

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

4(81) 2023

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>ЖИГАЛОВ А. Н., ГОРАВСКИЙ И. А.</b> Технологическое обеспечение ресурса концевых фрезерных инструментов из стали Р6М5.....	5
<b>КУЗМЕНКО И. М., КУЗМЕНКО Д. О., ФРИДКИН В. М., АНТОНОВА М. А.</b> Конструктивные решения стержневых несущих элементов с комбинированными сварными соединениями для металлических пролетных строений.....	14
<b>МАЛЫШКИН П. Ю., КАРТАШЕВИЧ А. Н.</b> Экономическая эффективность применения сжиженного углеводородного газа для питания дизеля.....	25
<b>МИРОНОВА М. Н., АНТОНОВА Е. Н.</b> Исследования обработки поверхностей отверстий пневмоцентробежными раскатниками на основе использования функциональных семантических сетей.....	32
<b>ПРУДНИКОВ А. П., МОРГАЛИК Б. М.</b> Мониторинг состояния и диагностика подшипников качения.....	41
<b>РЫНКЕВИЧ С. А.</b> Система бортового диагностирования и мониторинга гидромеханической передачи автосамосвала.....	53

<b>СВИРЕПА Д. М., ТАРАДЕЙКО М. В., ТАРАДЕЙКО И. А.</b> Математическое моделирование процесса совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем.....	61
--	----

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>БОРИСОВ В. И., СЕРГЕЕВ С. С., ПРОКОПЕНКО Е. Н.</b> Акустическое поле излучения пьезоэлектрического преобразователя с линзой Френеля.....	70
--	----

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>КАПИТОНОВ О. А., ТРЕТЬЯКОВ А. С., ЛЕНЕВСКИЙ Г. С.</b> Уточненная методика построения наблюдателя скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя.....	76
--	----

<b>ТРЕТЬЯКОВ А. С., КАПИТОНОВ О. А., ЛЕНЕВСКИЙ Г. С.</b> Предварительная идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя.....	84
---	----

### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>МАКАРЕВИЧ О. Д., БОРОДИЧ Т. А.</b> Аналитический обзор результатов развития промышленного комплекса Республики Беларусь и оценка промышленного потенциала Могилевской области.....	93
---	----

<b>РОМАНЬКОВА Т. В.</b> Показатели мониторинга результатов работы городского пассажирского транспорта.....	103
--	-----

<b>ШАДРАКОВ А. В.</b> Механизмы перехода к циркулярной экономике на региональном и местном уровнях.....	111
---	-----

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>ZHIGALOV A. N., GORAVSKY I. A.</b> Technological support of the life cycle of end milling tools made of R5M5 steel.....	5
<b>KUZMENKO I. M., KUZMENKO D. O., FRIDKIN V. M., ANTONOVA M. A.</b> Structural solutions of rod load-bearing elements with combined welded joints for metal superstructures.....	14
<b>MALYSHKIN P. Y., KARTASHEVICH A. N.</b> Cost-effectiveness of applying liquefied hydrocarbon gas for diesel engine power supply.....	25
<b>MIRONOVA M. N., ANTONOVA E. N.</b> Research on surface treatment of holes using pneumatic centrifugal rollers with application of functional semantic networks.....	32
<b>PRUDNIKOV A. P., MORGALIK B. M.</b> Condition monitoring and diagnostics of rolling bearings.....	41
<b>RYNKEVICH S. A.</b> System for on-board diagnostics and monitoring of dump truck hydromechanical transmission.....	53
<b>SVIREPA D. M., TARADEIKO M. V., TARAD EIKO I. A.</b> Mathematical modeling of combined processing of external surfaces of rotation by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field.....	61

### INSTRUMENT MAKING

<b>BORISOV V. I., SERGEEV S. S., PROKOPENKO E. N.</b> Acoustic radiation field of a piezoelectric transducer with a Fresnel lens.....	70
---	----

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KAPITONOV O. A., TRETIAKOV A. S., LENEVSKY G. S.</b> A refined method for constructing an observer for rotational speed of an asynchronous motor rotor.....	76
<b>TRETIAKOV A. S., KAPITONOV O. A., LENEVSKIY G. S.</b> Preliminary identification of induction motor substitution scheme parameters.....	84

### ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

<b>MAKAREVICH O. D., BORODICH T. A.</b> An analytical review of the results of Belarusian industrial complex development and assessment of industrial potential of the Mogilev region.....	93
--	----

<b>ROMANKOVA T. V.</b> Indicators for monitoring performance of urban passenger transportation.....	103
<b>SHADRAKOU A. V.</b> Mechanisms of transition to circular economy at regional and local levels.....	111

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_5

УДК 621.923

**А. Н. ЖИГАЛОВ**<sup>1,2</sup>, *д-р техн. наук, доц.*

**И. А. ГОРАВСКИЙ**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

<sup>3</sup>Барановичский государственный университет (Барановичи, Беларусь)

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ СТАЛИ Р6М5

#### Аннотация

Установлено, что при обработке инструментом с аэродинамическим звуковым упрочнением (АДУ) на оптимальных технологических режимах резания обеспечивается увеличенный в 1,8 раза ресурс инструмента в отличие от обработки аналогичным инструментом без упрочнения. Наряду с повышением ресурса упрочненного инструмента одновременно обеспечивается и увеличение производительности обработки на 7,5 %.

#### Ключевые слова:

концевой фрезерный инструмент из стали Р6М5, метод аэродинамического звукового упрочнения, износ, ресурс.

#### Для цитирования:

Жигалов, А. Н. Технологическое обеспечение ресурса концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 5–13.

#### Введение

Около 60 % механической обработки деталей машин связано с процессами прерывистого резания. При таких процессах возникают явления удара при врезании зуба инструмента в материал и при выходе из материала, циклические воздействия температуры на инструмент при входе и выходе его из заготовки, охлаждении инструмента при холодных ходах. Эти явления усугубляются из-за малых диаметров инструмента, в результате чего режущие зубья инструмента скалываются и ресурс такого инструмента является невысоким. Типичным представителем инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, является концевой фре-

зерный инструмент (концевые, шпоночные и другие фрезы). Концевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей широко применяется в современном машиностроении для обработки различных пазов, уступов, шпоночных канавок и других поверхностей деталей машин. Наиболее распространен инструмент из быстрорежущей стали Р6М5, потребление которого достигает 80 % от всего объема выпуска быстрорежущей стали.

Концевой фрезерный инструмент из стали Р6М5 обладает низкой ударной вязкостью, равной 27...48 кДж/м<sup>2</sup>, при высокой твердости 63...65 HRC, что не позволяет осуществлять эффективную обработку при процессах прерывистого резания. Концевой фрезерный ин-

струмент имеет пониженный в 1,6–2 раза период стойкости в сравнении с другими видами фрез (цилиндрическими, дисковыми и др.). Противостоять этому возможно путем совершенствования структуры инструмента методами упрочнения, такими как ионно-плазменная обработка, цементация, ионно-катодное распыление, электроискровое легирование, магнитно-импульсное упрочнение, криогенная обработка и др.

Наиболее перспективным в научном и эффективным в прикладном плане является метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий при сохранении исходной твердости обеспечивать повышение ударной вязкости сплавов и за счет этого повышать ресурс металлорежущего инструмента, работающего при прерывистых процессах резания.

Метод АДУ заключается в предварительном нагреве изделия до температуры хладостойкости и затем воздействии на него энергией от резонансных волн звуковой частоты [1]. Однако метод АДУ не приспособлен для концевых фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей, т. к. не исследован для такого рода инструмента, отсутствуют рекомендации по его техническому применению.

Повышение эффективности работы концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали связано с увеличением качества и количества обработанных деталей при минимальной добавочной стоимости, с заданными параметрами точности, шероховатости и режимами резания. Согласно ГОСТ 25751–83 под ресурсом режущего инструмента (лезвия) следует понимать наработку режущего инструмента (лезвия) от начала резания новым инструментом (лезвием) до достижения им предельного состояния, под которым подразумевается состояние режущего инструмента (лезвия), характеризующее невозможностью или нецелесообразностью его восстановления.

Для эффективного применения концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ, необходимо знать оптимальные режимы резания, позволяющие достигать наибольший ресурс такого инструмента. На ресурс инструмента наибольшее влияние оказывает износ режущих лезвий зубьев фрез. При фрезеровании изнашиванию подвергаются задние поверхности главных лезвий на цилиндрической части и вспомогательных лезвий на торцевой части зубьев фрез. Наиболее интенсивному изнашиванию подвергаются главные лезвия, в связи с чем измерение износа ведется по значению износа на задней поверхности  $h_3$  главных лезвий режущих зубьев. На ресурс, в свою очередь, огромное влияние оказывают такие режимы резания, как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$  [2].

### Основная часть

Для установления эффективности резания концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного методом АДУ, были проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурса концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного и с АДУ, от комплексного влияния трех режимов резания (скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$ , глубины резания  $t$ ). Проводились семь опытов при вариации максимальных и минимальных значений исследуемых режимов резания ( $v, s, t$ ) по [3].

Математическое описание количественной оценки величины износа режущего лезвия по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  описывалось в виде степенной функции [4]:

$$h_3 = a \cdot L^n, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий абсолютную величину износа от времени;  $n$  – коэффициент, представляющий собой показатель интенсивности износа.

Коэффициенты  $a$  и  $n$  определялись от прологарифмированной функции (1) в виде

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{z_i} - h_{z_1}}{L_i - L_1}; \quad (2)$$

$$a_u = \frac{h_{z_i}}{2L_i^n} + \frac{h_{z_1}}{2L_1^n}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол подъема кривой износа от пути резания;  $h_{z_i}$ ,  $h_{z_1}$  – значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно;  $L_i$ ,  $L_1$  – значения пути в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно.

По результатам замеров из экспериментальных опытов строились графики изменения износа  $h_z$  от пути резания  $L$  в абсолютной и логарифмической системах [5]. На графиках в логарифмической системе замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии, и соответствующие им значения на графиках в абсолютной системе.

Затем определялись показатели  $a$  и  $n$  по зависимостям (2) и (3) при уровнях варьирования факторов (нижний, основной, верхний) через системы уравнений в виде квадратичных функций, которые решались посредством представления зависимостей износа от однофакторных и многофакторных параметров резания ( $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ ) в виде также квадратичных функций, для которых определялись коэффициенты в центре плана. Графики износа в абсолютных и логарифмических системах координат приведены в [5].

Далее были произведены расчеты и получены значения стойкости  $T$

концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5:

– без упрочнения

$$T_H = -166v^2 + 5451v - 10463787s_z^2 + 932316s_z - 2531t^2 + 4896t - 58886; \quad (4)$$

– с АДУ

$$T_Y = -195v^2 + 6483v - 9680439s_z^2 + 1032595,4s_z - 2763t^2 + 3906t - 66435. \quad (5)$$

Ресурс  $T_p$  инструмента от стойкости определялся по зависимости [6]

$$T_p = 10^{-3} v s_z T. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) зависимости ресурса  $T_p$  для фрез из Р6М5 без и с АДУ следующие:

$$T_{pH} = 10^{-3} v s_z (-166v^2 + 5451v - 10463787s_z^2 + 932316s_z - 2531t^2 + 4896t - 58886); \quad (7)$$

$$T_{pY} = 10^{-3} v s_z (-195v^2 + 6483v - 9680439s_z^2 + 1032595s_z - 2763t^2 + 3906t - 66435). \quad (8)$$

Анализ зависимостей (7) и (8) позволил установить, что комбинация режимов резания для концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ, оказывает на 15 % большее влияние на величину износа по сравнению с неупрочненным инструментом.

В результате математического моделирования зависимостей (7) и (8) от режимов резания установлено, что наибольшее влияние на ресурс фрез из Р6М5 с АДУ оказывает скорость резания

(87 %), затем подача на зуб (12 %), глубина резания оказывает незначительное влияние (1 %) в отличие от инструмента без упрочнения, для которого влияние скорости резания – 19,6 %, подачи на зуб – 78 %, глубины резания – 2,4 %, что надо учитывать при назначении режимов резания.

Предложены принципы оптимизационного управления при назначении режимов обработки концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым воздействием, – необходимо работать на повышенных скоростях резания и подачах на зуб.

На рис. 1 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса

концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного  $T_{рн}$  (7) и упрочненного АДУ  $T_{ру}$  (8), при обработке стали 45 от одного из параметров, таких как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$ .

На рис. 2 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного  $T_{рн}$  (7) и упрочненного АДУ  $T_{ру}$  (8), при обработке стали 45 от двух технологических параметров, таких как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$ , при постоянном значении третьего.

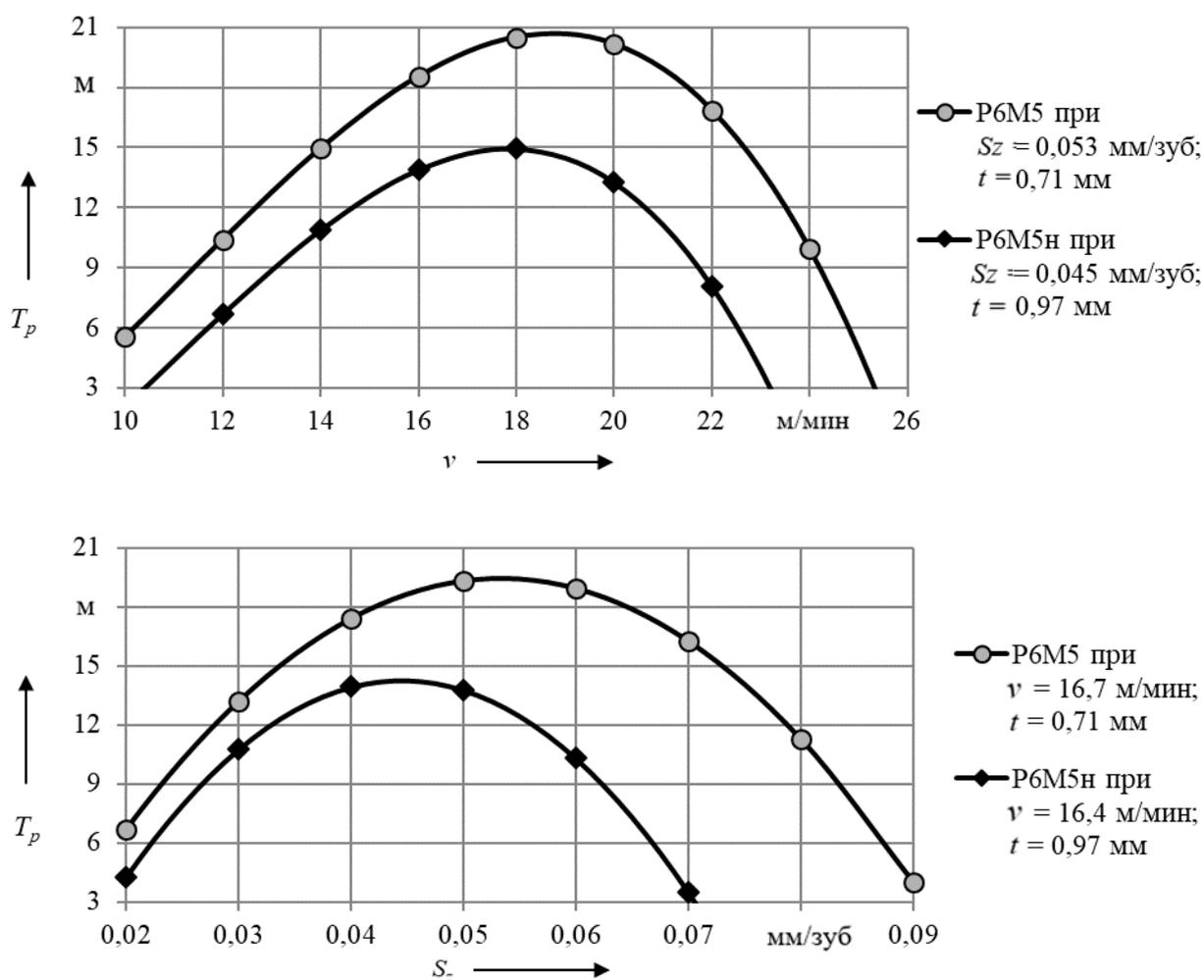
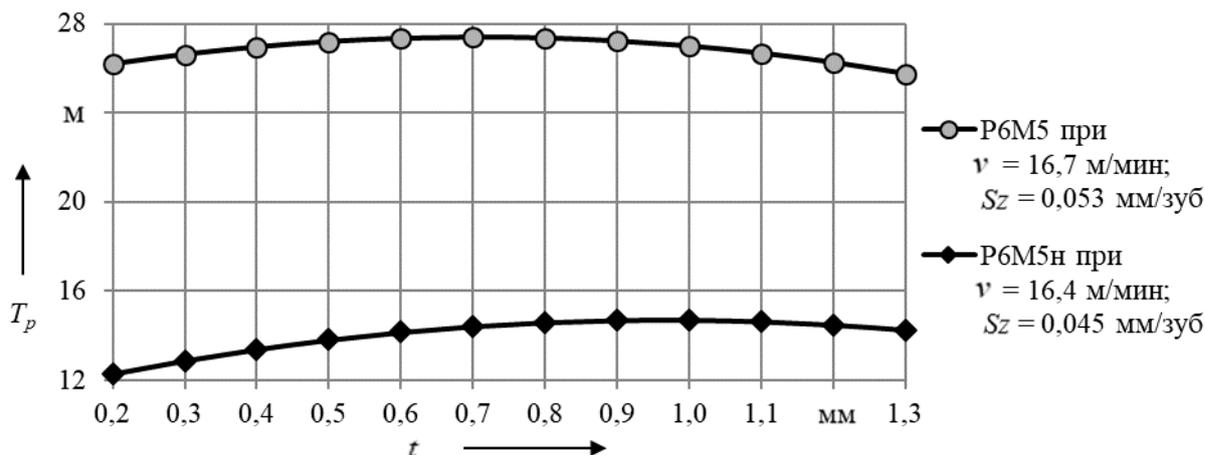


