системы движущих сил; конструкция бесшпиндельного станка резки. Изготовлена экспериментальная установка станка резки с оптическим измерителем частоты вращения и динамометром. Представлены результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили адекватность математической модели.*

***Ключевые слова:** привод, кольцевой ротор без механических опор, экспериментальные исследования, бесшпиндельный станок резки.*

**Abstract.** The paper presents the developed design and the results of experimental studies of an electromechanical drive with a ring rotor, which rotates stably under the influence of an electromagnetic field without mechanical supports or mechanical fastening. This drive is part of a spindleless single-crystal cutting machine, where a ring rotor without mechanical supports, or a "free" rotor, cuts single-crystal with its internal diamond edge. The stability of rotation of the "free" rotor and its performance of useful work is provided by the driving forces of electromagnetic nature, which are specially distributed, arise under the influence of a rotating electromagnetic field and are redistributed depending on the position of the rotating annular rotor. When in the central equilibrium position, the driving forces acting on the rotor are reduced only to the torque, and when displaced, to the torque and the radial resultant of the driving forces. The resultant force is always directed against the resulting displacement and ensures the stability of the movement and position of the "free" rotor. The relevance of this work lies in the fact that the developed spindleless single-crystal cutting machine with a rotor-tool allows for removing restrictions on the size of the workpiece being processed, reducing the power consumption by 2.5-3 times, and reducing the mass and dimensions of the cutting machine by 5-10 times. Developed: the principle of operation of the drive with a "free" rotor, which rotates stably under the influence of a rotating electromagnetic field; a mathematical model of the system of driving forces; the design of a spindleless cutting machine. An experimental cutting machine setup with an optical rotation frequency meter and a dynamometer has been manufactured. The results of experimental studies have been presented, which have confirmed the adequacy of the mathematical model.

**Keywords:** drive, ring rotor without mechanical supports, experimental research, spindleless cutting machine.

**Введение.** Для существующих станков резки монокристаллов алмазными кругами с внутренней режущей кромкой (АКВР) характерно наличие промежуточных передач, массивных 50-80 кг) быстровращающихся роторов шпинделей с натяжными устройствами для АКВР. Последние ограничивают диаметр  $d$  обрабатываемых слитков, так как внешний диаметр АКВР  $D_H$  должен быть в 3...4 раза больше диаметра обрабатываемого слитка  $d$ , кроме того, внутренний диаметр АКВР  $D_{вн}$  также должен быть больше  $d$  (рис. 1).

Рост массы роторов приводит к увеличению вибрационных нагрузок и энергопотребления. Всё это приводит к значительному росту массы и энергопотребления станков при увеличении диаметра обрабатываемых заготовок.

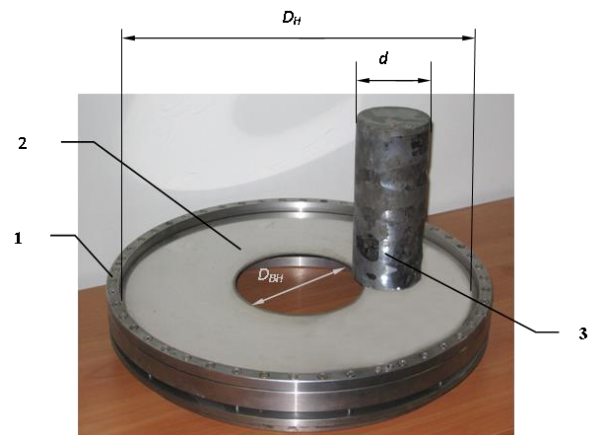


Рис. 1. Соотношение размеров натяжного устройства с АКВР и разрезаемого слитка:  
1 – натяжное устройство; 2 – АКВР;  
3 – разрезаемый слиток кремния

На рис. 2 показаны зависимости данных параметров от диаметра  $d$  обрабатываемых слитков монокристаллов [1, 2, 3].

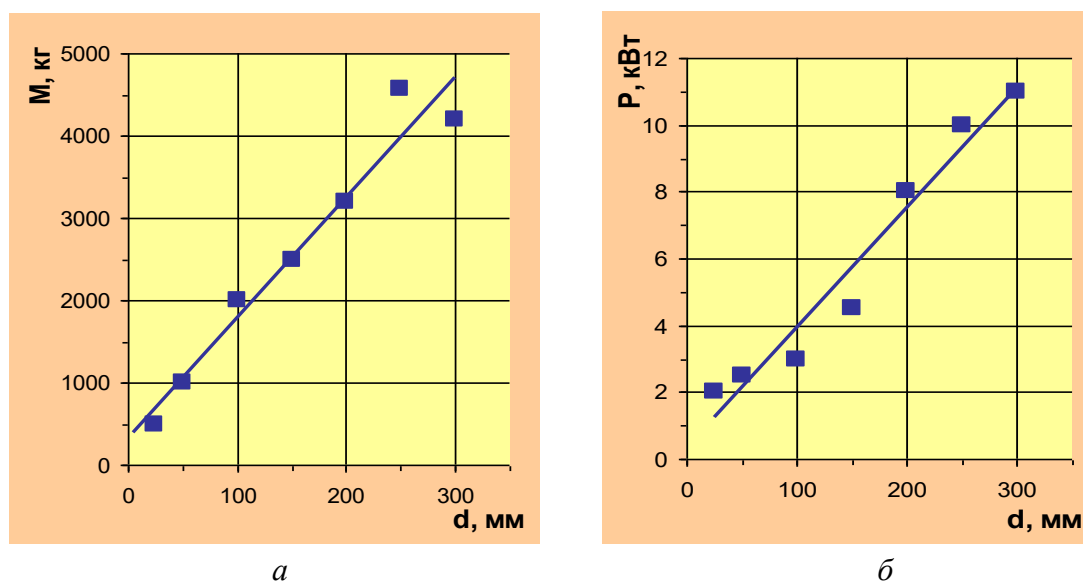


Рис. 2. Зависимость массы  $M$  станков резки (а) и потребляемой мощности  $P$  (б) от диаметра  $d$  обрабатываемых слитков монокристаллов

Создание непосредственного привода режущего инструмента, который не имеет механического закрепления и устойчиво вращается под действием вращающегося электромагнитного поля, призвано значительно улучшить технико-экономические показатели технологического оборудования, прежде всего станков резки монокристаллов, и сделать его конкурентоспособным.

Разрабатываемая конструкция непосредственного привода кольцевого ротора – инструмента предполагает, что последний удерживается в пространстве и вращается без механических опор и электрических контактов. Это возможно, если инструмент является вторичным элементом или ротором электрической машины [4]. Нами создан действующий макет станка резки монокристаллов, инструментом которого является алмазный отрезной круг с внутренней режущей кромкой (АКВР). Корпус АКВР выполнен из твёрдой меди М1 и является кольцевым ротором торцевой асинхронной электрической машины [2, 3].

Кольцевой ротор, который одновременно является режущим инструментом в станке и вторичным элементом асинхронной электрической машины, может выполнять полезную работу. Для этого под действием вращающегося электромагнитного поля на кольцевой ротор из парамагнитного материала действуют движущие электромагнитные силы, формирующие не только вращающий момент, но и равнодействующую силу, удерживающую его в заданном положении. В этом случае привод машины становится бесконтактным – в нём исключается твердотельный механический контакт между движущимися и неподвижными деталями аналогично приводам на газостатических или гидростатических подшипниках [2, 3, 5, 6]. Такой условно «свободный» кольцевой ротор при резке монокристаллов не требует превышения наружного диаметра над диаметром обрабатываемого слитка в 3...4 раза, а его масса составляет от 0,3 до 0,8 кг, то есть уменьшается примерно в 100 раз в сравнении со

станками традиционных конструкций [2].

**Постановка задачи.** Для разработки новой конструкции станка резки монокристаллов со «свободным» ротором и его экспериментального исследования необходимо решить следующие научно-технические задачи:

- разработать принцип работы (функционирования) привода со «свободным» кольцевым ротором, который устойчиво вращается под действием вращающегося электромагнитного поля;

- разработать математическую модель устойчивого вращения кольцевого ротора под действием движущих сил электромагнитной природы при отсутствии механических опор;

- разработать конструкцию станка резки с приводом со «свободным» ротором, индуктором вращающегося электромагнитного поля, регулируемым магнитопроводом, механизмами продольной и поперечной подачи разрезаемого слитка;

- разработать измерительную аппаратуру (оптический измеритель частоты вращения, динамометр), аппаратное и программное обеспечение для проведения измерений на всех режимах функционирования;

- выполнить аппаратные измерения параметров и характеристик на экспериментальной установке станка резки со «свободным» кольцевым ротором.

Решение перечисленных выше задач позволяет разработать принципиально новую – бесшпиндельную – конструкцию привода станка резки, которая реализует технологический процесс резки монокристаллов самым эффективным для АКВР способом – напроход. Это позволяет снять ограничения на диаметр обрабатываемых слитков, в несколько раз

уменьшить массу и потребляемую мощность станка [1-3].

**Целью работы** является разработка конструкции привода со «свободным» кольцевым ротором – режущим инструментом для станка резки монокристаллов и его экспериментальные исследования.

**Методика исследований.** Разработка конструкции привода со «свободным» кольцевым ротором – режущим инструментом для станка резки монокристаллов и его экспериментальные исследования включают последовательную реализацию следующих этапов:

1. Априорный анализ принципа действия привода с кольцевым ротором, который устойчиво вращается без механических опор и электрических контактов под действием электромагнитного поля и способен выполнять полезную работу.

2. Разработка математической модели системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора.

3. Разработка конструкции привода станка резки в соответствии с сформулированным принципом действия и математической моделью для системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора.

4. Разработка и изготовление измерительной аппаратуры (оптического измерителя частоты вращения и динамометра), аппаратного обеспечения для проведения измерений, которое включает разработку программного интерфейса измерений, а также программного обеспечения для записи и статистической обработки измерительной информации.

5. Измерение в ходе экспериментальных исследований радиальной силы, частоты вращения и вращающего момента на кольцевом роторе, механической характеристики разработанного привода.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Априорный анализ принципа действия привода с кольцевым ротором показал, что на пути его создания наиболее важной и сложной является задача обеспечения его устойчивого вращения на всех режимах функционирования [2, 3, 7]. Последнее означает, что на любом режиме функционирования «свободный» ротор должен иметь заданную частоту вращения и заданное положение в рабочем пространстве привода или станка. При этом устойчивость вращательного движения обеспечивается стабильностью и регулируемостью величины крутящего (вращающего) момента  $M_{от}$  движущих сил электромагнитной природы [4, 8], независимо от положения кольцевого ротора в рабочем пространстве привода, частоты его вращения, распределения сил сопротивления и технологических сил (сил резания).

Устойчивость положения кольцевого ротора в рабочем пространстве привода можно рассматривать как устойчивость материальной точки, на которую действуют потенциальные движущие силы и силы сопротивлений. Устойчивому положению материальной точки, согласно теореме Лагранжа – Дирихле, должен соответствовать минимум потенциальной энергии, поэтому любое смещение кольцевого ротора из этого положения возможно в случае преодоления некоторого потенциального барьера [7]. Поле движущих сил электромагнитной природы должно создавать данный потенциальный

барьер за счёт действия стабилизирующей радиальной равнодействующей  $F_r$ . Она совершает работу по перемещению ротора в исходное центральное положение равновесия.

**Математическое моделирование системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора.** При вращении кольцевого ротора в центральном положении относительно индуктора электромагнитного поля действующая на кольцевой ротор система элементарных движущих сил осесимметрична. Осесимметричными также являются индуктор, кольцевой ротор и вращающееся электромагнитное поле. В этом случае суммирование сил может быть выполнено интегрированием по поверхности ротора с пределами интегрирования по углу от нуля до  $2\pi$ , по радиус-вектору от внутреннего радиуса до наружного.

При сколь угодно малом смещении  $e_x$  (вдоль оси  $X$ ) ротора от центрального положения равновесия происходит перераспределение элементарных движущих сил на кольцевом роторе. Возникает радиальная равнодействующая движущих сил  $F_{rx}$ , направленная против смещения. При этом вращающий момент движущих сил  $M_{от}$  продолжает действовать и уравнивать момент сил сопротивления  $M_c$ , что обеспечивает равномерное вращение кольцевого ротора с заданной угловой скоростью.

Таким образом, для обеспечения устойчивости плоскопараллельного движения кольцевого ротора, действующие на него движущие силы должны отвечать следующим условиям [2]:

- при вращении кольцевого ротора без смещения – в центральном положении

равновесия – движущие электромагнитные силы должны приводиться только к крутящему (вращающему) моменту  $M_{o\tau}$ , который приводит его во вращение и уравнивает момент сил сопротивления  $M_c$ .

- при возникновении некоторого смещения  $e_x$  ротора от центрального положения равновесия в любом направлении, дополнительно к крутящему моменту  $M_{o\tau}$ , должна возникать радиальная равнодействующая  $F_{rx}$  движущих электромагнитных сил, которая направлена в противоположную смещению сторону и возвращает кольцевой ротор в положение равновесия.

На рис. 3 показаны расчётные схемы математической модели [2].

В соответствии с расчётной схемой (рис. 3, а), каждая движущая элементарная электромагнитная сила  $dF$  должна быть направлена в плоскости вращения под некоторым переменным углом  $\psi$  к радиальному направлению силового электромагнитного поля, чтобы формировать как тангенциальные составляющие  $dF_\tau$  (создающие вращающий или главный момент движущих сил  $M_{o\tau}$ ), так и радиальные составляющие  $dF_r$  (создающие радиальную равнодействующую  $F_r$ ).

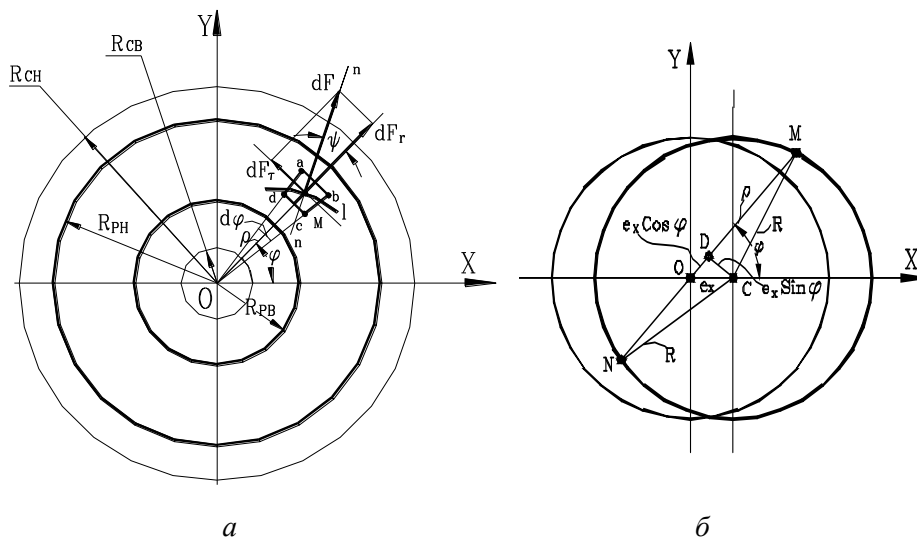


Рис. 3. Расчётные схемы математической модели для центрального положения кольцевого ротора (а) и его радиальном смещении на  $e_x$  (б)

Переменный угол наклона  $\psi$  относительно оси индуктора элементарной движущей силы  $dF$  обеспечивает перераспределение элементарных движущих сил при смещении кольцевого ротора на  $e_x$  от центрального положения равновесия

относительно оси индуктора электромагнитного поля.

Тогда элементарная движущая сила, действующая на каждую элементарную площадку кольцевого ротора в электромагнитном силовом поле, может быть выражена:

$$dF = \frac{(\omega_c - \omega_p)}{4\rho_{\vartheta}} \delta B^2 \rho^2 d\rho d\varphi \quad \text{или} \quad dF = CB^2 \rho^2 d\rho d\varphi, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  – угловая скорость вращения силового электромагнитного поля;

$\omega_p$  – угловая скорость вращения кольцевого ротора;

$\rho_{y\delta}$  – удельное сопротивление материала кольцевого ротора;

$\delta$  – толщина кольцевого ротора;

$B$  – модуль вектора магнитной индукции (силовая характеристика вращающегося электромагнитного поля [4, 8];

$\varphi$  – угловая координата центра  $M$  элементарной площадки кольцевого ротора;

$\rho$  – радиус-вектор центра  $M$  элементарной площадки ротора (рис. 3, а);

$C$  – комплексный коэффициент.

При отсутствии смещения кольцевого ротора ( $e_x = 0$ ) система элементарных движущих сил  $dF$  (1) приводится только к вращающему моменту  $M_{o\tau}$ , а главный вектор  $F$  и его проекции на оси координат  $F_{zx}, F_{zy}, F_{rx}, F_{ry}$  равны нулю:

$$M_{o\tau} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^3 d\rho d\varphi \quad \text{или} \quad M_{o\tau} = \frac{\pi}{2} C_r B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4); \quad (2)$$

$$F_{zx} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \sin \varphi d\rho d\varphi = 0; \quad F_{zy} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \cos \varphi d\rho d\varphi = 0;$$

$$F_{rx} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \cos \varphi d\rho d\varphi = 0; \quad F_{ry} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \sin \varphi d\rho d\varphi = 0,$$

где  $C_r$  – коэффициент радиальной жёсткости электромагнитной опоры ротора  $C_r = C \cdot \cos \psi$ ;

$C_\tau$  – коэффициент тангенциальной жёсткости электромагнитной опоры ротора  $C_\tau = C \cdot \sin \psi$ ;

$\psi$  – угол наклона элементарной движущей силы  $dF$  к радиусу (см. рис. 3).

При смещении  $e_x$  кольцевого ротора от центрального положения равновесия происходит перераспределение

элементарных движущих сил. В результате него на кольцевой ротор будет действовать не только вращающий момент  $M_{o\tau}$ , но и главный вектор  $F$ , имеющий радиальную  $F_r$  составляющую. Действие  $F_r$ , согласно принципа действия привода со «свободным» кольцевым ротором, должно приводить к его возвращению в центральное положение. Получены аналитические выражения для  $M_{o\tau}$ :

$$M_{o\tau} = \int_0^{2\pi \rho_2} \int_{\rho_1} C_r B^2 \rho^3 d\rho d\varphi. \quad (5)$$

$$M_{o\tau} = \frac{C_r B^2 R_{PH}}{4} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PH}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi - \frac{C_\tau B^2 R_{PB}}{4} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi. \quad (6)$$

Пренебрегая в (6) малой величиной  $\frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi$  получаем окончательно:

$$M_{or} = \frac{\pi}{2} C_r B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4) + \pi C_r B^2 (R_{PH}^2 - R_{PB}^2) e_x^2. \quad (7)$$

Радиальная  $F_r$  составляющая главного вектора движущихся электромагнитных сил имеет проекции на оси координат, которые аналитически определяются:

$$F_{ry} = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} C_r B^2 \rho^2 \sin \varphi \, d\rho d\varphi = 0;$$

$$F_{rx} = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} C_r B^2 \rho^2 \cos \varphi \, d\rho d\varphi = C_r B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2). \quad (8)$$

Таким образом, радиальная составляющая  $F_r$  главного вектора движущихся сил определяется величиной проекции  $F_{rx}$  на ось  $X$  согласно (8) и оказывает определяющую роль в обеспечении устойчивости вращающегося кольцевого ротора без механических опор. При возникновении любого, сколь угодно малого смещения  $e_x$ , возникает равнодействующая  $F_{rx}$  движущихся сил, которая имеет радиальное и противоположное смещению направление, пропорциональна его величине.

**Разработки конструкции привода станка резки и измерительной аппаратуры.** На основании разработанных принципа действия привода со «свободным» ротором и математической модели системы движущихся сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора, были спроектированы и изготовлены [2]:

- экспериментальная установка станка резки монокристаллов с приводом для кольцевого ротора – инструмента без механических опор;

- измерительная аппаратура (оптический измеритель частоты вращения и динамометр), аппаратное и программное обеспечение для проведения измерений

параметров и характеристик привода с кольцевым ротором без механических опор.

Для плавного и точного регулирования частоты вращения электромагнитного поля, которое приводит к такому же плавному и точному регулированию частоты вращения кольцевого ротора в экспериментальной установке станка резки используется преобразователь частоты *MITSUBISHI transistorized inverter fr-E540-3,7k-ec*. Он имеет номинальную мощность 3,7 кВт и обеспечивает регулирование частоты напряжения обмоток индуктора от 0,5 до 400 Гц. Индуктор имеет две пары полюсов, поэтому частота вращения магнитного поля может регулироваться от 15 до 12000 об/мин.

Для бесконтактного измерения частоты вращения кольцевого ротора разработан и изготовлен оптический измеритель частоты. Преимущество применения данного измерителя заключается в отсутствии механического воздействия на «свободный» кольцевой ротор, устойчивости к воздействию переменного электромагнитного поля, синхронизацией с работой динамометра.

Динамометр является двухкомпонентным, что позволяет

измерять тангенциальные и радиальные силы при контактном воздействии на внутреннюю кромку кольцевого ротора.

Экспериментальная установка бесшпиндельного станка резки показана на рис. 4 [2].