Рис. 1. Зависимости ресурса  $T_p$  фрез  $\varnothing 8$  Р6М5 без и с АДУ при фрезеровании стали 45 от скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$  и глубины резания  $t$



Окончание рис. 1

Оптимальные значения режимов резания определялись путем компьютерного моделирования полученных зависимостей ресурса инструмента (7) и (8). Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях неприемлема в связи с достаточно высокой степенью взаим-

ного влияния исследуемых параметров.

Оптимальные значения скорости резания, подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечивается максимальный ресурс концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 без и с АДУ, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Оптимальные технологические режимы резания при фрезеровании стали 45 фрезами P6M5 без и с АДУ, обеспечивающие наибольшую производительность и ресурс концевой фрезерного инструмента из P6M5

Технологический режим резания	Обработка фрезой P6M5		Рост, %
	без	с АДУ	
Скорость резания $v_{opt}$ , м/мин	16,4	17,3	+6
Подача на зуб $s_{zopt}$ , мм/зуб	0,045	0,053	+18
Глубина резания $t_{opt}$ , мм	0,97	0,71	-26
Производительность $\Pi_{opt}$ , см <sup>3</sup> /мин	0,97	0,71	-26
Ресурс $T_p$ , м	8,972	16,4	+80

Для концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 после АДУ с целью повышения ресурса инструмента необходимо повышать скорости резания на 6 %, подачу на зуб на 18 % по сравнению с неупрочненным инструментом. Исходя из чего установлено, что при фрезеровании стали 45

концевыми фрезами из быстрорежущей стали P6M5, упрочненных АДУ, на оптимальных режимах резания одновременно с увеличением ресурса инструмента в 1,8 раза повышается и производительность обработки на 7,5 % за счет увеличения скорости резания на 6 % и подачи на зуб на 18 %.

а)

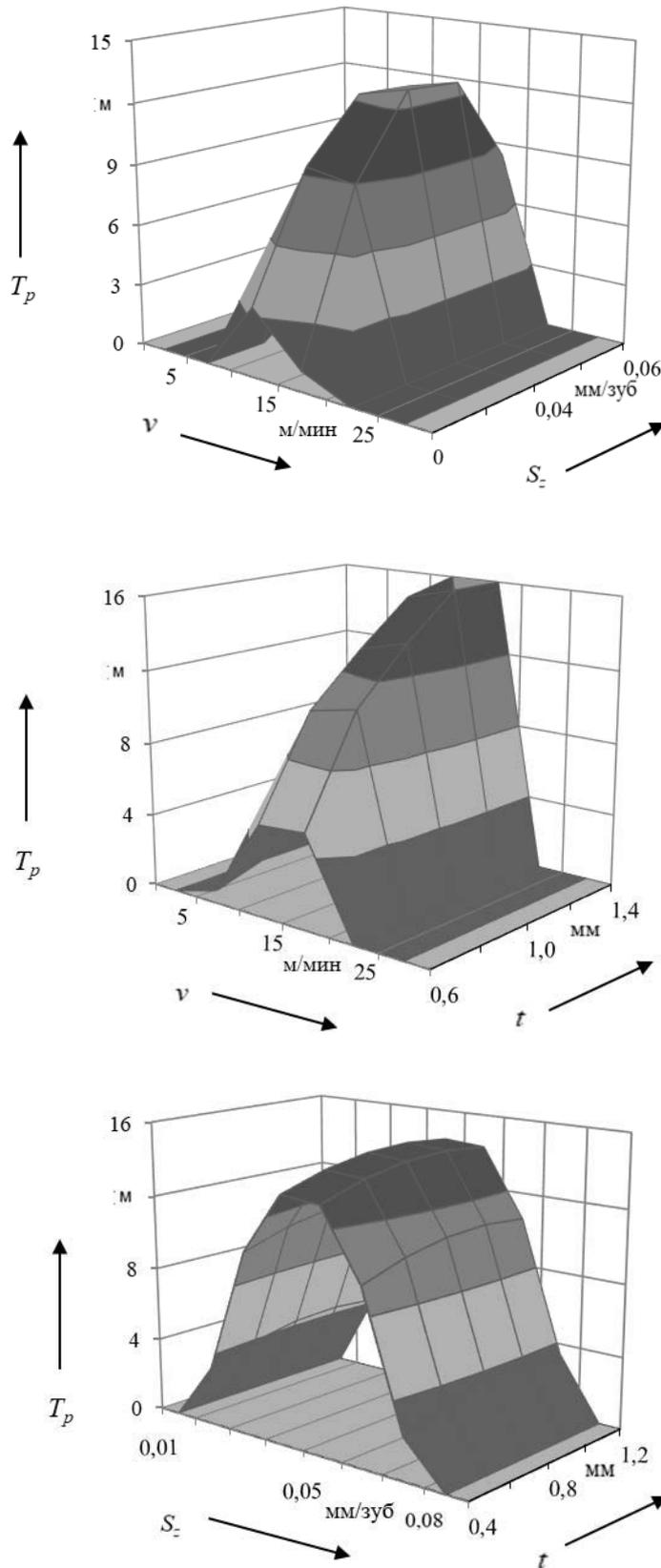
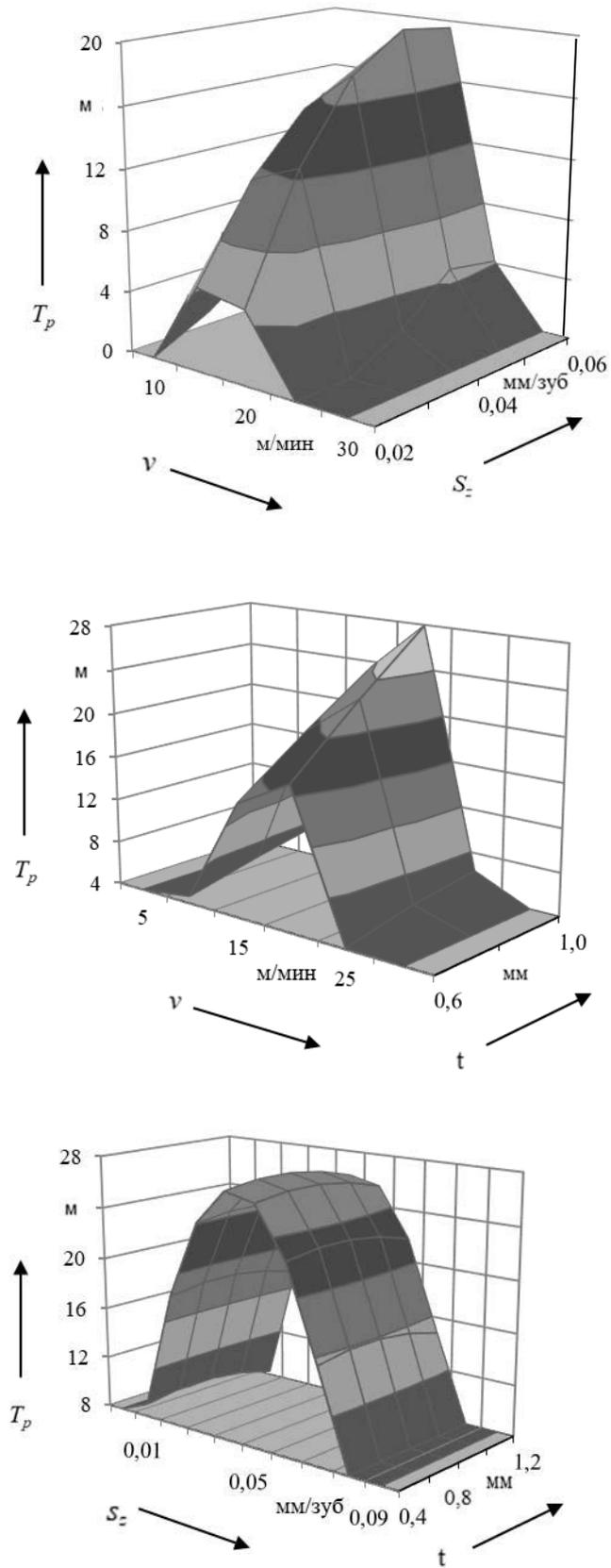


Рис. 2. Зависимости ресурса  $T_p$  фрез из Р6М5 без (а) и с АДУ (б) при фрезеровании стали 45 от скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$  и глубины резания  $t$

б)



Окончание рис. 2

### Выводы

В результате многофакторных экспериментальных и теоретических исследований влияния технологических режимов резания при обработке стали 45 концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 на ресурс инструмента установлено, что при обработке инструментом с АДУ на оптимальных технологических режимах резания (скорость резания – 17,3 м/мин, подача на зуб – 0,053 мм/зуб, глубина резания – 0,71 мм) обеспечивается увеличенный в 1,8 раза ресурс инструмента в отличие от обработки аналогичным инструментом без упрочнения, для которого оптимальные значения следующие:

скорость резания – 16,4 м/мин, подача на зуб – 0,045 мм/зуб, глубина резания – 0,97 мм. Наряду с повышением ресурса упрочненного инструмента одновременно обеспечивается и увеличение производительности обработки на 7,5 %.

Рекомендовано осуществлять механическую обработку заготовок концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненным аэродинамическим звуковым воздействием, на повышенных технологических режимах резания, определенных путем оптимизации, что позволит обеспечить не только повышение ресурса самого режущего инструмента, но и производительности обработки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жигалов, А. Н.** Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.
2. **Жигалов, А. Н.** Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2022. – № 1 (11). – С. 14–23.
3. **Горавский, И. А.** Методология повышения ресурса инструмента из быстрорежущей стали аэродинамическим звуковым воздействием / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Е. А. Дерман // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 20–21 окт. 2022 г. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 104–107.
4. **Жигалов, А. Н.** Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2019. – № 7. – С. 49–63.
5. **Жигалов, А. Н.** Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2021. – № 2 (10). – С. 24–41.
6. **Грановский, Г. И.** Резание металлов: учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.

*Статья сдана в редакцию 30 октября 2023 года*

Контакты:  
jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич);  
igorgoravskii@mail.ru (Горавский Игорь Андреевич).

**A. N. ZHIGALOV, I. A. GORAVSKY**

**TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE LIFE CYCLE OF END MILLING TOOLS MADE OF R5M5 STEEL**

**Abstract**

It has been established that machining with a tool hardened by aerodynamic sound method (ASH) increases tool life by 1,8 times at optimal technological cutting conditions, in contrast to processing with a similar tool without hardening. Along with increasing the service life of the hardened tool, a 7,5 % increase in machining productivity is simultaneously ensured.

**Keywords:**

end milling tool made of R6M5 steel, aerodynamic sound hardening method, wear, service life.

**For citation:**

Zhigalov, A. N. Technological support of the life cycle of end milling tools made of R5M5 steel / A. N. Zhigalov, I. A. Goravsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 5–13.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_14

УДК 624.074.5

**И. М. КУЗМЕНКО**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

**Д. О. КУЗМЕНКО**<sup>2</sup>

**В. М. ФРИДКИН**<sup>3</sup>, д-р техн. наук

**М. А. АНТОНОВА**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

<sup>2</sup>ООО «Проектное бюро Апекс» (Москва, Россия)

<sup>3</sup>Российский университет транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

## КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

### Аннотация

Разработаны и обоснованы предложения по замене в сквозных металлических конструкциях стержневых элементов коробчатого сечения на пластинчатые элементы, для соединения которых в пространственные структуры применяются специальные соединительные элементы (катушки).

### Ключевые слова:

сквозные металлические конструкции, стержневые элементы, листовой прокат, комбинированные сварные соединения, конструктивная форма, конечные элементы.

### Для цитирования:

Конструктивные решения стержневых несущих элементов с комбинированными сварными соединениями для металлических пролетных строений / И. М. Кузменко, Д. О. Кузменко, В. М. Фридкин, М. А. Антонова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 14–24.

### Введение

При проектировании объектов транспортного, промышленного и гражданского строительства, в том числе в мостостроении, широко применяются металлические конструкции в виде пространственных каркасов ферм, сводов, куполов и других конструктивных форм инженерных сооружений. Несущие элементы таких конструкций в большинстве случаев имеют коробчатое сечение. При их производстве и монтаже используются комбинированные (сварные, заклепочные и болтовые) соединения, которые обладают рядом недостатков. Кроме того, необходимо обеспечить антикоррозионную защиту поверхности конструктивных элементов, что представляет определенные трудности, особенно для внутренних поверхностей.

Исследования по совершенствованию таких конструкций ведутся совместно в Белорусско-Российском университете и Российском университете транспорта (МИИТ) в соответствии с Соглашением о сотрудничестве в области подготовки специалистов и научно-исследовательской работе от 10.06.2009 г.

При изготовлении упомянутых конструкций, в частности в мостостроении, используется листовой, в том числе стандартный универсальный, а также фасонный прокат низколегированных сталей. Стальные стержневые несущие элементы имеют, как правило, коробчатое односвязное или двутавровое (Н-образное) поперечные сечения, возможно, с диафрагмами [1–5]. Пространственные несущие структуры из таких стержневых элементов образуются путем их взаимных соединений узловыми фасонками и стыковыми накладками, раскра-

иваемыми и вырезаемыми из стального листового проката.

Для соединения элементов применяются заклепочные и сварные соединения – как заводские, так и монтажные. Повышаются трудоемкость и энергоемкость изготовления, возникают необратимые нарушения геометрии изделий и дислокационной структуры металла в зонах сварных швов, снижение выносливости и хладостойкости несущих стальных конструкций, воспринимающих существенные динамические нагрузки, особенно с учетом их эксплуатации в суровых природно-климатических условиях многих регионов России. Необходимо также контролировать геометрию и сварочных напряжений, а при необходимости – устранение последствий неизбежных теплофизических воздействий на объединяемые детали при сварке. Монтажные фрикционные соединения узлов выполняются, как правило, с применением высокопрочных болтов [6].

Одной из проблем проектирования таких металлических конструкций является необходимость обеспечения доступности пространства стыковочных узлов для установки и затяжки на расчетное усилие каждого из высокопроч-

ных болтов на каждом соединяемом элементе каждого из стержней, примыкающих к узловым фасонкам.