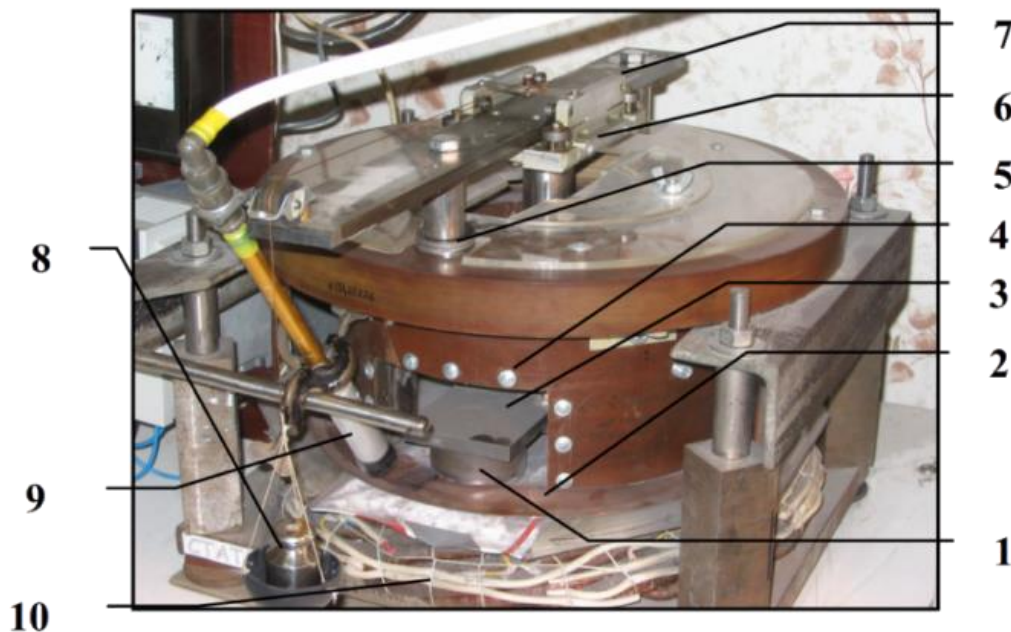


Рис. 4. Экспериментальная установка бесшпиндельного станка резки с кольцевым ротором – инструментом без механических опор

1 – разрезаемый монокристалл кремния; 2 – кольцевой ротор – режущий инструмент без механических опор; 3 – кронштейн механизма поперечной подачи монокристалла; 4 – верхний неактивный магнитопровод; 5 – калиброванные шайбы; 6 – каретка механизма поперечной подачи; 7 – направляющая механизма подачи; 8 – груз механизма поперечной подачи; 9 – оптический датчик частоты вращения; 10 – индуктор (источник) вращающегося электромагнитного поля

Конструкция экспериментальной установки с динамометром, который установлен вместо механизма подачи заготовки, показана на рис. 5.

Динамометр имеет конструкцию, позволяющую для проведения измерений монтировать его в экспериментальную установку вместо механизма поперечной подачи (рис. 4 и рис. 5). Он имеет два чувствительных элемента, перемещающихся на каретках, которые своими наконечниками входят в механический контакт с внутренней кромкой кольцевого ротора в диаметрально противоположных точках. Локальный механический контакт по внутренней

кромке кольцевого ротора позволяет сохранять устойчивость его движения при измерениях [2]. Каждый чувствительный элемент динамометра имеет две пластины с тензодатчиками (два компонента динамометра), которые развёрнуты относительно друг друга под прямым углом. Один компонент предназначен для измерения тангенциальных сил и вращающего (крутящего) момента, а второй – для измерения радиальной равнодействующей движущих сил. Измерительный комплекс на основе тензо-АЦП позволяет синхронизировать измерения сил, вращающего момента и частоты вращения кольцевого ротора.

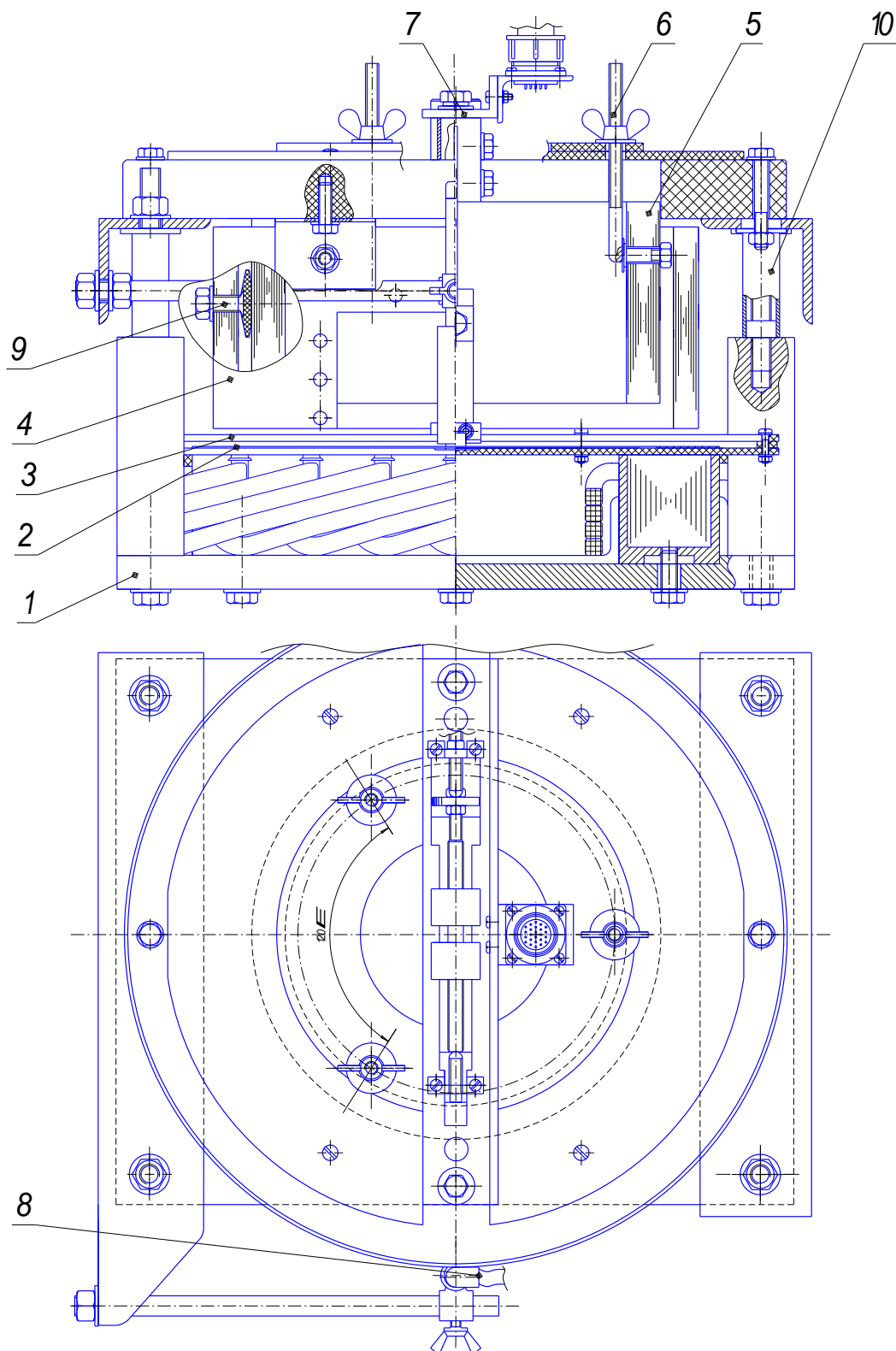


Рис. 5. Конструкция экспериментальной установки с динамометром  
 1 – индуктор силового поля; 2 – кольцевой ротор без механических опор; 3 – кассета; 4 – наружная часть магнитопровода; 5 – внутренняя (подвижная) часть магнитопровода; 6 – резьбовые шпильки для регулирования рабочего зазора между индуктором и дополнительным магнитопроводом; 7 – динамометр двухкомпонентный; 8 – оптический измеритель частоты; 9 и 10 – узлы юстировки (установки взаимного положения элементов экспериментальной установки)

Двухкомпонентный динамометр реализует две основные схемы измерений. В первой схеме используется только один чувствительный элемент, который входит своим наконечником в локальный контакт с внутренней кромкой вращающегося кольцевого ротора и смещает его от центрального положения равновесия на величину  $e$  (от 0 до 30 мм). При смещении начинает действовать радиальная равнодействующая движущих сил  $F_{rx}$ , которая противодействует смещению и

измеряется динамометром. Она равна силе  $F_r$ , с которой динамометр действует на кольцевой ротор и противоположна по направлению. Измеряются также касательная сила сопротивления  $F_{\tau}$ , которая создаёт момент сопротивления, уравновешиваемый вращающим моментом движущих электромагнитных сил. В данной схеме измерения моделируется процесс резки монокристалла внутренней кромкой кольцевого ротора (рис. 6).

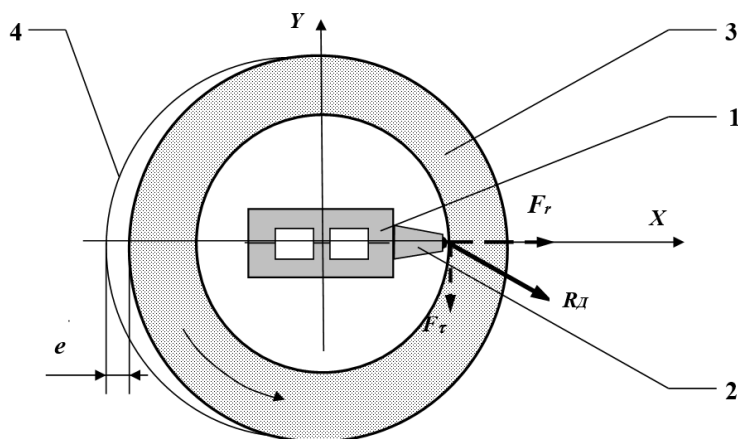


Рис. 6. Схема измерений с одним чувствительным элементом динамометра:

1 – динамометр; 2 – чувствительный элемент динамометра; 3 – кольцевой ротор; 4 – исходное центральное положение кольцевого ротора;  $e$  – смещение кольцевого ротора от исходного положения

Во второй схеме измерений используется два чувствительных элемента, которые расходятся в противоположных направлениях и входят своим наконечником в контакт с внутренней кромкой кольцевого ротора. При разведении чувствительные элементы оказывают давление на внутреннюю кромку вращающегося ротора. Измеряются радиальные силы давления  $F_r$  и касательные силы сопротивления  $F_{\tau}$ , которые создают момент сопротивления, уравновешиваемый вращающим моментом движущих электромагнитных сил. В данной схеме измерения могут выполняться как в исходном центральном

положении кольцевого ротора, так и при его смещении до 30 мм (рис. 7).