Еще один фактор усложнения конструирования – необходимость организации равнопрочных сварных стыков для коробчатых стержневых элементов, а также обеспечение доступа к антикоррозионной защите внутренних поверхностей таких элементов на стадии эксплуатации сооружения.

В конструкциях стержней коробчатого сечения также применяется перфорация [7] по меньшей мере одного из листов, что удорожает заводское изготовление и практически не снижает материалоемкость несущих элементов. Вместе с тем, открывается доступ загрязнений во внутреннее пространство стержня. С другой стороны, отказ от перфорации приводит к потребности обеспечения герметичности коробчатых стержней на весь период эксплуатации сооружения, что существенно усложняет стыковочные узлы и технологию монтажа металлоконструкций и приводит к разрушениям [8]. На рис. 1 приведен вид разрушенного (1987 г.) пролета моста в Великом Устюге (Россия), построенного в 1981 г.



Рис. 1. Разрушение моста с проезжей частью коробчатого сечения: а – общий вид; б – фрагмент

Также зафиксированы аварийное состояние и местные разрушения (тре-

щины) на мостах аналогичной конструкции в Беларуси: Бобруйск (р. Бере-

зна, построен в 1978 г., закрыт на ремонт в 2013 г.), Гомель (р. Сож, 1980–2017), Житковичи (р. Припять, 1985–2017), Новополоцк (р. Западная Двина, 1972–2018).

### **Конструктивные особенности стержневых несущих элементов новой конструктивной формы**

Авторами статьи разработаны новые подходы к проектированию конструктивных форм сооружений со сквозными стержнями [9–11]. При этом существенно упрощается технология заводского изготовления важнейших несущих элементов сквозных строительных конструкций (стержней и узловых фасонок главных ферм пролетных строений мостов или пространственных стержневых каркасов купольных, сводчатых и башенных конструктивных форм), без повышения стоимости их монтажа на площадках строительства инженерных сооружений.

Несущие элементы стержневой строительной конструкции образуются

пластинчатыми элементами из листовых материалов, например, из раскроя стандартного листового металлического проката, возможно, в сочетании с элементами стандартного универсального листового проката. Эти элементы объединяются высокопрочными болтами в сочетании с комбинированными сварными соединениями в пространственные стержни и узлы с помощью деталей из элементов фасонного проката или отрезков труб с приваренными к их торцам шайбами.

В целом, получаем плоскую структуру несущих элементов, состоящую из систем пластинчатых элементов, образующих, в свою очередь, элементы пространственных стержней, и специальных соединительных элементов – плоских фасонок, состыкованных с ними с помощью узловых накладок.

Базовым элементом является пространственный стержень, образованный из двух пластинчатых элементов, связанных между собой при помощи соединительных элементов (рис. 2).

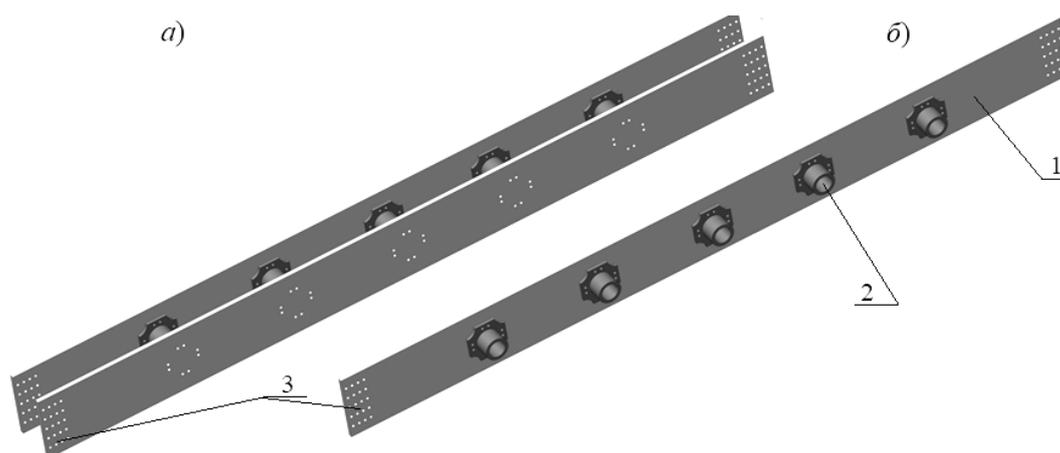


Рис. 2. Пространственный стержень несущего элемента: а – общий вид (3D-модель); б – вид стержня, рассеченного вдоль его продольной оси

Каждый пространственный стержень структуры состоит по меньшей

мере из двух пластинчатых элементов 1, соединенных между собой посредством

соединительных элементов 2, имеющих внешний вид трубчатых «катушек» с плоскими торцевыми стыковочными шайбами, или имеющих вид отрезков элементов фасонного проката.

При объединении пространственных стержней в пространственные системы образуется каркас несущих элементов стержневой строительной конструкции. Следовательно, такой стержень может быть использован как самостоятельная конструкция, или как монтажный элемент сборной стержневой строительной конструкции.

Технология изготовления стержней и стержневых систем предусматривает использование комбинированных соединений: сварка, заклепочные и (или) болтовые соединения.

Сборка элементов 1 между собой, а также с соединительными элементами 2, осуществляется при помощи, как правило, высокопрочных болтов. Все крепежные отверстия 3 (см. рис. 2) выполняются на заводе-изготовителе и могут в различном порядке располагаться на пластинчатых несущих элементах 1.

Конструктивное оформление пространственного стержня структуры может быть различным (рис. 3).

Соединительные элементы 2 (см. рис. 2) состоят по меньшей мере из двух листовых деталей 4 фасонного профиля (см. рис. 3), соединенных неразъемно между собой посредством отрезка трубы 5. Для усиления могут быть использованы ребра жесткости 6. Вместо трубы возможно применение прокатного двутаврового или Z-образного профиля 7.

Рассмотрены также варианты соединения трех и более пластинчатых элементов (рис. 4, а–в), а также вариант этажного расположения пространственных стержней с листовыми деталями фасонного профиля увеличенной длины (рис. 4, г).

Особое значение при проектировании ферм имеет конструктивное исполнение узлов. На рис. 5, а показана

конструкция узла, в котором два стержневых несущих элемента присоединяются к узловым фасонкам 8, а также узел со стойкой (подвеской) – рис. 5, б.

Соединение двух и более несущих элементов 1 в узлы производится с использованием по меньшей мере двух узловых листовых накладок в виде узловых фасонки 8, которые снабжены собственными соединительными элементами. Конструкция этих элементов аналогична соединительным элементам 2. Соединяются они друг с другом (узловая фасонка 8 и несущий элемент 1) при помощи общих узловых фасонки 9.

Все детали конструкции изготавливаются в заводских условиях. Листы режут на определенную ширину, просверливают отверстия под крепежные болты или заклепки для сборки несущих элементов 1 и для крепления полученных пространственных стержней между собой через соединительные элементы 2, 7, 10 и узловые фасонки 8. После этого каркас сооружения собирается непосредственно на строительной площадке с применением болтовых фрикционных соединений.

### **Граничные условия при моделировании НДС исследуемых конструкций**

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций созданы их модели в среде ANSYS Workbench [12–14].

Исследовались две модели пространственной большепролетной конструкции на примере фермы:

1) стандартной конструкции по Серии 3.501.2-166 [15] (*базовая конструкция*);

2) конструкции с измененной конструктивной формой стержневых элементов главных ферм (*новая конструкция*).

Граничные условия при расчете новой конструкции полностью соответствовали расчетной схеме базовой конструкции (Серия 3.501.2-166).

В качестве внешних нагрузок, действующих на конструкцию, приняты следующие нагрузки: собственный вес (*Standard Earth Gravity*) и распределенная нагрузка по продольным несущим балкам моста – 80 кН/м (*Line Pressure*). Распределенная нагрузка принята по ТКП EN 1991-2–2009 приложение D, пункт D.3, тип 5 – Буксируемый локомотивом грузовой поезд. При этом используются шарнирные опоры: шарнирно-подвижные *Displacement* и *Displacement 3* и шарнирно-неподвижная *Displacement 2* (рис. 6).

В строительной механике в расчетных схемах ферм жесткие узлы заменяются шарнирами: принимается, что стержни фермы воспринимают только действие продольных сил (работают на растяжение-сжатие), следовательно, напряженно-деформированное состояние стержней фермы определяется площадью их поперечного сечения. Поэтому при выполнении инженерных расчетов площади поперечных сечений стержней предлагаемой конструктивной формы (*новой конструкции*) максимально приближали к площади сечений стержней главной фермы стандартной конструкции (*базовой конструкции*).

В свою очередь, при выполнении расчетов в программном комплексе ANSYS все узлы рассматриваются жесткими. Следовательно, элементы фермы воспринимают воздействие нормальных сил и изгибающих моментов.

### **Выводы**

Проанализированы причины разрушений металлических пролетных строений мостов. Некоторыми причинами таких разрушений являются:

– невозможность обеспечения герметичности несущих элементов, имеющих коробчатое сечение и сложности с доступом к антикоррозионной защите внутренних поверхностей таких элементов;

– при выполнении сварочных работ не всегда возможно получение равнопрочных сварных соединений для коробчатых стержневых элементов, что приводит к снижению надежности конструкции, особенно при воздействии на нее низких температур и динамических нагрузок.

Перечисленные причины являются характерными также и для сквозных каркасов пространственных сооружений транспортного, промышленного и гражданского строительства, например, пространственных каркасов ферм.

Предложена новая конструктивная форма стержневых несущих элементов, свободная от выявленных недостатков. В сквозных металлических конструкциях стержневые элементы коробчатого сечения заменяются на пластинчатые элементы. При этом значительно снижается объем применения сварки.

Каждая пара смежных пластинчатых элементов пространственного стержня собирается в пространственную структуру с применением специальных соединительных элементов («катушек»). Предложены различные варианты конструктивного исполнения «катушек», а также варианты соединения с их помощью трех и более пластинчатых элементов.

Сформулированы граничные условия, принятые для дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния стержневой сквозной конструкции.

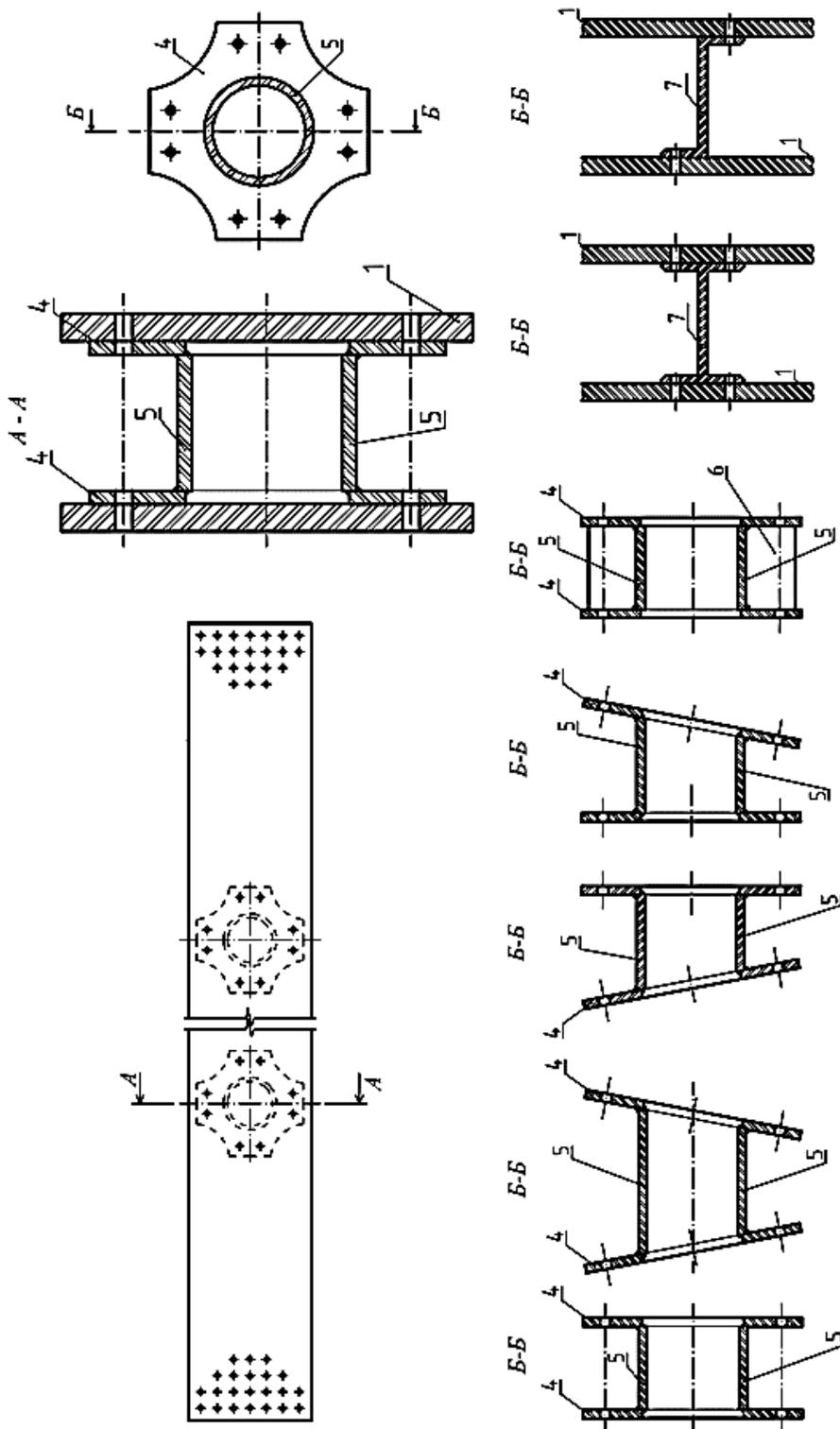


Рис. 3. Варианты конструктивного оформления пространственного стержня структуры: A-A – поперечный разрез по пространственному стержню и соединительному элементу (кагушке); B-B – разрез по катушке и различные варианты ее конструкции

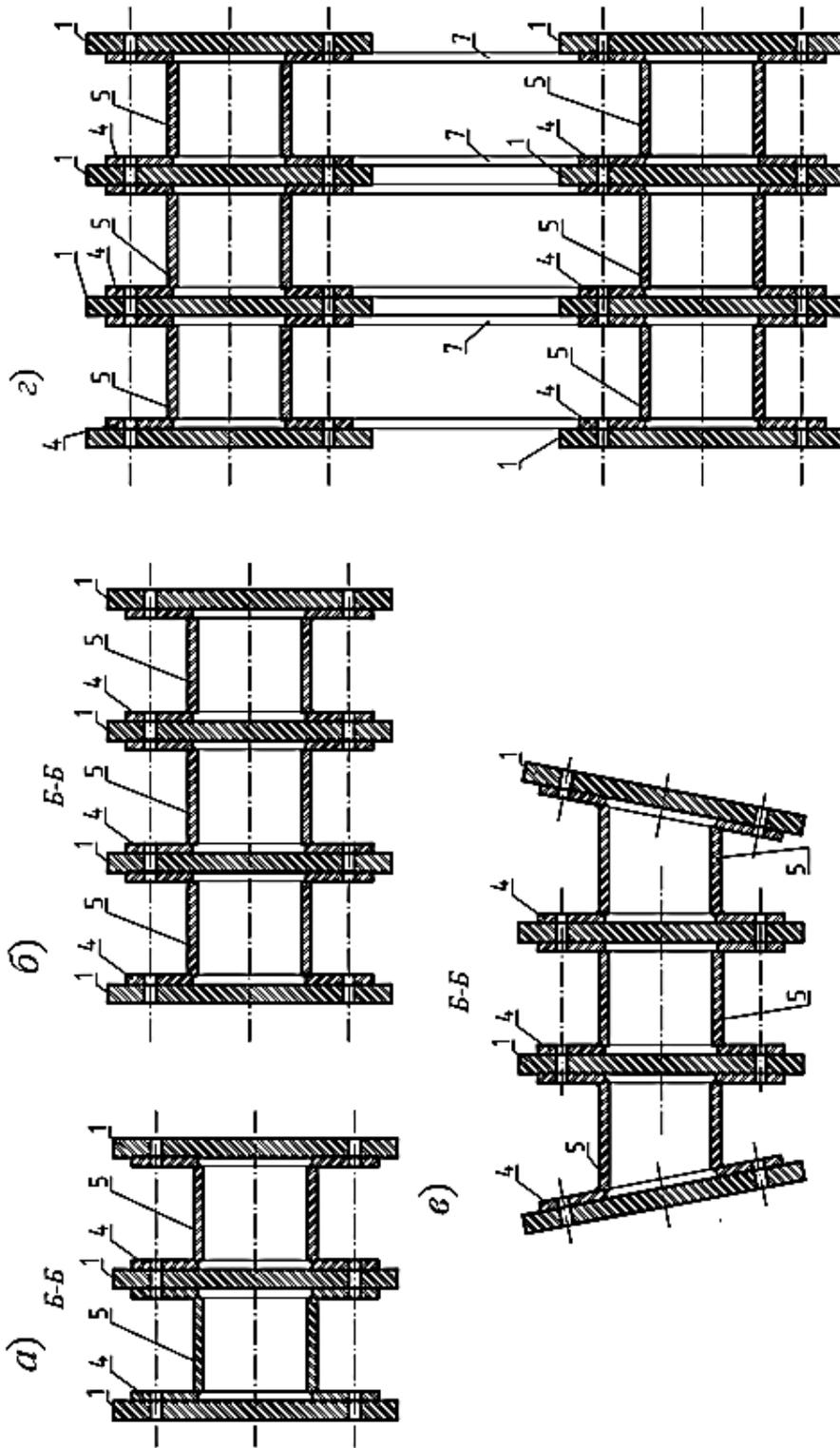


Рис. 4. Варианты соединения с помощью «катушек» трех и более пластинчатых элементов

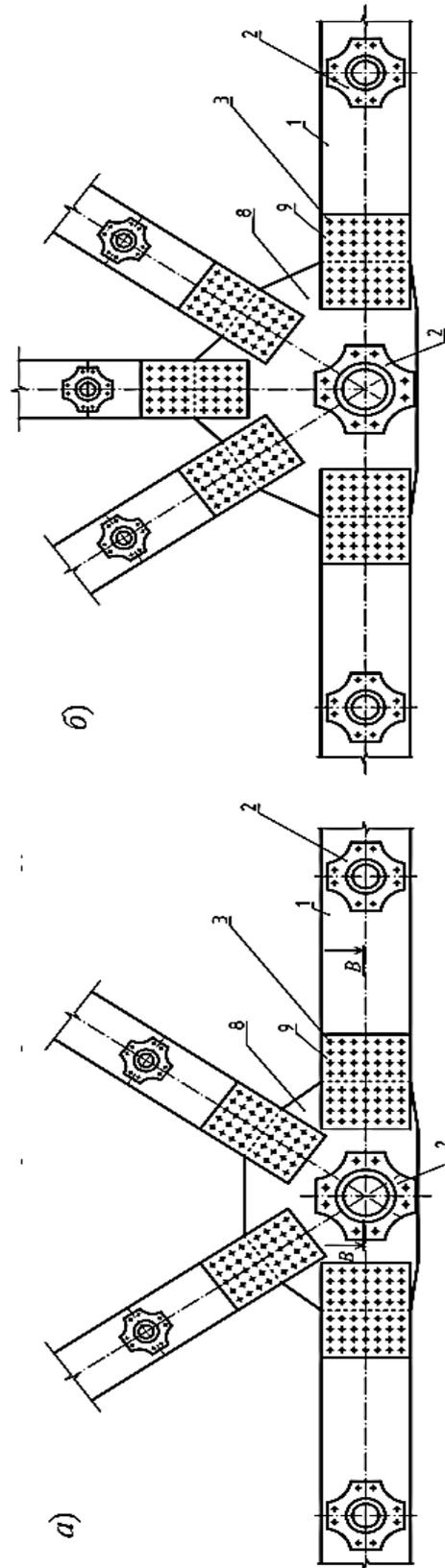


Рис. 5. Конструктивное исполнение узлов фермы

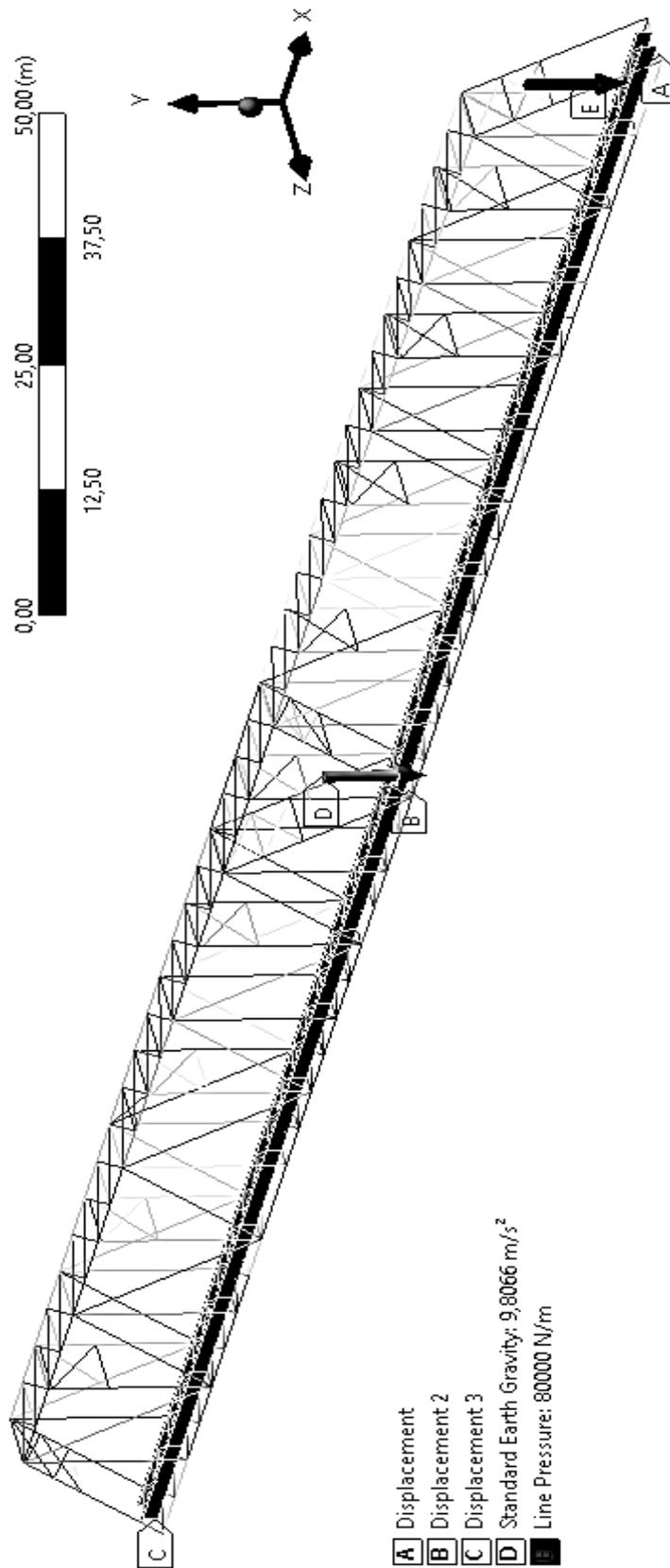


Рис. 6. Граничные условия, принятые в исследовании напряженно-деформированного состояния

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гибшман, Е. Е.** Проектирование металлических мостов / Е. Е. Гибшман. – Москва: Транспорт, 1969. – 416 с.
2. **Бычковский, Н. Н.** Металлические мосты: в 2 ч. / Н. Н. Бычковский, А. Ф. Данковцев. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. – Ч. 1. – 364 с.
3. **Поливанов, Н. И.** Проектирование и расчет железобетонных и металлических автодорожных мостов: учебное пособие / Н. И. Поливанов. – Москва: Транспорт, 1970. – 516 с.
4. **Корнеев, М. М.** Сталежелезобетонные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию / М. М. Корнеев. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – 400 с.
5. **Середина, О. С.** Архитектура транспортных сооружений [Электронный ресурс]: учебное пособие / О. С. Середина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).
6. **Серия 3.501.2-139.** Пролетные строения для железнодорожных мостов с ездой понизу, пролетами 33–110 м, металлические, со сварными элементами замкнутого сечения и монтажными соединениями на высокопрочных болтах в обычном и северном исполнении: утв. и введены в действие с 01.01.1999 г. письмом МПС России от 07.12.1998 г. № ЦПИ-6/38. – Москва, 1999.
7. Сквозные балки пролетных строений автодорожных мостов: монография / В. М. Картопольцев [и др.]; под общ. ред. В. М. Картопольцева. – Томск: Том. гос. арх.-строит. ун-т, 2015. – 136 с.
8. **Рудь, А.** Треснувший мост: пророчество. Минский пенсионер бил в колокола, но его не приняли всерьез [Электронный ресурс] / А. Рудь. – Режим доступа: <https://auto.onliner.by/2018/01/15>. – Дата доступа: 06.10.2023.
9. **Кузменко, И. М.** Перспективы развития строительных конструкций инженерных сооружений: монография / И. М. Кузменко, В. М. Фридкин. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 171 с.
10. **Фридкин, В. М.** Принципы проектирования инженерных сооружений XXI века: учебное пособие / В. М. Фридкин. – Москва: Русайнс, 2018. – 191 с.
11. **Kuzmenko, I. M.** Belarusian-russian innovation: creation of engineering structures of the XXI century / I. M. Kuzmenko, S. N. Markov, V. M. Fridkin // Proceedings of the METNET Seminar 2015 in Budapest, Hungary. HAMK University of Applied Sciences. Hämeenlinna, FINLAND, December. – 2015. – P. 40–51.
12. **Кузменко, Д. О.** Совершенствование пластинчато-стержневых несущих элементов сквозных металлических конструкций / Д. О. Кузменко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 10–14.
13. **Kuzmenko, D. O.** Selection of finite element for designing metal building structures / D. O. Kuzmenko, V. M. Fridkin, I. M. Kuzmenko // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Gottbus, Germany. HAMK University of Applied Sciences. Hämeenlinna, FINLAND, February. – 2018. – P. 156–167.
14. **Ткачев, Д. Н.** Силовой анализ элементов сквозной металлической конструкции большепролетного сооружения / Д. Н. Ткачев, А. А. Моргунов // 55 студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т. 2019. – С. 188.
15. **Серия 3.501.2-166.** Пролетные строения для железнодорожных мостов с ездой понизу неразрезные пролетами 110–176 м металлические со сварными элементами замкнутого сечения и герметичными узлами. – Вып. 1, ч. 1: Пролетное строение  $L_p = 2 \times 110$  м. Материалы для проектирования и чертежи КМ: утв. и введены в действие с 01.06.1992 г. письмом МПС России от 29.12.1991 г. МПС СССР. – Москва, 1992.

*Статья сдана в редакцию 19 октября 2023 года*

Контакты:

kuzmenko\_im43@mail.ru (Кузменко Игорь Михайлович);

onedimaz@mail.ru (Кузменко Дмитрий Олегович);

fvm38.38@mail.ru (Фридкин Владимир Мордухович);

ama-more@yandex.ru (Антонова Марина Анатольевна).

***I. M. KUZMENKO, D. O. KUZMENKO, V. M. FRIDKIN, M. A. ANTONOVA***

**STRUCTURAL SOLUTIONS OF ROD LOAD-BEARING ELEMENTS WITH COMBINED WELDED JOINTS FOR METAL SUPERSTRUCTURES**

**Abstract**

Proposals have been developed and substantiated for replacing box section rod elements with plate elements in framed metal structures, special connecting elements (coils) being used for connecting them into spatial structures.

**Keywords:**

framed metal structures, core elements, sheet metal, combined welded joints, structural form, finite elements.

**For citation:**

Structural solutions of rod load-bearing elements with combined welded joints for metal superstructures / I. M. Kuzmenko, D. O. Kuzmenko, V. M. Fridkin, M. A. Antonova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 14–24.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_25

УДК 621.436

**П. Ю. МАЛЫШКИН**

**А. Н. КАРТАШЕВИЧ**, *д-р техн. наук, проф.*

Белорусская государственная ордена Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия (Горки, Беларусь)

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ**

### **Аннотация**

Описана целесообразность применения газового топлива для питания дизеля как добавки. Приведен анализ модели двигателей и тракторов, работающих на газомоторном топливе. Выделены направления и предложена концепция применения газового топлива на транспорте, эксплуатирующемся в Республики Беларусь. Приведены результаты расчета экологической и экономической эффективности применения сжиженного углеводородного газа как добавки для дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), выполненного в программе «РЭЭИГГ-ДВС».

### **Ключевые слова:**

дизель, газовое топливо, экономический эффект, экологический эффект.

### **Для цитирования:**

Мальшкин, П. Ю. Экономическая эффективность применения сжиженного углеводородного газа для питания дизеля / П. Ю. Мальшкин, А. Н. Карташевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 25–31.

### **Введение**

Потребление дизельного топлива (ДТ) транспортными средствами организаций Республики Беларусь всех видов экономической деятельности с каждым годом неуклонно растет. При этом мировые запасы нефти при текущем потреблении топливно-энергетических ресурсов заметно истощаются. Поэтому одним из актуальных вопросов современности является применение альтернативных топлив, способных заменить традиционные для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В числе таких альтернативных топлив в настоящее время рассматриваются водородсодержащие, газовые топлива (ГТ), спирты, эфиры, масла и другие, которые позволяют не только снизить зависимость от импортируемого топлива, но и улучшить экологические показатели двигателя [1].

### **Основная часть**

Существенного экономического результата в совершенствовании рабочего процесса ДВС можно добиться, если обеспечить эффективную работу ДВС на дешевых и малоэнергозатратных в производстве видах топлива. Примером такой замены в сфере нефтяных топлив может быть полное и (или) частичное замещение дизельного топлива газовым [2].

Минский тракторный и Минский моторный заводы накопили большой опыт по созданию тракторов и двигателей, работающих на газомоторном топливе. Первыми проектами стали газодизельные варианты БЕЛАРУС-82.1ГД с двигателем ММЗ ГД-243, БЕЛАРУС-92П, БЕЛАРУС-320.4М с двигателем ММЗ-3LGD, БЕЛАРУС-1221.2 с двигателем Д-260.2-846, работающие с

использованием 30 % дизельного топлива (запальная доза) и 70 % компримированного природного газа (КПГ). Дальнейшее развитие техники привело к созданию газопоршневых моделей БЕЛАРУС-1221.2 с двигателем МТ05.15-50, БЕЛАРУС-1221.3 с двигателем ММЗ-262 и БЕЛАРУС-2022.3 с ММЗ-262 CNG/LNG.

Рассмотренные модели газовых тракторов в первую очередь ориентированы на российский рынок с широко развитой инфраструктурой газовых заправок природным газом, т. к. имеют возможность работать на полностью заправленном модуле КПГ при номинальной нагрузке порядка 6...7 ч.

Для Республики Беларусь применять такую технику с экономической точки зрения не выгодно из-за недостаточно развитой инфраструктуры газонаполнительных компрессорных станций природным газом (их количество составляет 25 ед.), т. е. 2 % от общего количества газозаправочных станций, а для заправки сжиженным углеводородным газом (СУГ) имеется 356 АГЗС [2]. Кроме этого, сжиженный углеводородный газ менее опасен при эксплуатации, т. к. хранится в баллонах при давлении не более 1,6 МПа, и его можно перевозить автогазовозами на расстояние до 500 км. При этом, как показали проведенные исследования [3–5], добавка СУГ в количестве 20 %...30 % от ДТ позволяет улучшить топливно-экономические показатели дизеля и не создает трудностей с размещением газовых емкостей на транспорте, т. к. не требуется больших запасов СУГ. В то же время не требуется значительных средств и времени на переоборудование дизельной техники, находящейся в эксплуатации для оснащения и настройки газовой системой питания.