**Результаты экспериментальных исследований.** На экспериментальной установке были выполнены измерения развиваемой кольцевым ротором частоты вращения, действующих на него равнодействующей радиальных движущих сил и вращающего момента, проведена их статистическая обработка [2, 9]. Результаты измерения частоты вращения алюминиевых и медных кольцевых роторов различной толщины на холостом ходу на экспериментальной установке (рис. 4) показаны на рис. 8.

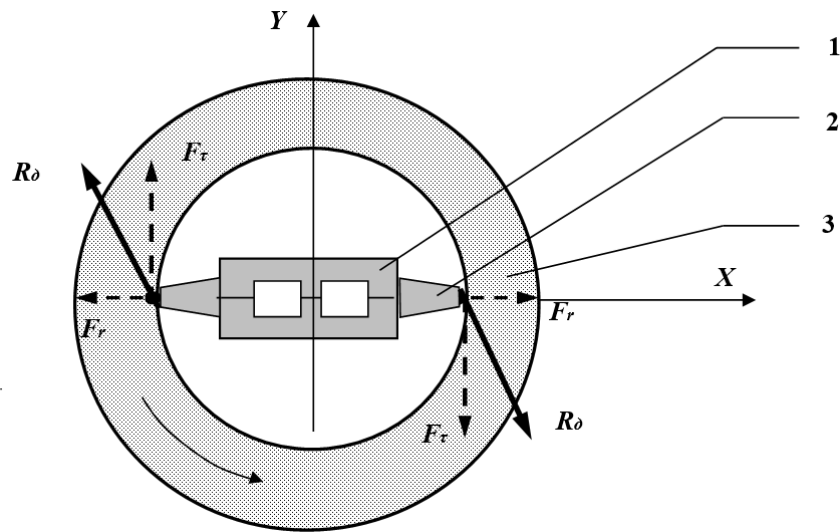


Рис. 7. Схема измерений с двумя чувствительными элементами динамометра: 1 – динамометр; 2 – чувствительный элемент динамометра; 3 – кольцевой ротор

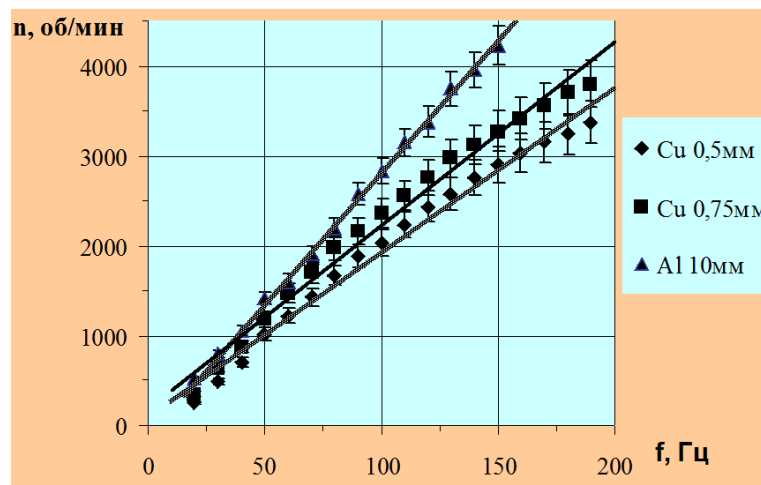


Рис. 8. Зависимость частоты вращения  $n$  кольцевых роторов от частоты электропитания  $f$  индуктора

Как видно из рис. 8, с увеличением частоты электропитания индуктора частота вращения кольцевых роторов монотонно возрастает. Испытания действующего макета станка резки показали, что кольцевой ротор – инструмент без механических опор – развивает необходимую для осуществления резки частоту вращения (до 4 000 об/мин и более), сохраняя устойчивость вращения на различных режимах.

Результаты измерений частоты вращения кольцевого ротора в зависимости от величины приложенной к нему симметричной нагрузки – момента сопротивления – показаны на рис. 9. Материал и толщина испытуемых кольцевых роторов указаны на рисунке, результаты измерений фиксировались на установившемся режиме вращения, данную зависимость принято называть механической характеристикой привода.

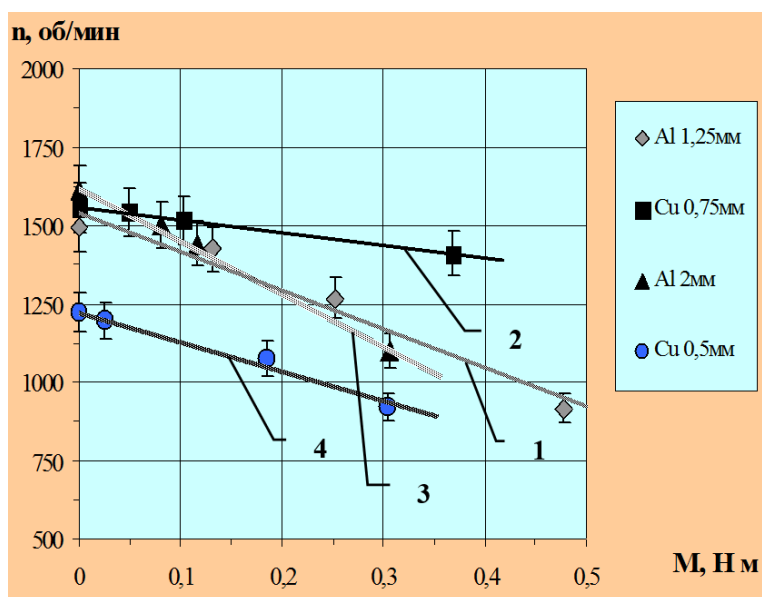


Рис. 9. Зависимость частоты вращения кольцевого ротора от момента сопротивления

С увеличением момента сопротивления устойчивость движения повышается, что соответствует полученному в [2] критерию устойчивости движения кольцевого ротора без механических опор. При увеличении нагрузки, имеет место линейное уменьшение частоты вращения. Полученные экспериментальные данные соответствуют расчётам, выполненным на основе разработанной математической модели [10].

**Выводы.** 1. Сформулирован принцип функционирования привода с кольцевым ротором – инструментом без механических опор, который устойчиво вращается под действием электромагнитного поля и способен совершать полезную работу – резку монокристаллов. Он состоит в создании внутри привода вращающегося электромагнитного поля, которое формирует на кольцевом роторе систему движущих электромагнитных сил, приводящуюся к вращающему моменту и радиальной равнодействующей движущих сил, которая обеспечивает устойчивость вращающегося кольцевого ротора.

2. Разработана математическая модель, аналитически определяющая вращающий

(крутящий) момент и радиальную равнодействующую элементарных движущих электромагнитных сил, действие которых обеспечивает устойчивое вращение кольцевого ротора-инструмента в приводе станка резки монокристаллов. Получены аналитические выражения для случая вращения ротора в центральном положении равновесия и при возникновении сколь угодно малого смещения в плоскости вращения.

3. Разработана конструкция привода и экспериментальной установки с двухкомпонентным динамометром, который устанавливается вместо механизма подачи и позволяет имитировать технологический процесс резки, измерять радиальную равнодействующую силу и вращающий момент как в центральном положении равновесия кольцевого ротора, так и при его радиальном смещении до 30 мм.

4. Выполненные экспериментальные исследования показали, что кольцевой ротор – режущий инструмент без механических опор достигает частоты вращения 2,5...4 тыс. об/мин и более, развивает крутящий момент до 0,5 Нм. Он

способен совершать полный цикл «разгон-торможение» на холостом ходу и под технологической нагрузкой, выполнять резку монокристаллов напроход.

5. Эффективность разработанной конструкции привода для станка резки монокристаллов заключается в том, что снимаются ограничения на диаметр обрабатываемых слитков, уменьшаются размеры инструмента примерно в 2 раза, а масса вращающихся деталей и узлов примерно в 100 раз. Это позволяет существенно упростить конструкцию и расширить технологические возможности станков резки, но при этом снизить энергопотребление в 1,5...3 раза и массу станка в 5...10 раз.

#### Список источников

1. Ерошин С.С., Брешев В.Е. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №5(17). – С. 82–85.
2. Брешев В.Е., Шевченко С.В. Приводы машин с кольцевыми рабочими органами без механических опор: монография. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 186 с.
3. Брешев В.Е., Долженко Ю.С. Концепция создания бесконтактных приводов вращения и их применение в машинах различного назначения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2025. – Вып. 2(89) – С. 19–26.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник в 2-х кн. Кн.1. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.
5. Брешев В.Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.
6. Brian Rowe W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. – Oxford, 2012 – 334 p.
7. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. – СПб.: Лань, 2003. – 304 с.
8. Мартыненко Ю.Г. Движение твёрдого тела в электрических и магнитных полях. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
9. Протасов К.В. Статистический анализ экспериментальных данных. – М.: Мир, 2005. – 142 с.
10. Брешев В.Е. Многопараметрический синтез бесконтактных приводов с кольцевыми роторами для рабочих машин // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – 2025. – №1(46). – С. 58–73.

#### References

1. Eroshin S.S., Breshev V.E. Increasing the efficiency of machines by using working parts without mechanical supports // Vostochno-Evropeskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2005. – №5(17). – P. 82–85.
2. Breshev V.E., Shevchenko S.V. Drives of machines with ring-shaped working bodies without mechanical supports: a monograph. – Lugansk: Izd-vo LNU im. V. Dalja, 2017. – 186 p.
3. Breshev V.E., Dolzhenko Ju.S. The concept of creating contactless rotary drives and their application in various machines // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija. – Doneck: Izd-vo DonNTU, 2025. – Vyp. 2(89) – P. 19–26.
4. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Design of electric machines: uchebnik v 2-h kn. Kn.1. – M.: Jenergoatomizdat, 1993. – 464 p.
5. Breshev V.E. Development of theory and methods of design of contactless type drives with combined and passive stability assurance: monografija. – Lugansk: Izd-vo LGU im. V. Dalja, 2016. – 208 p.
6. Brian Rowe W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. – Oxford, 2012 – 334 p.
7. Merkin D.R. Introduction to the theory of motion stability. – SPb.: Lan', 2003. – 304 p.
8. Martynenko Ju.G. Motion of a solid body in electric and magnetic fields. – M.: Nauka, 1988. – 368 p.
9. Protasov K.V. Statistical analysis of experimental data. – M.: Mir, 2005. – 142 p.
10. Breshev V.E. Multiparametric synthesis of non-contacting drives with ring rotors for working machines // Resursosberegajushhie tehnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii. – 2025. – №1(46). – P. 58–73.

*Статья поступила в редакцию 15.01.2025*

---

**Информация об авторе**

**Брешев Владимир Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Станки, инструменты и инженерная графика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

*SPIN-code:1923-7663, AuthorID:1248354,*

**E-mail:** veb\_lug@mail.ru

**Information about the author**

**Breshev Vladimir Evgen'evich**, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department «Machines, Tools and Engineering Graphics» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-code:1923-7663, Author ID:1248354*

**E-mail:** veb\_lug@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Брешев В. Е. Разработка конструкции привода со свободным кольцевым ротором - режущим инструментом и его экспериментальные исследования // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 4(5). – С. 27-41.