Однако в настоящее время не разработано единой методики, позволяющей проводить комплексную оценку сравнительной экономической эффективности применения различных видов

альтернативных топлив. Экономический эффект за счет применения разработанной системы подачи газового топлива для дизеля [6] будет обусловлен замещением ДТ газовым топливом и снижением нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами (ОГ). Материальные затраты при применении системы регулирования в первую очередь связаны с изготовлением, монтажом и обслуживанием системы в процессе эксплуатации двигателя трактора.

Экономический эффект от снижения ущерба, наносимого ОГ окружающей среде при эксплуатации двигателя с системой подачи газового топлива, по сравнению с двигателем без системы, можно определить по методике [7], переложенной на алгоритмический язык, по программе [8], которая подходит для расчета экономической эффективности применения промышленных и природных газов для ДВС. В основе методики [7] заложено снижение токсичности по показателю  $K$ , равному денежным расходам, связанным с применением каждого из методов, отнесенным к 1 % снижения токсичности отработавших газов:

$$K = \frac{C_n}{\eta_i}, \quad (1)$$

где  $C_n$  – стоимость расходов, связанных с применением системы подачи ГТ;  $\eta_i$  – эффективность снижения концентрации  $i$ -го токсичного компонента.

Стоимость расходов, связанных с применением системы подачи газового топлива, рассчитывается по формуле

$$C_n = a \cdot C_1 + b \cdot \Delta G_T \cdot T + C_2, \quad (2)$$

где  $C_1$  – стоимость системы подачи газового топлива, р.;  $a$  – коэффициент годовой сменности устройства, равный годовому пробегу или наработке машины;  $\Delta G_T$  – изменение потребления дизе-

лем топлива, кг/ч;  $T$  – время эксплуатации машины, ч;  $b$  – стоимость 1 кг топлива, р.;  $C_2$  – стоимость эксплуатации, обслуживания и ремонта конструктивных нововведений, р.

Эффективность снижения концентрации  $i$ -го токсичного компонента рассчитывается по формуле

$$\eta_i = (C_{i1} - C_{i2})/C_{i1} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$  – концентрации  $i$ -го компонента без применения и с применением метода снижения токсичности соответственно, %.

Стоимость элементов приведена в табл. 1 [6].

Табл. 1. Стоимость элементов системы подачи газового топлива

Элемент газовой системы	Количество	Единица измерения	Стоимость, р.
Газовый баллон	1	шт.	50
Рама крепления баллона			40
Газовый клапан с фильтром			43
Трубка газовая	1	м	2
Трубка газовая	2,5	м	5
Фильтр газовый паровой фазы	1	шт.	2
Газовый редуктор с клапаном	1	Комплект	2000
Блок управления			
Провода и пульт			
Датчик температуры			
Датчик давления			
Крепеж (винты, гайки, хомуты и др.)	4	шт.	23
Удлинитель			12
Штуцеры газовые			12
Трубки резиновые	3	м	12
Рампа форсунок	1	шт.	25
Датчик частоты вращения коленчатого вала			38
Штуцеры системы охлаждения	2	шт.	20
Итого			2276

Эффективность применения альтернативного топлива дополнительно можно оценить по снижению экономического ущерба, наносимого народному хозяйству страны загрязнением окружающей среды [7].

Материальный ущерб от загрязнения атмосферы для каждого источника  $U$ , р./год, можно определить по формуле

$$U = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – относительный коэффициент ущерба, р./усл. кг;  $\sigma$  – безразмерная величина, как показатель относительной опасности загрязнения воздуха;  $f$  – поправочный коэффициент, учитывающий характер рассеяния примеси в атмосфере, для автотранспорта  $f = 10$ ;  $M$  – приведенная масса годового выброса загрязнений, усл. кг/год.

Приведенная масса годового выброса загрязнений, определяемая по

формуле

$$M = \sum A_i \cdot m_i, \quad (5)$$

где  $A_i$  – показатель относительной агрессивности загрязнений  $i$ -го вида, усл. кг/кг;  $m_i$  – масса годового выброса загрязнений  $i$ -го вида в год, кг/год.

Значение  $A_i$ , усл. кг/кг, определяется по формуле

$$A_i = a_i \cdot a_j \cdot \delta_i, \quad (6)$$

где  $a_i$  – показатель относительной опасности присутствия примеси в воздухе, вдыхаемом человеком;  $a_j$  – поправка, учитывающая вероятность накопления

исходной примеси или вторичных загрязнителей в компонентах окружающей среды и в цепях питания, а также поступления примеси в организм человека неингаляционным путем;  $\delta_i$  – поправка, учитывающая действие на различные реципиенты, помимо человека.

Принимаем значения постоянных величин и поправок по [7].

Результаты расчета экономической эффективности от снижения ущерба, наносимого ОГ окружающей среде при применении СУГ на одну единицу техники, выполненного по программе [8], представлены в табл. 2.

Табл. 2. Техничко-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения системы подачи газового топлива

Показатель	ДТ	ДТ + СУГ
Модель ДВС	Д-245.5S2	
Номинальная мощность, кВт	70	70
Удельный суммарный расход топлива, г/(кВт·ч)	223,1	219,0
Стоимость средства для подачи ГТ $C_1$ , р.	–	2276,00
Концентрация $NO_x$ в ОГ при работе на ДТ, ppm	470	–
Концентрация $NO_x$ в ОГ при работе на ДГТ, ppm	–	490
Концентрация $C$ в ОГ при работе на ДТ, %	28,0	–
Концентрация $C$ в ОГ при работе на ДГТ, %	–	13,0
Концентрация $C_n H_m$ в ОГ при работе на ДТ, ppm	5	–
Концентрация $C_n H_m$ в ОГ при работе на ДГТ, ppm	–	114
Коэффициент годовой сменности устройства	1,0	1,0
Стоимость 1 л дизельного топлива, р.	2,46	2,46
Изменение потребления дизелем топлива при работе на ДГТ, кг/ч	–	3,65
Годовая наработка двигателя, ч	1000	1000
Стоимость эксплуатации, обслуживания и ремонта $C_2$ , р./год		26,2
Стоимость расходов, связанных с применением альтернативного топлива, $C_n$ , р.		13009,2
Эффективность снижения токсичности ОГ $\eta_i$ для $C_i$ , %		53,6
Значение показателя $K$ при снижении $C$ в ОГ, р./%		210,47
Экологический эффект от снижения ущерба, наносимого ОГ окружающей среде, р. на один двигатель в год		1040,80

Использование СУГ как добавки (22 % от ДТ) для дизеля обеспечивает снижение токсичности отработавших газов дизеля на 53,6 % и позволяет по-

лучить экологический эффект от снижения ущерба, наносимого окружающей среде, в размере 1040,80 р. на один двигатель за 1000 ч работы на номи-

нальном режиме.

Годовой экономический эффект при эксплуатации двигателя с системой подачи газового топлива, по сравнению с двигателем без системы, можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{э} = & (G_{ДТ_2} - G_{ДТ+Г_2}) \cdot Ц_{ДТ} - \\ & - G_{Г_2} \cdot Ц_{Г} + Y - \frac{C_{Г} \cdot H_{Г}}{T_{Г}} - Z_{ТОиР}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $G_{ДТ_2}$ ,  $G_{ДТ+Г_2}$  – годовые расходы ДТ двигателем без системы подачи газового топлива и двигателя, оснащенного системой подачи газового топлива, кг;  $G_{Г_2}$  – годовой расход газового топлива двигателем, оснащенный системой подачи газового топлива, кг;  $Ц_{ДТ}$ ,  $Ц_{Г}$  – комплексная цена дизельного и газового топлива, р./кг;  $Y$  – годовой экологический эффект, р.;  $C_{Г}$  – балансовая стоимость системы подачи газового топлива, р.;  $H_{Г}$  – годовая наработка двигателя, ч;  $T_{Г}$  – планируемый ресурс системы подачи газового топлива, ч;  $Z_{ТОиР}$  – повышение затрат на ТО и ремонт, р.

Повышение затрат на ремонт и ТО рассчитали исходя из стоимости устанавливаемой системы подачи газового топлива:

$$Z_{ТОиР} = \frac{C_{Г} \cdot r_{mp}}{100}, \quad (8)$$

где  $r_{mp}$  – норматив затрат на ТО и ремонт техники,  $r_{mp} = 11,5\%$ .

При расчете годового расхода ДТ и ГТ при использовании системы подачи газового топлива учитывали время работы дизеля на номинальном режиме.

Годовой расход ДТ при работе дизеля без системы подачи газового топлива рассчитали по формуле

$$G_{ДТ_2} = G_{ДТ} \cdot H_{Г}, \quad (9)$$

где  $G_{ДТ}$  – часовой расход ДТ на номинальном режиме при работе дизеля без системы подачи газового топлива, кг/ч.

Аналогично произведен расчет годового расхода ДТ и ГТ при работе дизеля с системой подачи газового топлива:

$$G_{ДТ+Г_2} = G_{ДТ+Г} \cdot H_{Г}; \quad (10)$$

$$G_{Г_2} = G_{Г} \cdot H_{Г}, \quad (11)$$

где  $G_{ДТ+Г}$  – расход ДТ двигателем, оснащенный системой подачи газового топлива, кг;  $G_{Г}$  – расход газа двигателем, оснащенный системой подачи газового топлива, кг.

Технико-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения системы подачи газового топлива на дизеле трактора представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ проведенных расчетов применения СУГ как добавки для дизеля позволяет снизить затраты на топливо порядка 2,11 р. за час работы на номинальном режиме. Годовой экономический эффект составит 2901,15 р. на 1000 ч работы при стоимости ДТ 2,46 р./л и 1,28 р./л СУГ.

### Заключение

1. Применение СУГ для дизеля, работающего на номинальном режиме, позволяет снизить расход дизельного топлива на 22 %, тем самым получить снижение затрат на топливо порядка 2,11 р./ч.

2. Годовой экономический эффект от применения ДТГ составил 2901,15 р., из которых экологический эффект 1040,80 р. при наработке дизеля на номинальном режиме порядка 1000 ч.

Табл. 3. Технично-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения СУГ на дизеле

Показатель	Обозначение	Значение	
		ДТ	ДТ + СУГ
Балансовая стоимость, р.	$C_2$	–	2276
Повышение затрат на ТО и ремонт, р.	$Z_{ТОиР}$	–	26,2
Годовая наработка, ч	$H_2$	1000	1000
Планируемый ресурс, ч	$T_p$	10000	10000
Цена 1 кг ДТ, р.	$C_{ДТ}$	2,95	2,95
Цена 1 кг ГТ, р.	$C_{ГТ}$	–	2,31
Годовой расход ДТ, кг	$G_{ДТ_2}$	15900	12670
Экономия ДТ, кг		–	3230
Затраты на ДТ, р.		46843	37327
Годовой расход ГТ, кг	$G_{ГТ_2}$	–	3203,6
Затраты на топливо, р.		46843	44729
Экономия затрат на топливо, р.			2114,16
Экономия затрат на топливо, р./ч			2,11
Годовой экологический эффект, р.	$У$	–	1040,80
Годовой экономический эффект, р.	$Э_{э}$	–	2901,15

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.
2. Газовые заправки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belarusinfo.by>. – Дата доступа: 01.05.2023.
3. **Карташевич, А. Н.** Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БГСХА. – 2013. – № 3. – С. 110–115.
4. **Карташевич, А. Н.** Исследование эксплуатационных и экологических показателей колесного трактора с подачей газового топлива / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БарГУ. – 2014. – № 1. – С. 65–68.
5. **Карташевич, А. Н.** Улучшение энергетических свойств колесного трактора при работе на смешанном дизельно-газовом топливе / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Агропанорама. – 2020. – № 4 – С. 36–40.
6. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: пат. ВУ 10060 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Опубл. 30.04.2014.
7. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А. С. Быстров [и др.]. – Москва: Экономика, 1986. – 96 с.
8. Расчет экономической эффективности использования генераторного газа в ДВС («РЭЭИГГ-ДВС»): свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2018618558 / С. А. Плотников, Ю. В. Ланских, В. А. Подгорный, А. С. Зубакин, П. Ю. Малышкин. – Опубл. 16.07.2018.

Статья сдана в редакцию 10 мая 2023 года

Контакты:  
 Pavelm36@yandex.by (Малышкин Павел Юрьевич);  
 Kartashevich@yandex.by (Карташевич Анатолий Николаевич).

***P. Y. MALYSHKIN, A. N. KARTASHEVICH***

**COST-EFFECTIVENESS OF APPLYING LIQUEFIED HYDROCARBON GAS FOR DIESEL ENGINE POWER SUPPLY**

**Abstract**

The paper describes the feasibility of using gas fuel as an additive for diesel engine power supply. The model of engines and tractors running on gas motor fuel is analyzed. Directions are highlighted and the concept of gas fuel application in the transport operated in the Republic of Belarus is proposed. The calculation of environmental and economic efficiency of applying liquefied hydrocarbon gas as an additive for the 4ChN 11.0/12.5 (D-245.5S2) diesel engine has been performed using the «REEIGG-ICE» program and its results are presented.

**Keywords:**

diesel, gas fuel, economic effect, environmental effect.

**For citation:**

Malyshkin, P. Y. Cost-effectiveness of applying liquefied hydrocarbon gas for diesel engine power supply / P. Y. Malyshkin, A. N. Kartashevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 25–31.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_32

УДК 621.787

**М. Н. МИРОНОВА**, канд. техн. наук, доц.

**Е. Н. АНТОНОВА**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТВЕРСТИЙ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РАСКАТНИКАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

### Аннотация

Рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости по параметру  $Ra$  и формы микрорельефа поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий двухрядным пневмоцентробежным раскатником. Использован подход, базирующийся на технологиях функциональных семантических сетей. Проведен анализ влияния конструктивно-технологических факторов на качество поверхностей обрабатываемых отверстий. Указаны пути управления формой микрорельефа поверхности и шероховатостью поверхности.

### Ключевые слова:

пневмоцентробежная обработка, искусственный интеллект, функциональные семантические сети.

### Для цитирования:

Миронова, М. Н. Исследования обработки поверхностей отверстий пневмоцентробежными раскатниками на основе использования функциональных семантических сетей / М. Н. Миронова, Е. Н. Антонова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 32–40.

### Введение

Известно, что для того чтобы изделие экономично выполняло свое служебное назначение, оно должно обладать необходимым для этого качеством. Поэтому одной из задач технологии машиностроения является прогнозирование значений показателей качества поверхностей отверстий после пневмоцентробежной обработки.

Для управления процессом пневмоцентробежной обработки отверстий предлагается применять технологии искусственного интеллекта, основанные на использовании функциональных семантических сетей. Данный метод является эффективным способом обеспечения требуемых параметров качества поверхностей отверстий, т. к. основан на решении задачи многофакторной оптимизации конструкции инструмента и режимов обработки [1].

Использование технологий функ-

циональных семантических сетей позволит заранее определить ожидаемые показатели качества исходя из исходных условий проведения технологической операции пневмоцентробежной обработки отверстий.

В то же время предварительная оценка ожидаемых параметров качества поверхностей позволяет правильно спроектировать технологический процесс пневмоцентробежной обработки отверстий.

### Постановка задачи

При разработке и внедрении в действующее производство любого технологического процесса следует учесть большое количество различных факторов. Поэтому для эффективного управления процессом пневмоцентробежной обработки отверстий необходим анализ влияния конструктивных и технологических параметров системы на шерохо-

ватость и форму микрорельефа поверхности. Анализируя влияние отдельных факторов на показатели качества поверхностей, можно достоверно их предсказывать.

Степени влияния различных конструктивно-технологических факторов на показатели качества поверхностей отверстий были исследованы с помощью системы *Semantic*, использующей функциональные семантические сети в качестве инструмента для вычислений. Интеллектуальность системы обеспечивается за счет того, что жесткий алгоритм действий отсутствует, а последовательность выполняемых действий определяется самой системой в процессе решения отдельной поставленной задачи [2].

Отношения и параметры функциональной семантической сети, учи-

тывающие взаимосвязи конструктивных параметров инструмента и режимов пневмоцентробежной обработки отверстий, приведены в [1].

### Результаты и их анализ

В результате исследований были получены зависимости влияния различных конструктивных и технологических факторов на выходные параметры пневмоцентробежной обработки отверстий.

На рис. 1 представлены результаты моделирования влияния давления в камере расширения инструмента на частоту вращения шаров. Моделирование проводилось для обработки изделий из чугуна диаметром 110 мм шарами диаметром 10 мм с цилиндрическими соплами диаметром 2 мм. Зазор между деталью и инструментом составлял 0,1 мм.

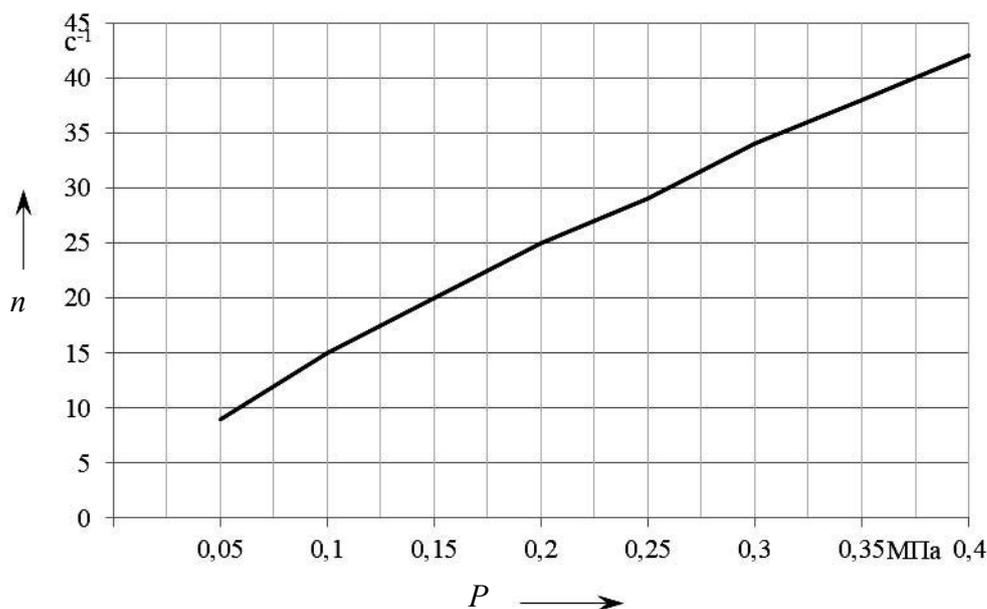


Рис. 1. Зависимость частоты вращения шаров от давления

Из графика видно, что с повышением давления частота вращения шаров увеличивается.

Исследования показали, что при увеличении зазора между заготовкой и инструментом до 0,6 мм частота враще-

ния шаров повышается (рис. 2). При дальнейшем его увеличении до 1,2 мм частота практически не изменяется. Это необходимо учитывать при выборе режимов обработки и конструировании инструмента. Так, например, изменени-

ем зазора между заготовкой и инструментом можно изменять частоту вращения шаров, не увеличивая давление в осевой полости инструмента.

Результаты моделирования влияния расположения сопел относительно оси инструмента (расстояния от оси инструмента до оси сопел  $b$ ) на тангенци-

альную составляющую результирующей скорости шаров представлены на рис. 3. Данная зависимость получена для обработки стальной втулки диаметром 110 мм при давлении в камере расширения  $P = 0,2$  МПа с числом сопел  $z_c = 6$  и диаметре сопел  $d_c = 3,5$  мм.

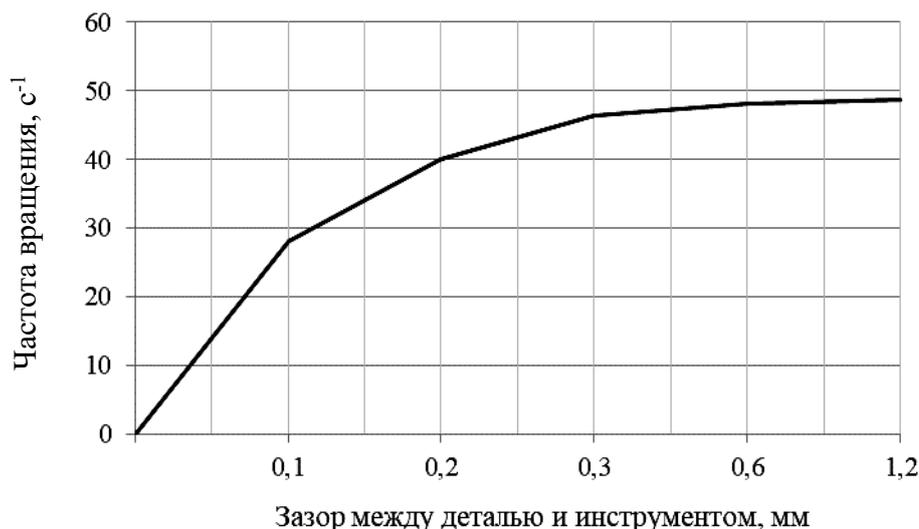


Рис. 2. Зависимость частоты вращения шаров от величины зазора между деталью и инструментом

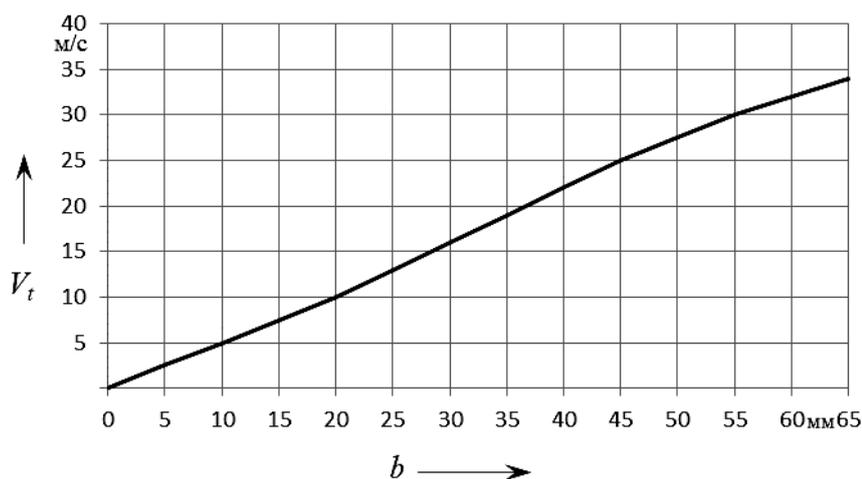


Рис. 3. Зависимость тангенциальной составляющей относительной скорости вращения шаров от расстояния  $b$

Из графика видно, что с увеличением расстояния  $b$  возрастает тангенциальная составляющая скорости шара,

которая является определяющей для частоты вращения шаров. При увеличении тангенциальной составляющей повыша-

ется частота вращения шаров. При максимальном значении расстояния  $b$  частота вращения шаров максимальна, и шары при прохождении пути от одного сопла к другому обеспечивают выглаживающий эффект.

Шар с уменьшением расстояния  $b$ , совершив удар по обрабатываемой поверхности, отскакивает и перемещается к следующему соплу с минимальной скоростью, не оказывая воздействия на обрабатываемую поверхность на этом участке пути. При таком режиме работы шары выбивают лунки на обрабатываемой поверхности, что обеспечивает получение луночного микрорельефа.

При  $b = 0$  тангенциальная составляющая также будет равна нулю, а нор-

мальная составляющая будет иметь максимальное значение. В этом случае вращение шаров практически отсутствует, но сила удара шара, находящегося напротив сопла, будет максимальной.

В результате исследований было изучено влияние подачи на работу, совершаемую инструментом,  $A_{ин}$ . Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Установлено, что при увеличении подачи инструмента уменьшается работа, совершаемая инструментом.

Зависимость работы, необходимой для смятия микронеровностей, от твердости обрабатываемого материала показана на рис. 5.

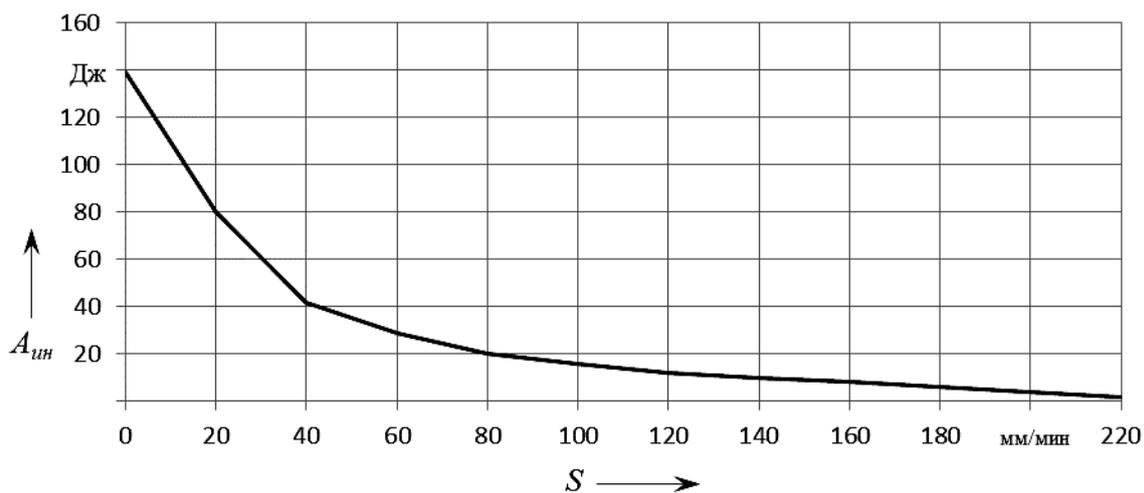


Рис. 4. Зависимость работы, совершаемой инструментом, от подачи

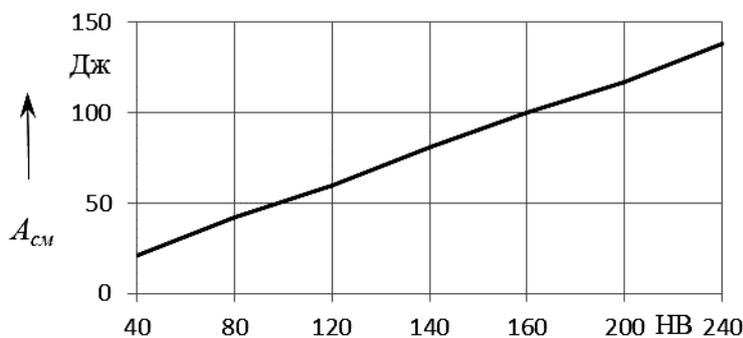


Рис. 5. Зависимость работы, необходимой для смятия микронеровностей, от твердости обрабатываемого материала

Из графика видно, что при обработке втулок с большей твердостью необходимо большая сила для смятия неровностей.

На рис. 6 показано влияние количества сопел на частоту их вращения.

Исследования проводились для сопел диаметром 2,5 мм при давлении  $P = 0,1$  МПа в осевой полости пневмоцентробежного раскатника диаметром 109 мм, снабженного деформирующими шарами диаметром 10 мм.

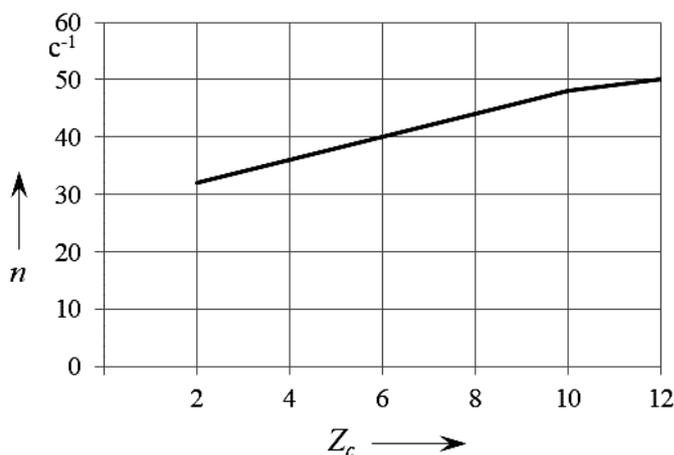


Рис. 6. Влияние давления и количества сопел на частоту вращения шаров

Анализ результатов моделирования показал, что с ростом количества сопел частота вращения деформирующих шаров увеличивается, т. к. повышается массовый расход воздуха, совершающего работу, необходимую для смятия неровностей.

Проведенные исследования позво-

лили определить влияние некоторых конструктивно-технологических факторов на качество обрабатываемой поверхности.

Влияние исходной шероховатости поверхности бронзовых втулок диаметром 45 мм и твердостью 100 НВ на ее конечное значение показано на рис. 7.

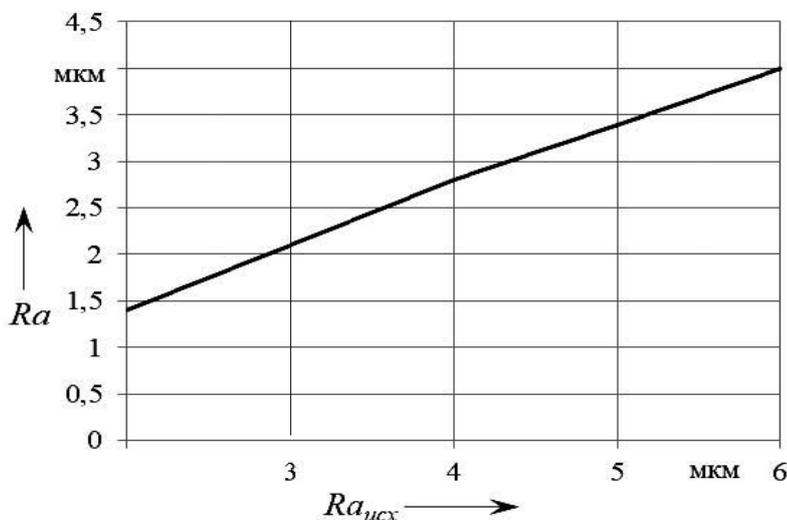


Рис. 7. Влияние исходной шероховатости поверхности на ее конечное значение

При больших исходных значениях шероховатости поверхности необходимо выполнить и большую работу для смятия неровностей, следовательно, при увеличении исходной шероховатости увеличивается и конечная шероховатость.

Влияние подачи на конечную шероховатость при обработке бронзовых и алюминиевых изделий представлено на рис. 8. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности  $Ra_{исх} = 5$  мкм.