**For citation:**

Breshev V. E. Development of a drive with a free ring rotor as a cutting tool and its experimental research// Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 4(5). – P. 27-41.

---

УДК 621.791.92; 621.771.25

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ БАНДАЖЕЙ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Буранов Д. С., Ясуник С. Н.

## REPAIR OF BANDS AND ROLLS OF CONTINUOUS CASTING MACHINES

Buranov D. S., Yasunik S. N.

**Аннотация.** В статье с целью повышения эксплуатационной стойкости и снижения затрат на ремонт оборудования машин непрерывного литья заготовок рассмотрена технология восстановления бандажей роликов из стали 40ХМФА, отработавших межремонтный цикл. На основе анализа причин выхода из строя (сетка разгара, абразивный износ) обоснован выбор наплавочных материалов и режимов послойной наплавки под флюсом. Представлены результаты измерения твердости восстановленного слоя, определены технико-экономические показатели процесса.

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок, ролик, бандаж, восстановление, наплавка под флюсом, порошковая проволока, сетка разгара, износ, твердость, ресурс.

**Abstract.** In the article in order to increase the operational durability and reduce the cost of repairing equipment for continuous casting machines a technology for restoring the bands of rollers made of 40KhMFA steel that have completed their inter-repair cycle is considered. Based on the analysis of the causes of failure (fire check network, abrasive wear), the choice of surfacing materials and modes of layer-by-layer submerged arc surfacing is justified. The results of measuring the hardness of the restored layer are presented, and the technical and economic indicators of the process are determined.

**Key words:** continuous casting machine, roller, band, restoration, submerged arc surfacing, flux-cored wire, fire check network, wear, hardness, resource.

**Введение.** Оборудование машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) работает в условиях интенсивных тепловых и механических нагрузок. Наиболее нагруженными элементами системы являются ролики сегментов, непосредственно контактирующие с горячей непрерывно литой заготовкой. В процессе эксплуатации поверхность бандажей (бочек) роликов подвергается циклическому термическому воздействию,

что приводит к образованию сетки разгара, а также к абразивному износу от окалины. Восстановление изношенных роликов является важной научно-технической задачей, позволяющей значительно снизить эксплуатационные затраты металлургических предприятий [1].

Анализ последних публикаций и исследований [2, 3, 4] показывает, что наиболее эффективным методом продления ресурса деталей данного класса является

наплавка износостойкими материалами. В работах [2, 3] рассмотрены общие принципы выбора наплавочных материалов для ремонта металлургического оборудования, установлены зависимости между химическим составом наплавленного металла и его износостойкостью. В исследовании [4] рассматривается влияние легирующих элементов в наплавочных материалах на стойкость к образованию разгара. Однако, вопросы разработки комплексной технологии восстановления именно составных бандажированных роликов МНЛЗ из стали 40ХМФА с использованием двухслойной наплавки под флюсом освещены недостаточно полно.

**Целью работы** является разработка и апробация технологии восстановления бандажей роликов МНЛЗ, обеспечивающей твердость рабочего слоя на уровне 41–46 HRC и эксплуатационную стойкость, сопоставимую с новым изделием, при снижении затрат на ремонт.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) анализ характера и геометрических параметров дефектов бандажей после завершения межремонтного цикла;

2) обоснование выбора марок наплавочных материалов и схемы наплавки;

3) определение рациональных режимов предварительной механической обработки, наплавки и финишной токарной обработки;

4) экспериментальная оценка твердости восстановленного слоя;

5) расчет технико-экономической эффективности разработанной технологии.

Бандажи роликов МНЛЗ изготавливаются из стали марки 40ХМФА (ГОСТ 4543-71), обладающей высокими прочностными характеристиками и

термической стабильностью. В процессе эксплуатации на рабочей поверхности бочки, контактирующей с горячей заготовкой, формируются характерные дефекты. Сетка разгара представляет собой разветвленную сеть поверхностных термических трещин, возникающих вследствие циклических теплосмен. Абразивный износ проявляется в уменьшении наружного диаметра бандаж за счет истирающего воздействия окалины, движущейся вместе с заготовкой. Глубина дефектного слоя, определенная при обследовании изношенных бандажей, достигает 4-5 мм, что обуславливает необходимость предварительной механической обработки (обдирки) на указанную величину для полного удаления дефектов.

На рис. 1 представлен внешний вид бандаж после эксплуатации. На поверхности отчетливо видна разветвленная сетка разгара (термических трещин), возникающая вследствие циклического теплового воздействия, и следы абразивного износа. Глубина дефектного слоя достигает 4-5 мм, что подтверждает необходимость предварительной механической обработки (обдирки) на указанную величину для полного удаления дефектов.



Рис. 1. Поверхность бандаж после эксплуатации: сетка разгара и следы износа

Технологический процесс восстановления включает следующие этапы:

Первый этап – предварительная механическая обработка (обдирка). Производится удаление поверхностного дефектного слоя на токарном станке. Величина снимаемого слоя составляет до 5 мм на диаметр. Обработка выполняется до выведения сетки разгара и придания бандажу правильной геометрической формы, обеспечивающей равномерность наплавленного слоя. Контроль геометрии после обдирки осуществляется универсальным измерительным инструментом (индикатором) для подтверждения отсутствия овальности и конусообразности.

Второй этап – наплавка. Наплавка осуществляется под слоем флюса с использованием сварочного трактора, что обеспечивает стабильность геометрических параметров наплавленного слоя и высокое качество металла. Выбор наплавочных материалов выполнен исходя из условий работы ролика и необходимости обеспечения надежной связи наплавленного металла с основой. Применена двухслойная схема наплавки:

– первый (буферный) слой выполняется порошковой проволокой марки SO 530-0 (DIN 8555 MF 10-250-GF-250C). Данный материал характеризуется повышенной пластичностью и предназначен для наплавки по высокоуглеродистым и легированным сталям. Буферный слой компенсирует термические напряжения, возникающие в зоне сплавления, и предотвращает образование трещин;

– второй и третий (рабочие) слои выполняются порошковой проволокой марки SK 742 N-SK (DIN 8555 UP 5-GF-45-C). Данный материал предназначен для

наплавки под флюсом деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа и высоких контактных давлений. Химический состав проволоки обеспечивает получение наплавленного металла с твердостью 41-46 HRC после естественного старения.

Режимы наплавки приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Режимы наплавки бандажей роликов МНЛЗ

Слой	Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм	Сила тока, А
1	SO 530-0	3,2	350-400
2,3	SK 742 N-SK	3,2	380-450

На рис. 2 представлен внешний вид бандаж непосредственно после завершения наплавочных работ, до выполнения финишной механической обработки. На поверхности отчетливо видны следы послойного нанесения металла, характерные для автоматической наплавки под флюсом. Наплавленный слой имеет равномерную толщину по всей длине бочки, отсутствуют раковины, поры и другие дефекты, что свидетельствует о стабильности выбранных режимов. Избыточный припуск (до 4 мм на диаметр) обеспечивает возможность последующей чистовой обработки до требуемых чертежных размеров.



Рис. 2. Бандаж ролика МНЛЗ после наплавки до механической обработки

Третий этап – финишная токарная обработка.

После завершения наплавочных операций и естественного остывания бандажа производится механическая обработка наплавленной поверхности до чертежных размеров. Припуск под чистовую обработку составляет 4 мм на диаметр. Финишная обработка выполняется с использованием того же принципа базирования, что и предварительная, что минимизирует погрешность установки и обеспечивает стабильность размеров по всей длине бочки. Шероховатость обработанной поверхности соответствует  $Ra=3,2$  мкм, что удовлетворяет требованиям к рабочим чертежам роликов МНЛЗ. Одновременно с восстановлением бочки производится замена подшипников и сальников, а также механическая обработка (переточка) посадочных мест бандажа.

Внешний вид восстановленного бандажа после финишной токарной обработки представлен на рис. 3. Поверхность имеет равномерный металлический блеск, отсутствуют видимые дефекты в виде рисок, задиров или следов усадочных раковин. Геометрические параметры соответствуют чертежным размерам, шероховатость обеспечивает требуемые условия контакта с подшипниковыми узлами и нормальное функционирование ролика в составе сегмента МНЛЗ.

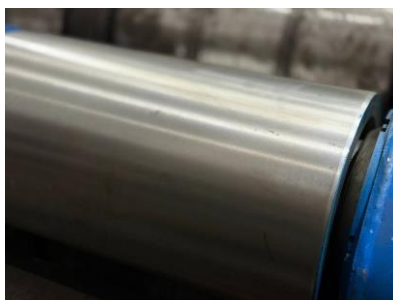


Рис. 3. Бандаж ролика МНЛЗ после финишной токарной обработки

Твердость наплавленного металла контролировалась методом Роквелла (шкала С) на образцах-свидетелях, изготовленных из того же материала и прошедших полный цикл наплавки в тех же режимах. Замеры производились после завершения механической обработки. Результаты измерений подтвердили стабильное получение твердости в пределах 41-46 HRC, что соответствует требованиям технической документации на новые бандажи.

Основным критерием эффективности разработанной технологии является эксплуатационная стойкость восстановленных роликов. Промышленные испытания, проведенные в условиях металлургического предприятия, показали, что наработка восстановленных бандажей до следующего ремонта сопоставима с наработкой новых изделий (100%). При этом себестоимость восстановления комплекта (с учетом стоимости новых подшипников, сальников и затрат на механическую обработку переточку посадочных мест бандажа) составляет 60% от стоимости приобретения нового ролика.

**Выводы.** Разработана и внедрена технология восстановления бандажей роликов МНЛЗ из стали 40ХМФА, включающая обдирку, двухслойную наплавку проволоками SO 530-0 и SK 742 N-SK и финишную механическую обработку. Установлено, что предложенная технология обеспечивает требуемый уровень твердости рабочей поверхности (41-46 HRC) и позволяет достичь 100%-го ресурса новых изделий. Экономический эффект достигается за счет снижения затрат на ремонт (до 60% от цены нового ролика) и повторного использования бандажей.

**Список источников**

1. Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 4. / А.И. Целиков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.
2. Ткачев, В.Н. Наплавка при ремонте деталей оборудования / В.Н. Ткачев // Сварочное производство. – 2015. – № 3. – С. 24–28.
3. Лившиц, Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
4. Смирнов, А.Н. Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев, Ю.А. Прокопов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
5. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
6. Михеев, А.Е. Восстановление роликов машин непрерывного литья заготовок электродуговой наплавкой / А.Е. Михеев, В.А. Серебровский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2019. – № 4. – С. 27–31.