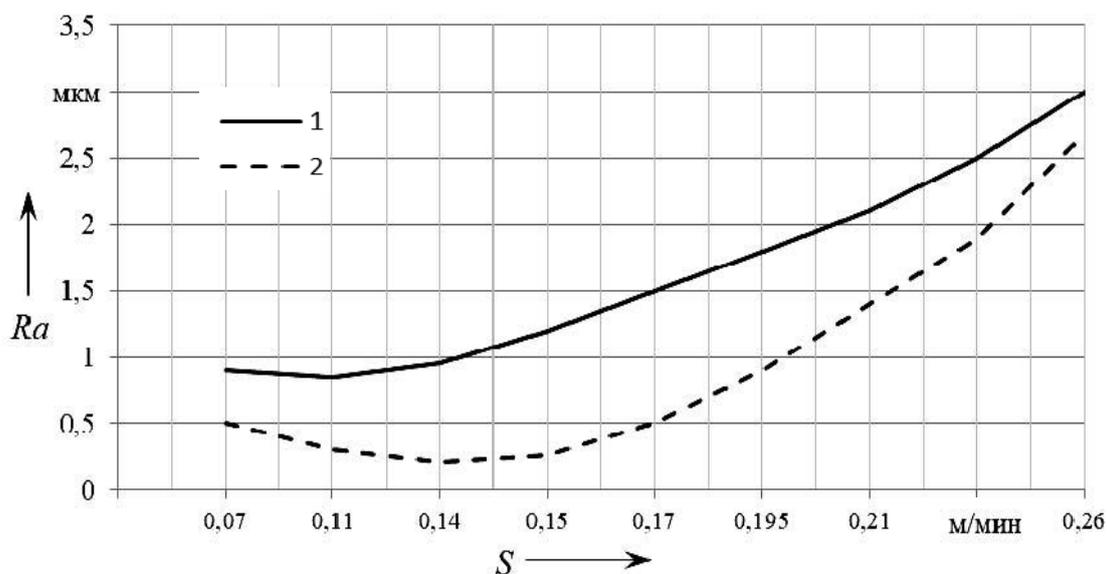


Рис. 8. Зависимость шероховатости от подачи при обработке: 1 – бронзовая втулка с твердостью 110...115 НВ; 2 – алюминиевая втулка с твердостью 70...75 НВ

Характер полученных зависимостей показывает, что при увеличении подачи шероховатость уменьшается на определенном интервале, затем начинает возрастать. Это связано с тем, что с увеличением подачи работа, совершаемая инструментом, уменьшается, и с определенного значения (это значение зависит от твердости обрабатываемого материала) ее становится недостаточно для смятия микронеровностей, тогда шероховатость начинает увеличиваться. При малой твердости материала и малых подачах инструмент совершает работу большую, чем необходимо для смятия микронеровностей материала.

Установлено, что при увеличении диаметра шаров конечная шероховатость уменьшается. График, представленный на рис. 9, отражает зависимость конечной шероховатости от диаметра шаров

при давлении  $P = 0,3$  МПа, диаметре сопел  $d_c = 3,5$  мм и исходной шероховатости  $Ra_{исх} = 6$  мкм. Результаты моделирования приведены для обработки втулок из стали 35 диаметром 120 мм.

График, представленный на рис. 10, отражает зависимость конечной шероховатости от давления в камере расширения инструмента  $P$ . Результаты моделирования приведены для обработки втулок из стали 35 диаметром 120 мм с исходной шероховатостью  $Ra_{исх} = 6$  мкм при диаметре сопел  $d_c = 1,5$  мм и диаметре шаров  $d_{ш} = 8$  мм.

При уменьшении давления шероховатость увеличивается. Такой характер изменения кривой объясняется тем, что при больших давлениях создается достаточная сила воздушного потока для вращения шаров. При уменьшении давления расход воздуха становится

меньше, и силы воздушного потока (струй) уже недостаточно для вращения шаров. Поэтому уменьшается ударная

сила шаров и, соответственно, увеличивается шероховатость.

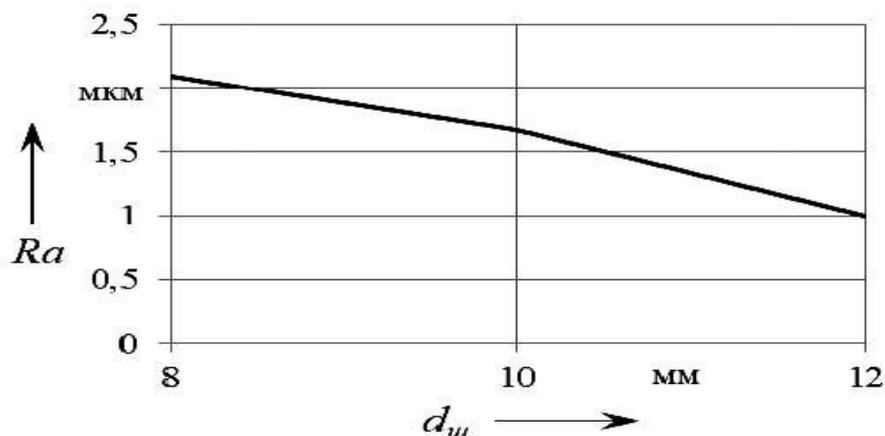


Рис. 9. Зависимость конечной шероховатости от диаметра шаров

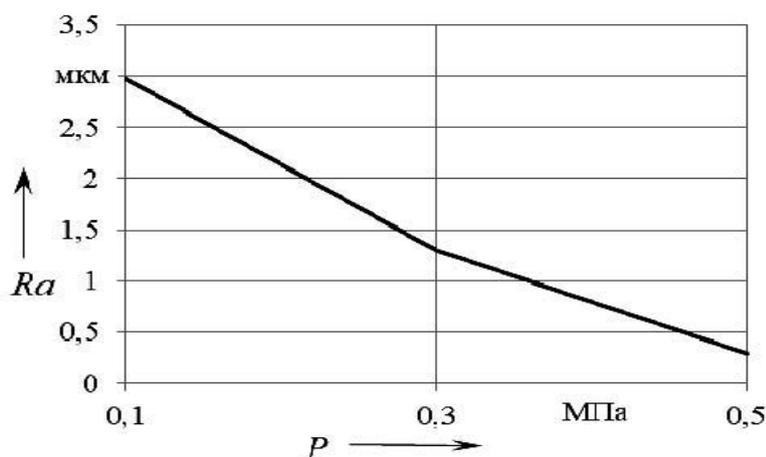


Рис. 10. Зависимость шероховатости от давления в камере расширения инструмента

Установлено, что при уменьшении диаметра сопел увеличивается конечная шероховатость поверхности (рис. 11), т. к. уменьшается объемный расход воздуха, что влечет за собой снижение частоты вращения шаров и ударной силы.

### Заключение

Результаты исследований позволили выявить влияние конструктивных (диаметров сопел и шаров, формы и

расположения сопел, зазора между заготовкой и инструментом) и технологических (подачи инструмента и давления сжатого воздуха в осевой полости раскатника) параметров инструмента на шероховатость и форму микрорельефа поверхности на основе многочисленных компьютерных экспериментов со случайными комбинациями параметров на основе использования интеллектуальной системы *Semantic*.

Использование этих данных поз-

воляет строить эффективные алгоритмы управления процессом пневмоцентробежной обработки отверстий.

На основе данных, полученных в результате моделирования, установлено, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают давление сжатого воздуха, подача инструмента и, в меньшей степени, диа-

метры шаров.

Установлено, что наибольшее влияние на форму микрорельефа оказывают форма и расположение сопел, диаметры шаров, а также подача, что следует учитывать при проектировании инструмента и выборе режимов обработки.

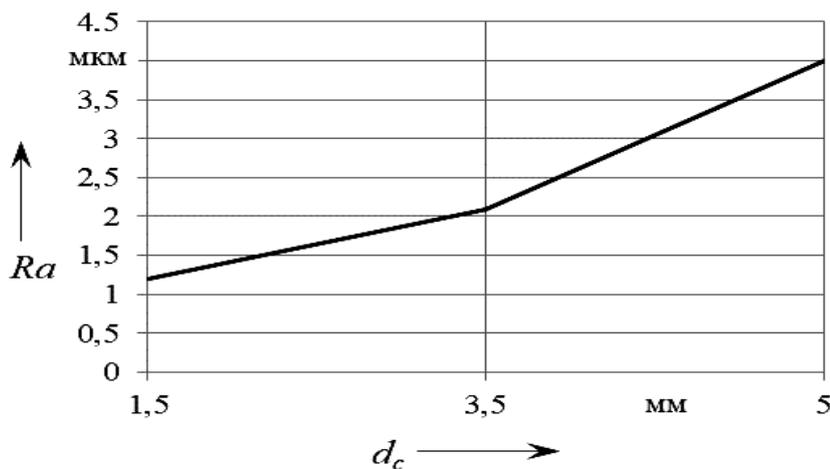


Рис. 11. Зависимость шероховатости от диаметра сопел

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миронова, М. Н.** Управление шероховатостью и формой микрорельефа при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий на основе использования функциональных семантических сетей / М. Н. Миронова, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3. – С. 76–85.
2. **Пашкевич, В. М.** Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 200 с.
3. **Гарлачов, Н. С.** Влияние конструктивных и технологических факторов на частоту вращения шаров пневмоцентробежного раскатника / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.
4. **Парахневич, В. Т.** Энергетический анализ пневмоцентробежного шарикового раскатника / В. Т. Парахневич, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 188–192.
5. **Гарлачов, Н. С.** Методика определения работы, совершаемой пневмоцентробежным раскатником при обработке внутренних цилиндрических поверхностей / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 76–81.
6. **Антонова, Е. Н.** Обработка внутренних поверхностей тел вращения двухрядным пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова // Сборник научных трудов членов Международной Балтийской Ассоциации машиностроителей. – Калининград: Калининград. гос. техн. ун-т, 2005. – № 5. – С. 59–61.
7. **Пашкевич, В. М.** Методология комплексного решения технологических задач на основе использования функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 95–105.

Статья сдана в редакцию 17 октября 2023 года

Контакты:

MarinaMN16@mail.ru (Миронова Марина Николаевна);

antonovaen@list.ru (Антонова Елена Николаевна).

***M. N. MIRONOVA, E. N. ANTONOVA***

## **RESEARCH ON SURFACE TREATMENT OF HOLES USING PNEUMATIC CENTRIFUGAL ROLLERS WITH APPLICATION OF FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORKS**

### **Abstract**

The paper considers the issues of ensuring roughness according to  $Ra$  parameter and a surface microrelief form during pneumocentrifugal treatment of holes with a two-row pneumocentrifugal roller. The approach used is based on the technologies of functional semantic networks. The influence of design-engineering factors on the surface quality of machined holes has been analyzed. Ways to control the surface microrelief form and surface roughness are specified.

### **Keywords:**

pneumocentrifugal treatment, artificial intelligence, functional semantic networks.

### **For citation:**

Mironova, M. N. Research on surface treatment of holes using pneumatic centrifugal rollers with application of functional semantic networks / M. N. Mironova, E. N. Antonova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 32–40.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_41

УДК 621.822.6

**А. П. ПРУДНИКОВ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

**Б. М. МОРГАЛИК**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

<sup>2</sup>РУП Могилевское отделение БелЖД (Могилев, Беларусь)

## МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

### Аннотация

Изучены основные виброакустические методы диагностирования подшипников качения. Приведены результаты диагностирования рассматриваемыми методами для нового и дефектных подшипников. Выполнено сопоставление результатов диагностирования, полученных с помощью встроенного в виброанализатор программного обеспечения и реализованных математических алгоритмов в Matlab.

### Ключевые слова:

вибрация, подшипник, дефект, диагностика.

### Для цитирования:

Прудников, А. П. Мониторинг состояния и диагностика подшипников качения / А. П. Прудников, Б. М. Моргалик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 41–52.

Вибрационная диагностика является одним из основных способов мониторинга технического состояния элементов приводных систем, позволяя обнаруживать скрытые дефекты на всех стадиях их появления без демонтажа технологического оборудования.

Целью данного исследования являлось рассмотрение применения основных виброакустических методов диагностирования подшипников качения.

Объектом исследования являлся шариковый подшипник качения, основные параметры которого приведены в табл. 1.

Для проведения экспериментального исследования и определения параметров вибрационного сигнала от диагностированного подшипника использовался испытательный стенд на базе электродвигателя, порошкового тормоза, цилиндрического редуктора, пьезоакселерометра, датчика крутящего момента и частоты вращения. Технические характеристики испытательного стенда описаны в [1]. Для записи и обработки вибрационных сигналов применялись измерительный комплекс В-363 и ви-

роанализатор VALTECH VP-3470. Оба прибора позволяют измерять виброускорение, виброскорость и виброперемещение.

На рис. 1 приведена используемая точка измерения вибрации на корпусе редуктора вблизи диагностируемого подшипника.

Экспериментальное исследование проводилось с новым подшипником и подшипниками со следующими дефектами:

- на беговой дорожке наружного кольца был нанесен дефект в виде лунки диаметром 1,5 мм и глубиной 0,1 мм (рис. 2, а);
- с износом беговой дорожки внутреннего кольца;
- со сломанным звеном сепаратора (рис. 2, б);
- с некачественной смазкой.

Рассматриваемые дефекты могут возникать в процессе эксплуатации и монтажа в результате образования контактно-усталостных повреждений, попадания в смазку подшипника инородных твердых тел, ударных нагрузок.

Табл. 1. Параметры исследуемого подшипника качения

Параметр	Значение
Обозначение	6207
Внутренний диаметр, мм	35
Наружный диаметр, мм	72
Ширина, мм	17
Количество шариков	9
Диаметр шарика, мм	11,11

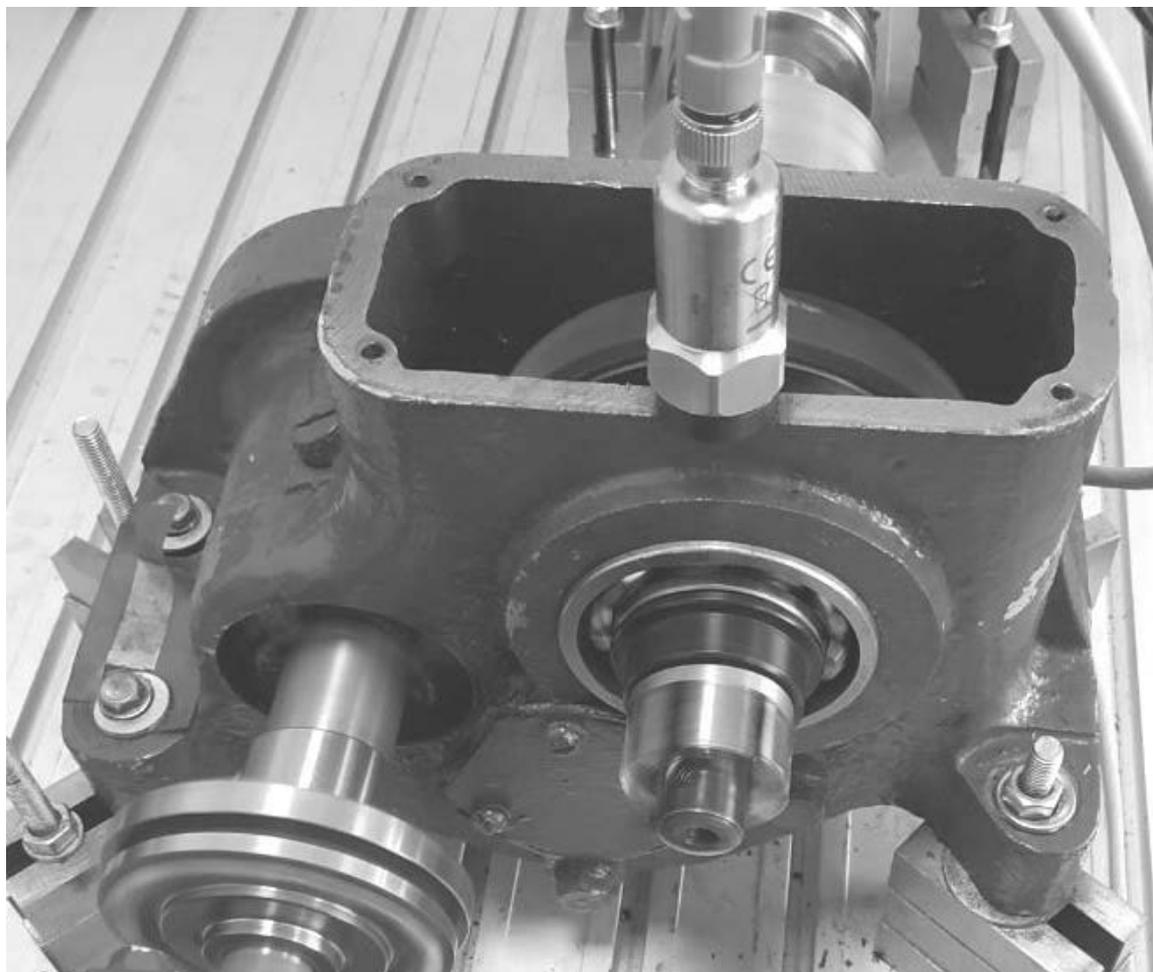


Рис. 1. Контрольная точка измерения вибрации на корпусе редуктора на испытательном стенде

а)



б)



Рис. 2. Нанесенные дефекты на подшипники качения: а – лунка на дорожке качения наружного кольца; б – сломанное звено сепаратора

Рассмотрим основные виброакустические методы диагностирования подшипников качения.