**Информация об авторах**

**Буранов Дмитрий Сергеевич**, студент 6 курса кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.  
**E-mail:** dimitry.buranov@gmail.com

**Ясуник Светлана Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.  
**E-mail:** jsn7628620@mail.ru

**Для цитирования:**

Буранов Д.С., Ясуник С.Н. Восстановление бандажей роликов машин непрерывного литья заготовок // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 4 (5). – С. 42-46.

**For citation:**

Buranov D.S., Yasunik S.N. Repair of bands and rolls of continuous casting machines / Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dal. Mechanical Engineering. – 2025. – № 4(5). – P. 42-46.

**Referenses**

1. Tselikov, A.I., & Zyuzin, V.I. (1988). Machines and Units of Metallurgical Plants (Vol. 4). Moscow: Metallurgiya. 432 p.
2. Tkachev, V.N. (2015). Surfacing in Equipment Repair. Welding Production, No. 3, pp. 24–28.
3. Livshits, L.S., & Grinberg, N.A. (1969). Fundamentals of Alloying of Deposited Metal. Moscow: Mashinostroenie. 188 p.
4. Smirnov, A.N., Pilyushenko, V.L., Minaev, A.A., & Prokopov, Yu.A. (2002). Continuous Casting Processes. Donetsk: DonNTU. 536 p.
5. GOST 4543-71. (2002). Rolled Products of Alloyed Structural Steel. Specifications. Moscow: Standards Publishing House. 12 p.
6. Mikheev, A.E., & Serebrovsky, V.A. (2019). Reclamation of Continuous Casting Machine Rolls by Electric Arc Surfacing. Repair, Reclamation, Modernization, No. 4, pp. 27–31.

*Статья поступила в редакцию 26.12.2025*

**Information about the authors**

**Buranov Dmitry Sergeevich**, 6th year student of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
**E-mail:** dimitry.buranov@gmail.com

**Yasunik Svetlana Nikolaevna**, Candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
**E-mail:** jsn7628620@mail.ru

---

## ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 621.43.042.3

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Васильев И. П., Антоненко Н. А.

### INCREASE IN EFFICIENCY OF USE OF ALTERNATIVE FUELS OF PLANT ORIGIN

Vasilyev I. P., Antonenko N. A.

**Аннотация.** Статья посвящена повышению эффективности использования альтернативных топлив растительного происхождения. Показано, что эффективность топлив зависит от места произрастания масличных культур: растения северных широт содержат больше насыщенных кислот, что улучшает процесс сгорания. Предложено использовать смеси растительных масел (рапсового, кукурузного, подсолнечного) с добавками скипидара. Рассмотрена возможность применения масличных культур, выращенных на почвах с отвалами терриконов, в качестве сырья для биодизеля. Приведены результаты экспериментальных исследований смесей на основе масла *Pongamia Pinnata*. Выполнена эксергетическая оценка эффективности сгорания смесей. Установлено, что добавка скипидара (до 20 %) позволяет снизить температуру вспышки и улучшить полноту сгорания. Определены пути повышения энергоэкологических показателей дизеля при работе на растительных топливах.

**Ключевые слова:** растительные масла, биодизель, скипидар, насыщенные кислоты, эксергетический анализ, эффективность сгорания.

**Abstract.** The article is devoted to increase in efficiency of use of alternative fuels of plant origin. It is shown that the efficiency of fuels depends on the place of growth of oilseeds: plants of northern latitudes contain more saturated acids, which improves the combustion process. The use of mixtures of vegetable oils (rapeseed, corn, sunflower) with turpentine additives is proposed. The possibility of using oilseeds grown on soils with waste heaps as a feedstock for biodiesel is considered. The results of experimental studies of mixtures based on *Pongamia Pinnata* oil are presented. An exergy assessment of the combustion efficiency of the mixtures is performed. It is found that the addition of turpentine (up to 20 %) reduces the flash point and improves the completeness of combustion. The ways of improving the energy and environmental performance of a diesel engine running on vegetable fuels are determined.

**Key words:** vegetable oils, biodiesel, turpentine, saturated acids, exergy analysis, combustion efficiency.

---

**Введение.** Повышение эффективности использования альтернативных топлив растительного происхождения является актуальной задачей в связи с исчерпанием запасов нефтяного топлива и ужесточением экологических норм [1, с. 210–215]. Растительные масла и биодизель на их основе обладают рядом преимуществ: возобновляемостью, биологической разлагаемостью, низким содержанием серы. Однако их применение в дизельных двигателях связано с повышенной вязкостью, высокой температурой вспышки и склонностью к коксованию форсунок [2, с. 45–50].

Известно, что химический состав растительных масел существенно зависит от климатической зоны произрастания. Культуры, выращенные в северных широтах, характеризуются повышенным содержанием насыщенных жирных кислот, что положительно влияет на цетановое число и полноту сгорания [3, с. 30–35]. Дополнительным резервом улучшения свойств является введение добавок, например скипидара (живичного терпентина), а также использование нетрадиционного сырья (масло *Pongamia Pinnata*, отходы переработки древесины).

Цель работы – экспериментально-теоретическое обоснование путей повышения эффективности использования растительных топлив в дизелях на основе комплексного энергоэксергетического подхода.

**Методика исследований.** В качестве объектов исследования выбраны:

- рапсовое масло (РМ), подсолнечное масло (ПМ), кукурузное масло (КМ);

- смеси указанных масел в пропорциях 1:1:1;  
 - масло *Pongamia Pinnata* (образец из Пакистана);  
 - скипидар живичный по ГОСТ 1571–82 [4];  
 - дизельное топливо (ДТ) для сравнения.

Эксперименты проводились на моторной установке на базе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (мощность 60 кВт). Оценивались: расход топлива, температура отработавших газов, температура вспышки (по ГОСТ 6356), цетановое число (расчётное), содержание вредных выбросов (СО, СН, NOx). Для смесей определялись плотность, кинематическая вязкость при 40 °С, теплота сгорания.

Для углублённой оценки энергетического совершенства процессов сгорания применён эксергетический анализ. Эксергия топлива рассчитывалась по формуле для жидких углеводородов [5, с. 12–15]:

$$E_{\text{топл}} = \xi \cdot Q_{\text{н}},$$

где  $\xi$  – коэффициент эксергии (для жидких топлив  $\xi \approx 1,04–1,07$ ),  $Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания.

Эксергетический КПД дизеля определялся как отношение эффективной работы к эксергии израсходованного топлива. Потери эксергии в камере сгорания оценивались через необратимость процесса смесеобразования и теплопередачи.

**Результаты и их анализ.** В табл. 1 приведены основные свойства исследованных топлив и смесей.

Таблица 1

**Физико-химические свойства растительных масел и смесей со скипидаром**

Показатель	ДТ	Рапсовое масло	Смесь РМ+ПМ+КМ (1:1:1)	Масло Pongamia	Смесь 80% РМ + 20% скипидара
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	835	915	908	925	890
Вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,5	35,2	32,8	38,1	12,4
Температура вспышки, °С	62	246	238	252	68
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,5	37,2	37,5	36,8	38,9
Цетановое число (расч.)	51	43	45	41	47

Добавка скипидара (20 %) к рапсовому маслу снижает вязкость более чем в 2,8 раза и температуру вспышки до уровня ДТ, что улучшает распыливание и воспламенение. При этом теплота сгорания возрастает на 4,6 % по сравнению с чистым рапсовым маслом.

На рис. 1 (условно) показано влияние содержания насыщенных кислот в масле на удельный эффективный расход топлива.

Образцы масел из северных регионов (содержание насыщенных кислот >12 %) обеспечивали снижение расхода на 4–6 % по сравнению с южными аналогами.

**Эксергетическая оценка.** Для номинального режима работы дизеля ( $n=2200$  мин<sup>-1</sup>,  $N_e=45$  кВт) проведён расчёт эксергетических потоков. Исходные данные и результаты сведены в табл. 2.

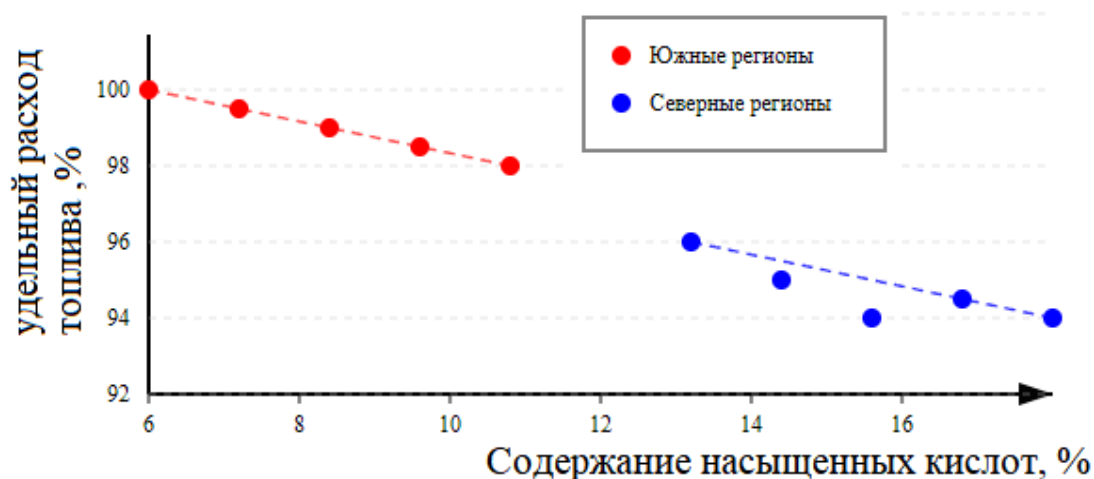


Рис. 1. Влияние содержания насыщенных кислот в растительном масле на удельный эффективный расход топлива дизеля

Таблица 2

**Эксергетический баланс дизеля при работе на разных топливах  
(доля от эксергии топлива, %)**

Статья баланса	ДТ	Рапсовое масло	Смесь РМ+20% скипидара
Эффективная работа (эксергия)	36,2	33,5	35,8
Потери эксергии с газами	24,5	27,1	25,2
Потери в системе охлаждения	21,3	22,4	21,7
Внутренние потери эксергии (необратимость сгорания)	12,0	14,0	12,5
Прочие потери	6,0	3,0	4,8

Эксергетический КПД на смеси со скипидаром (35,8 %) практически достигает уровня ДТ (36,2 %) и на 2,3 % выше, чем на чистом рапсовом масле. Внутренние потери эксергии снижаются за счёт улучшения смесеобразования и более полного сгорания.

**Использование масличных культур с терриконов.** Проведённые ранее исследования [6, с. 161–165] показали, что выращивание рапса на почвах, удобренных отвалами терриконов (содержащих тяжёлые металлы), приводит к накоплению металлов в масле. Такое масло непригодно для пищевых целей, но может быть использовано для производства биодизеля. В наших экспериментах биодизель из «терриконного» рапса имел аналогичные энергетические показатели, но несколько повышенное содержание золы (0,03 % против 0,01 %). При этом вредные выбросы (NO<sub>x</sub>, CO) не превышали значений для обычного биодизеля.

**Выводы.** 1. Эффективность растительных топлив зависит от содержания насыщенных кислот, которое можно повышать селекцией и выбором северных регионов выращивания.

2. Добавка скипидара (10–20 %) к растительным маслам улучшает вязкостно-температурные характеристики, снижает

температуру вспышки и повышает эксергетический КПД дизеля на 2–3 %.

3. Эксергетический анализ является более информативным методом оценки качества растительных топлив по сравнению с традиционным энергетическим балансом, так как выявляет внутренние потери от необратимости сгорания.

4. Масличные культуры, выращенные на почвах с терриконов, могут служить сырьём для производства биодизеля без риска для пищевой безопасности.

5. Для дальнейшего повышения эффективности необходима адаптация дизелей под растительные топлива (изменение угла опережения впрыска, повышение давления впрыска) и разработка новых стандартов на биотоплива.

#### Список источников

1. Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. Теплотехника. – М.: Высшая школа, 2005. – 671 с.
2. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля: монография. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. – 240 с.
3. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
4. ГОСТ 1571–82. Скипидар живичный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 13 с.

5. Кудрявцев В.М., Рябов Г.А., Тумановский А.Г. Эксергетический анализ теплоэнергетических установок. – М.: МЭИ, 2008. – 64 с.

6. Олейник Н.В., Зубова Л.Г., Васильев И.П. Влияние содержания тяжелых металлов в топливах растительного происхождения на вредные выбросы с отработавшими газами дизелей // Вістник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. – 2007. – ч. 1. – № 8 (114). – С. 161-165.

7. Bannikov M.G., Vasilev I.P. Combustion Characteristics of the Mustard Methyl Esters // Key Engineering Materials. – 2012. – Vols. 510-511. – P. 406-412.

8. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. – New York: Hemisphere, 1988. – 332 p.

9. Петренко А.Е., Корчанова Ю.А., Васильев И.П. Анализ свойств топливных смесей с добавками подсолнечного масла для применения в дизельных двигателях // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. – 2001. – № 10 (22). – С. 120-124.

10. Андриевская А. Энергетические растения как альтернативный вид топлива // Нефть и газ. – 2000. – № 7(25). – С. 82-84.

### References

1. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiyan A.S. Thermotechnics. – Moscow: Vysshaya shkola, 2005. – 671 p.

2. Vasilyev I.P. The Influence of Vegetable Fuels on the Environmental and Economic

Performance of Diesel Engines: A Monograph. – Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalya, 2009. – 240 p.

3. Brodyanskiy V.M. The exergetic method and its applications. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 296 p.

4. GOST 1571–82. Turpentine. Technical Specifications. – Moscow: Izd-vo standartov, 1990. – 13 p.

5. Kudryavtsev V.M., Ryabov G.A., Tumanovskiy A.G. Exergy analysis of thermal power plants. – Moscow: MEI, 2008. – 64 p.

6. Oleynik N.V., Zubova L.G., Vasilyev I.P. The effect of heavy metal content in vegetable-based fuels on harmful emissions from diesel exhaust // Visnyk Skhidnoukr. nats. un-tu imeni Volodymyra Dalya. – 2007. – ch. 1. – № 8 (114). – P. 161-165.

7. Bannikov M.G., Vasilev I.P. Combustion Characteristics of the Mustard Methyl Esters // Key Engineering Materials. – 2012. – Vols. 510-511. – P. 406-412.

8. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. – New York: Hemisphere, 1988. – 332 p.

9. Petrenko A.E., Korchanova Yu.A., Vasilyev I.P. Analysis of the properties of fuel mixtures with sunflower oil additives for use in diesel engines // Zbirnyk naukovykh prats' Luhanskoho derzhavnoho aharnoho universytetu. – 2001. – № 10 (22). – P. 120-124.

10. Andriyevskaya A. Energy Plants as an Alternative Fuel Source // Neft' i gaz. – 2000. – № 7(25). – P. 82-84.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025 г.*

### Информация об авторах

**Васильев Игорь Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля».

**Антоненко Наталья Анатольевна**, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля».

**E-mail:** 280376@rambler.ru

### Information about the authors

**Vasilyev Igor Pavlovich**, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**Antonenko Natalya Anatolyevna**, senior lecturer of the «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**E-mail:** 280376@rambler.ru

---

**Для цитирования:**

Васильев И.П., Антоненко Н.А. Повышение эффективности использования альтернативных топлив растительного происхождения // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 4 (5). – С. 47-52.

**For citation:**

Vasiliev I.P., Antonenko N.A. Increase in efficiency of use of alternative fuels of plant origin // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 4 (5). – P. 47-52.

---

УДК 629.424

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Насонов М. Г., Корженевская М. В., Панфилов А. М.

## ON THE POSSIBILITY OF USING GAS DIESEL ENGINES IN AGRICULTURE

Nasanov M. G., Korzhenevskaya M. V., Panfilov A. M.

***Аннотация.** В настоящее время в сельском хозяйстве работают автомобили на дизельном топливе. Во время работы транспортных средств происходит загрязнение окружающей среды за счет выброса вредных веществ, а также возникают большие расходы на топливо. Решением данной проблемы может стать применение на транспортных средствах газодизельных двигателей.*

***Ключевые слова:** газодизельные двигатели, расход топлива, дизельный двигатель, автомобиль, сельско-хозяйственная промышленность, загрязняющие вещества, экономический эффект, экология.*

***Abstract.** Currently, agricultural vehicles use diesel fuel. These vehicles pollute the environment through harmful emissions and incur high fuel costs. The use of gas-diesel engines in vehicles could be a solution to this problem.*

***Key words:** gas-diesel engines, fuel consumption, diesel engine, automobile, agricultural industry, pollutants, economic impact, ecology.*

---

**Введение.** Индустриализация, усиливающаяся конкуренция на глобальных рынках и развитие автомобильной отрасли приводит к росту потребности в перевозках, что сопровождается негативным воздействием на окружающую среду и приводит к изменению климата [1,2] В связи с этим, человечеству необходимо найти умные решения для обеспечения комфортных условий жизни и ежедневной деятельности. Бурное развитие техники и технологий, направленных на поиск оптимальных устойчивых решений, а также проникновение интернета в жизнь каждого

человека привело к четвертой промышленной революции [3,4].

**Основная часть.** К основным направлениям повышения экологического уровня дизельных двигателей по количеству выбрасываемых токсичных веществ до уровня требований Euro5 в Европейском союзе можно считать метод рециркуляции части выхлопных газов после их очистки и охлаждения с целью дальнейшего использования в ДВС, реализованный на двигателях фирмы «Scania».

Газодизельная система представляет собой газожидкостный двигатель, работающий на газо-воздушной смеси,

которая поджигается при впрыскивании в цилиндр жидкостного топлива в конце хода сжатия.

Иными словами, это адаптированный дизельный двигатель, который использует газ и небольшое количество дизельного топлива. Метан и пропан – углеводородные газы, применяемые в газодизельных двигателях, доступны по цене, что позволяет значительно сократить расходы. В то же время мотор способен работать на

дизельном топливе, если газ заканчивается. [1,2,3,4,5].

Анализ показывает, что:

- при малых нагрузках газодизель работает как чистый дизель на 100% жидкого топлива;

- при средних нагрузках газодизель работает на 40% жидкого топлива и на 60% газового топлива;

- на максимальных нагрузках газодизель работает на 17% жидкого топлива и на 83% газового топлива.

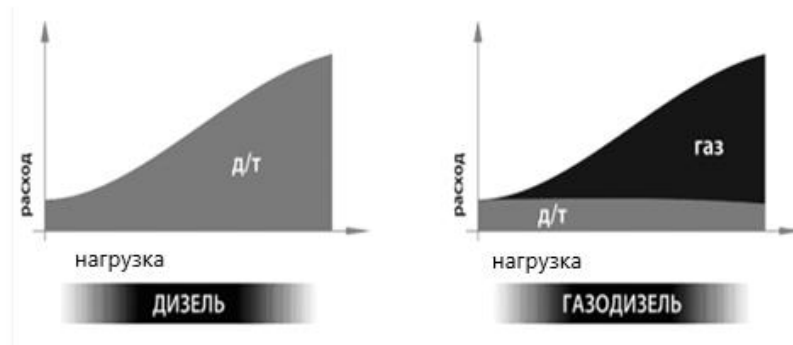


Рис. 1. Зависимость расхода топлива от загрузки автотранспорта для различных видов топлива



Рис. 2. Расположение баллонов с газом на автомобиле МАЗ-551605-271 (газодизельная система)

На рис. 2 представлен вид расположения газовых баллонов на главной раме автомобиля между кабиной и кузовом для груза.

При совместной работе на газе дизтопливо будет расходоваться лишь для зажигания.

При этом газодизель обладает рядом преимуществ:

1. Экономия расходов топлива и смазочных материалов.

2. Крутящий момент увеличивается на высоких оборотах.

3. Выхлопные газы становятся менее токсичными, исчезает черный дым; дизельное топливо в таком моторе полностью сгорает, так что в выхлопе остается безвредный метан.

4. Двигатель работает тише и мягче.

5. Уменьшение количества отложений на деталях двигателя увеличивает срок его службы.

6. Масло реже нуждается в замене.

7. Переоборудование дизельного двигателя в газодизельный двигатель не требует много времени и усилий.

На рис.3 представлена внешняя скоростная характеристика газодизеля типа ЯМЗ-238ДЕ в виде зависимости мощности, крутящего момента и удельного эффективного расхода жидкого и газового топлива от частоты вращения вала.

Переоборудование дизельного двигателя осуществляется за счет установки газобаллонного оборудования и доводки топливной системы.

Стоимость газобаллонного оборудования быстро окупается для транспорта с большим годовым пробегом. В связи с постоянным ростом цен на дизтопливо, переоборудование на газодизельную систему становится все актуальнее.

Газодизельные системы просты в монтаже и подходят для всех типов двигателей. При этом перейти к обычному дизельному режиму можно нажатием одной кнопки в салоне автомобиля.

Газодизель позволяет сократить количество дизтоплива до 50% при использовании метана и до 30% при работе на пропане.

Оснащение транспорта газодизельными двигателями и оборудование устройствами рециркуляции части выхлопных газов позволит значительно повысить

экономичность, особенно в зимних условиях эксплуатации, за счет дополнительного подогрева газопаровоздушной смеси и улучшения качества сгорания рабочей смеси и снижения количества выбрасываемых токсичных веществ и повышения экологической безопасности перевозок грузов в промышленности и пассажиров в городских условиях.

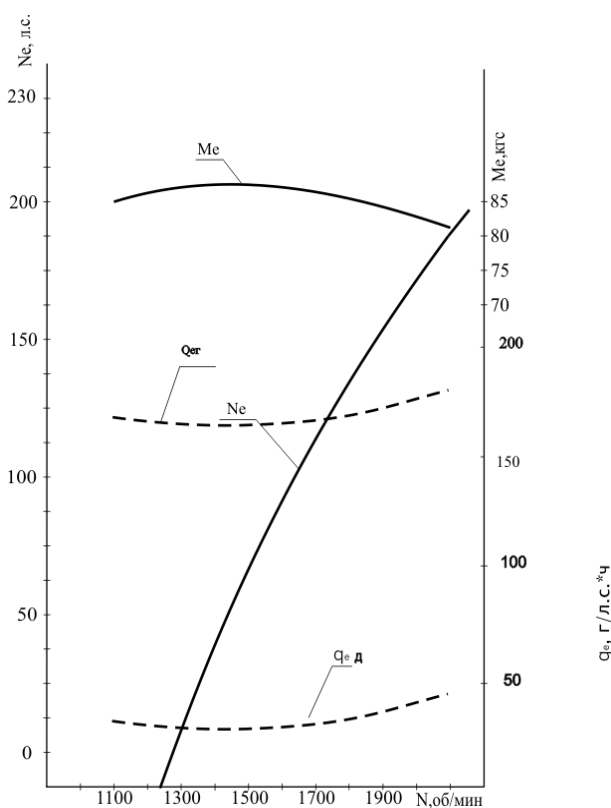


Рис. 3. Внешняя скоростная характеристика газодизеля ЯМЗ-238ДЕ

В свое время на сельскохозяйственных предприятиях для вывоза зерна на расстояние более 5 км был принят автомобильный транспорт типа МАЗ-551605-271. Объем полученного зерна составлял 538 тыс т в год.

При обосновании внедрения газодизельных автомобилей были выполнены расчеты расхода топлива и затраты на топливо дизельного двигателя и

газодизельного на расстояние 5,6 км для доставки зерна с поля до элеватора по представленной ниже методике [4].

Определяем расход топлива на один рейс в груженом направлении:

$$V_r = \sum \frac{li \cdot Vi}{100},$$

$$V_r = \frac{5,6 \cdot 28,1}{100} = 1,57 \text{ л.}$$

В обратном направлении:

$$V_{oo} = \frac{V_r \cdot G_a}{G_r}$$

$$V_{oo} = \frac{5,6 \cdot 28,1 \cdot 8,8}{100 \cdot 19} = 0,72 \text{ л}$$

Определяем расход топлива на один оборот:

$$V_{об} = V_r + V_{oo} + Z_T,$$

$$V_{об} = 1,57 + 0,72 + 0,25 = 2,54 \text{ л/об.}$$

На перевозку 200 тонн потребуется топлива:

$$V_{\Sigma} = \frac{200 \cdot V_{об}}{10},$$

$$V_{\Sigma} = \frac{200 \cdot 2,54}{10} = 50,8 \text{ л}$$

Определяем затраты на дизельное топливо в груженом направлении:

$$Z_{дт} = V_{\Sigma} \cdot C_{дт} = 50,8 \cdot 77 = 3912 \text{ руб.}$$

Для газодизеля на подъеме потребляется 30% дизельного топлива и 70% газа. На горизонтальной поверхности 50% дизельного топлива и 50% газа. Принимаем, что теплотворная способность

1 л дизельного топлива равна теплотворной способности 1 м<sup>3</sup> метана.

Оценка расхода топлива на перевозку 200 тонн зерна может быть выполнена по известным методикам расчета для автомобильного транспорта.

При движении на подъем расход составил 3,78 литров дизельного топлива и 9,54 метров кубических метана. На горизонтальной поверхности составил 14 литров дизельного топлива и 14 метров кубических метана. На поле составил 0,84 литра дизельного топлива и 0,84 метра куб. метана.

Требуемая мощность двигателя в обратном направлении рассчитывается по формулам:

$$N^*_o = \frac{M_e^* \cdot n}{716,2};$$

$$N^*_o = \frac{15,2 \cdot 2600}{716,2} = 55 \text{ л.с.}$$

$$G^*_o = \frac{178 \cdot 55}{3,6 \cdot 8,8 \cdot 19,4} = 15,9 \text{ г/ткм}$$

Расчетный расход топлива автомобилем при движении в обратном направлении определится по формулам:

$$V^*_o = \frac{G^*_o \cdot 100 \cdot G_a}{1000};$$

$$V^*_o = \frac{15,9^* \cdot 100 \cdot 8,8}{1000} = 14 \text{ л}$$

Для газодизеля в обратном порожнем направлении потребность будет составлять 60% дизельного топлива и 40% газа.

На 100 километров потребуется 8,4 литра дизельного топлива и 5,6 метров куб. метана.

$$Z_{об} = 27,02 \cdot 77,57 + 29,98 \cdot 32 = 3040 \text{ руб.}$$

Как показывает проведенные исследования в области борьбы с твердыми отходами в промышленности и быту представляется целесообразным не закапывать их в землю вокруг городов, а использовать для получения моторного синтетического газового топлива и применять в газодизельных автомобилях [6,7,8].

**Выводы.** Внедрение газодизельных автомобилей для доставки зерна с поля до элеватора позволяет уменьшить затраты на 862 руб по сравнению с дизельными автомобилями.

#### Список источников

1. Губачева Л.А., Чижевская Д.Ю., Макарова И.В., Андреев А.А. Технологии рационального природопользования на транспорте // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2020. – т.1. – №5. – С. 123-129.

2. Белоусов Е. В. Использование твердых топлив в двигателях внутреннего сгорания // Проблемы создания новых машин и технологий: Научн. труды КГПИ. №1(8). – Кременчуг: изд.-во КГПИ, 2000. – С. 420-422.

3. Гуськов В.Ф., Сухов С.П., Козлов С.А. Результаты исследования цикла двигателя, работающего на генераторном газе // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 27-28; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30344>.

4. Parikh, P.P., Bhave A.G., Kapse D.V., Karinka S. Study of Thermal and Emission Performance of Small Gasifier Dual Fuel Engine System. Biomass, 1989. – pp. 75–97.

5. Шишулькин С.Ю., Буянтуев С.Л., Старинский И.В. Газификация древесины с последующей выработкой электрической энергии // Вестник БГУ. Химия. Физика. – 2017. – № 2-3. – С. 75-81.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazifikatsiya-drevesiny-s-posleduyuschei-vyrabotkoi-elektricheskoi-energii>.

6. Нечаев Г.И., Мирошников В.В., Захарчук А.С., Чижевская, Д.Ю. Автоматизированная система питания для автомобилей марки ГАЗ // Вестник Луганского государственного университета им. В. Даля. – 2021. – № 11 (53). – С. 225-235.

7. Губачева Л.А., Шевченко, Д.Ю. О генераторном газе, полученном из пеллетного топлива в автомобильном газогенераторе. // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. – 2017. – № 2 (4). – Ч.2. – С. 73 – 79.

8. Нечаев Г.И., Чижевская Д.Ю., Никитин Ю.Н., Будиков Л.Я. Совершенствование газогенератора, вырабатывающего газообразное топливо для ДВС // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2022. – №7(61). – С. 111-116.

#### References

1. Gubacheva L.A., Chizhevskaya D.Yu., Makarova I.V., Andreev A.A. Technologies of rational nature management in transport // Ecology. Economics. Informatics. Series: Systems analysis and modeling of economic and ecological systems. - 2020. - Vol. 1. -No. 5. - Pp. 123-129.

2. Belousov E.V. Use of solid fuels in internal combustion engines // Problems of creating new machines and technologies: Scientific works of KSPI. No. 1 (8). – Kremenchug: KSPI publishing house, 2000. – Pp. 420-422.

3. Guskov V.F., Sukhov S.P., Kozlov S.A. Results of the study of the engine cycle running on generator gas // Advances in modern natural science. – 2012. – No. 6. – P. 27-28; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30344>.

4. Parikh, P.P., Bhave A.G., Kapse D.V., Karinka S. Study of Thermal and Emission Performance of Small Gasifier Dual Fuel Engine System. Biomass, 1989. – pp. 75–97.

5. Shishulkin S.Yu., Buyantuev S.L., Starinsky I.V. Wood gasification with subsequent generation of electrical energy // Bulletin of BSU. Chemistry. Physics. – 2017. – No. 2-3. – P. 75-81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gazifikatsiya-drevesiny-s-posleduyuschei-vyrabotkoi-elektricheskoi-energii>.

6. Nechaev G.I., Miroshnikov V.V., Zakharchuk A.S., Chizhevskaya D.Yu. Automated fuel system for GAZ vehicles // Bulletin of V. Dahl Luhansk

National University. - 2021. - No. 11 (53). – P. 225-235.

7. Gubacheva L.A., Shevchenko D.Yu. On generator gas obtained from pellet fuel in an automobile gas generator. // Bulletin of V. Dahl Luhansk National University. – 2017. – No. 2 (4). – Part 2. – P. 73 – 79.

#### **Информация об авторах**

**Насонов Максим Геннадьевич**, студент группы ТЛз-341м, кафедры автомобильного транспорта, Институт транспорта и логистики, Луганского государственного университета имени Владимира Даля».

**Корженевская Мария Викторовна**, ассистент кафедры автомобильного транспорта, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля».

**Панфилов Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля».  
**E-mail:** privoz51a@mail.ru

8. Nechaev G.I., Chizhevskaya D.Yu., Nikitin Yu.N., Budikov L.Ya. Improvement of a gas generator producing gaseous fuel for internal combustion engines // Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University. – 2022. – No. 7 (61). – P. 111-116.

*Статья поступила в редакцию 22.01.2026*

#### **Information about the authors**

**Nasonov Maxim Gennadievich**, student of the group TLz-341m, Department of Road Transport, Institute of Transport and Logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**Korzhenevskaya Maria Viktorovna**, assistant of the Department of Road Transport, Institute of Transport and Logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**Panfilov Alexander Mikhailovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Road Transport, Institute of Transport and Logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
**E-mail:** privoz51a@mail.ru

---

#### **Для цитирования:**

Насонов М.Г., Корженевская М.В., Панфилов А.М. О возможности применения газодизелей в сельском хозяйстве // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – №4 (5). – С. 53-58.

#### **For citation:**

Nasanov M.G., Korzhenevskaya M.V., Panfilov A.M. On the possibility of using gas diesel engines in agriculture// Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2025. – № 4(5). – P. 53-58.

---

**ВЕСТНИК ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ  
Машиностроение  
№ 4 (5) 2025**

Лит.редактор

*Минина Я.В.*

*Рудник Ю.В.*

*Паталахтна Е.А.*

Технический редактор

*Коломиец-Кириллова Е.А.*

---

Подписано в печати 12.03.2026.  
Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times.  
Условных печатных стр. 10,4. Тираж 100 экз. Изд. № 01575.

---

**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/**