*Диагностика по общему уровню вибрации.* Данный способ оценки состояния подшипника заключается в контроле среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости. Его преимуществами являются низкие требования к квалификации персонала, проводящего диагностику, и возможность использовать виброметры простой конструкции. К недостатку метода относится возможность выявления дефектов только на последней стадии их развития. Крите-

рием выхода подшипника из строя является превышение уровня вибрации нормативного значения. Стандартами предусмотрено, что изменение уровня вибрации более чем в 1,6 раза свидетельствует об изменении технического состояния механизма [3, с. 16].

*Диагностика по методу пик-фактора.* Данный метод основывается на оценке отношения пика амплитуды временного сигнала (положительного или отрицательного) к СКЗ сигнала. Возможность обнаружения дефекта связана с тем, что с его развитием СКЗ сигнала возрастает с отставанием от роста пика

амплитуды сигнала. Достижение отношения пика амплитуды к СКЗ сигнала максимального значения характеризует переход дефекта в последнюю стадию развития. В качестве временного сигнала целесообразно использовать виброускорение, лучше всего отражающее дефекты, имеющие ударную природу. Преимуществами данного метода являются: низкие требования к квалификации персонала и техническим характеристикам виброметров; возможность выявления дефектов на середине этапа их развития; в отличие от спектрального анализа, данный метод хорошо обнаруживает дефекты, имеющие ударную природу. Недостатком метода является невозможность определения элемента, для которого возник дефект.

*Диагностика по методу эксцесса.* Оценка степени развития дефекта в подшипнике выполняется по коэффициенту эксцесса сигнала виброускорения [4, с. 29]. Метод эксцесса позволяет достаточно точно оценить состояние смазки и загрязнения подшипника на всех этапах развития дефектов. Исходя из практики виброакустического диагностирования, были определены следующие пороговые значения для коэффициента эксцесса: менее 2,5 – подшипник исправен; от 2,5 до 5 – состояние подшипника требует регулярного контроля; 5 и более – эксплуатация подшипника недопустима [5].

*Диагностика по спектру сигнала.* По характерным гармоникам в спектре сигнала можно различить каждый дефект в подшипнике качения. Преимуществом спектрального анализа является то, что он позволяет выявлять большое количество различных дефектов, в том числе и место их возникновения. Недостатком метода являются высокие требования к квалификации персонала, проводящего диагностику.

*Диагностика по спектру огибающей сигнала.* Большая часть необходимой информации для оценки состояния подшипника находится в низкочастот-

ной модулирующей составляющей спектра вибросигнала. Для получения этой информации и применяется спектральный анализ огибающей вибросигнала. Преимуществами данного метода являются возможность обнаружения дефекта на стадии зарождения, а также определение элемента подшипника качения, на котором расположен дефект.

Каждый из перечисленных методов имеет свои положительные стороны и применение их в совокупности позволяет заблаговременно обнаружить дефектный подшипник, обеспечивая требуемую работоспособность и надежность приводной техники.

Виброанализатор BALTECH VP-3470 позволяет выполнять обработку сигнала вибрации по описанным методам с помощью встроенного программного обеспечения. Его недостатком является то, что анализ полученных данных возможен только в программном обеспечении BALTECH Expert и не позволяет экспортировать данные для обработки в сторонних приложениях.

Вибрационный сигнал, полученный с помощью измерительного комплекса В-363, для вывода необходимой диагностической информации по вышеописанным методам обрабатывался с помощью математического алгоритма, реализованного в пакете прикладных программ Matlab.

Далее представлены результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для нового подшипника.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,46 и 0,42 мВ;
  - пик-фактор составил 3,72 и 3,66;
  - коэффициент эксцесса составил 1,12 и 0,96;
  - спектр сигнала приведен на рис. 3.
- Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,96 и 2,32.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализа-

тора VALTECH VP-3470 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,62 и 1,45 м/с;
- пик-фактор составил 4,49 и 4,53;
- коэффициент эксцесса соста-

вил 0,42 и 0,58;

– спектр огибающей сигнала приведен на рис. 4. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 9,97 и 17,16.

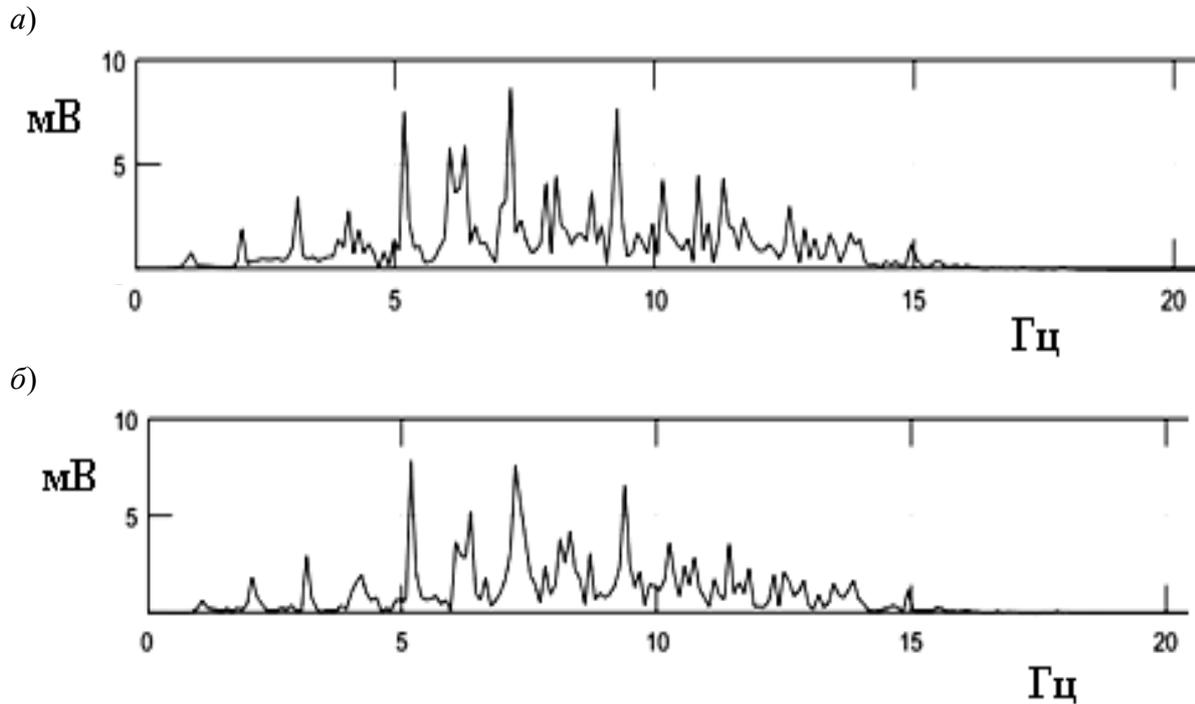


Рис. 3. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для нового подшипника: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

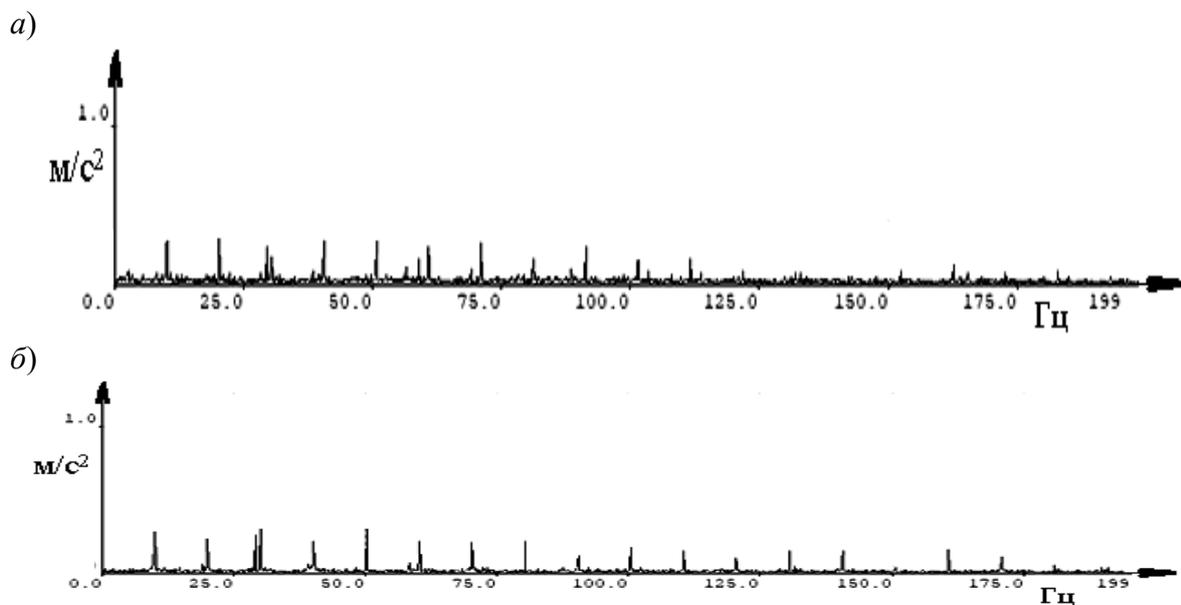


Рис. 4. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью вибронализатора VALTECH VP-3470, для нового подшипника: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника с нанесенным дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки

и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,44 и 0,46 мВ;
- пик-фактор составил 4,1 и 3,77;
- коэффициент эксцесса составил 1,66 и 1,13;
- спектр сигнала приведен на рис. 5. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 2,05 и 1,62.

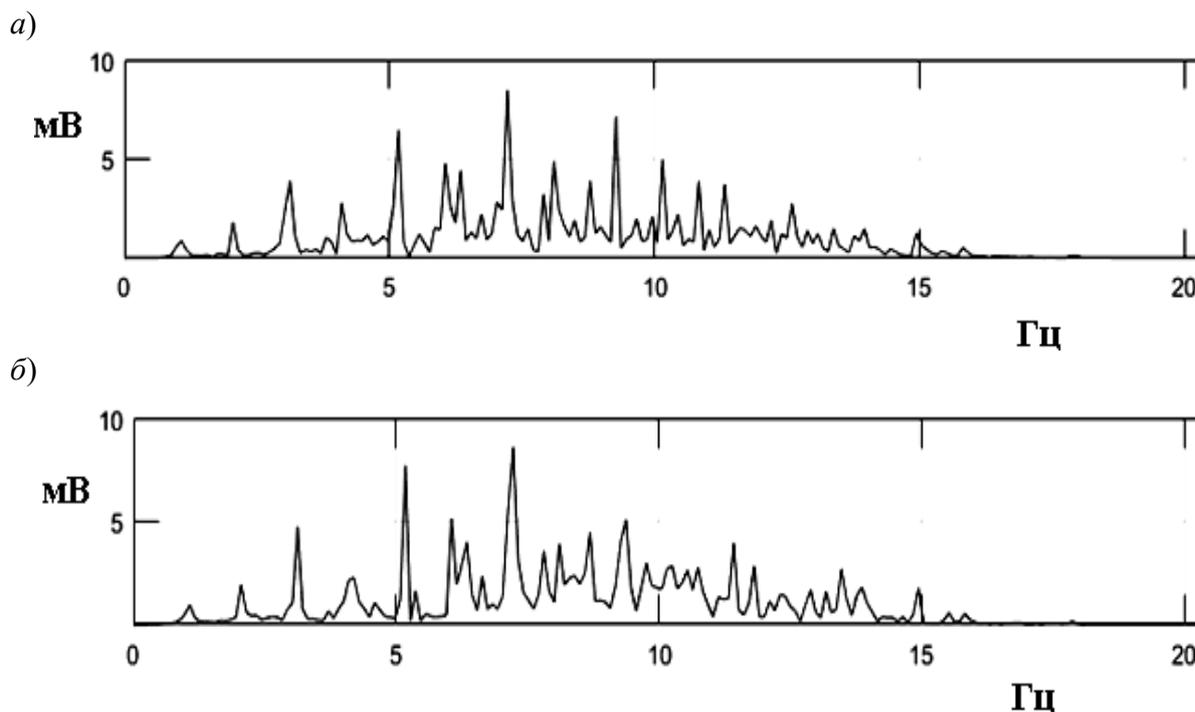


Рис. 5. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью вибронализатора VALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,47 и 1,54 м/с;
- пик-фактор составил 4,84 и 4,73;
- коэффициент эксцесса составил 0,84 и 0,45;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 6. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 7,23 и 13,44.

Результаты вибродиагностики по

вышеописанным методам для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,43 и 0,48 мВ;
- пик-фактор составил 5,78 и 4,2;
- коэффициент эксцесса составил 1,6 и 1,51;
- спектр сигнала приведен на рис. 7. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,88 и 1,62.

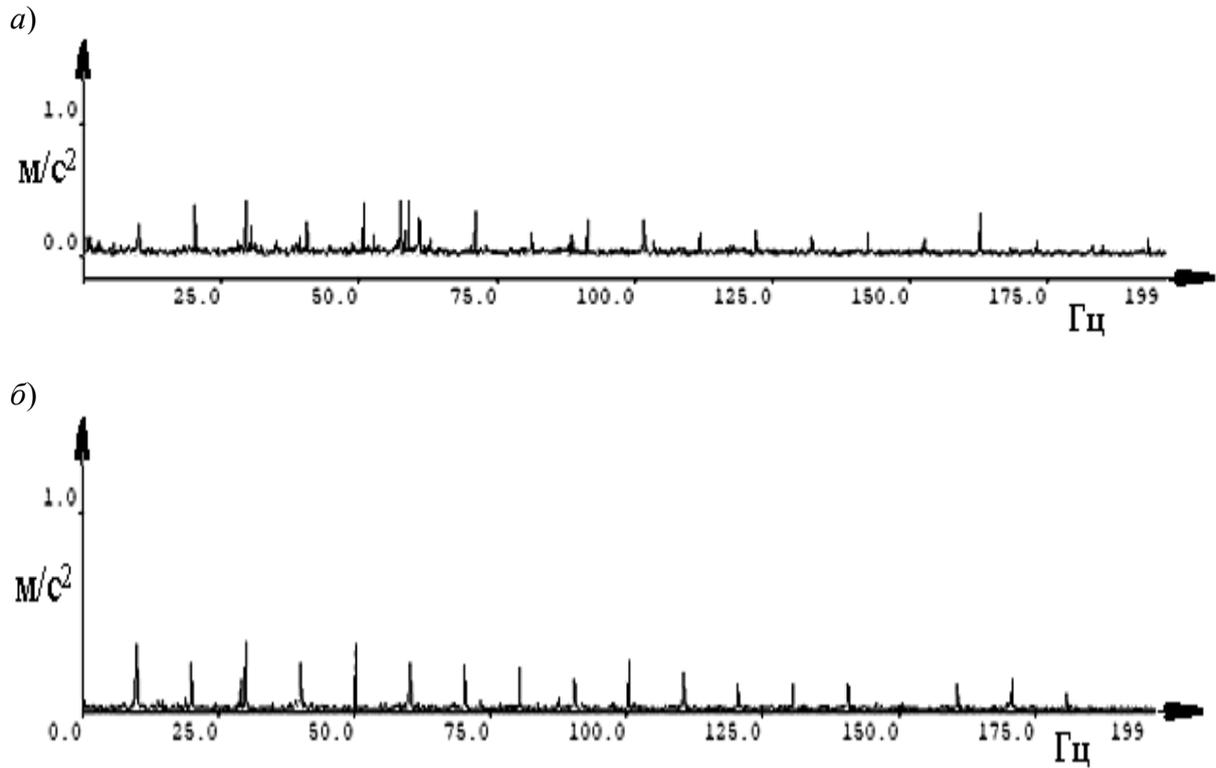


Рис. 6. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью вибронализатора BALTECH VP-3470, для подшипника с дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца: *а* – без нагрузки; *б* – с нагрузкой

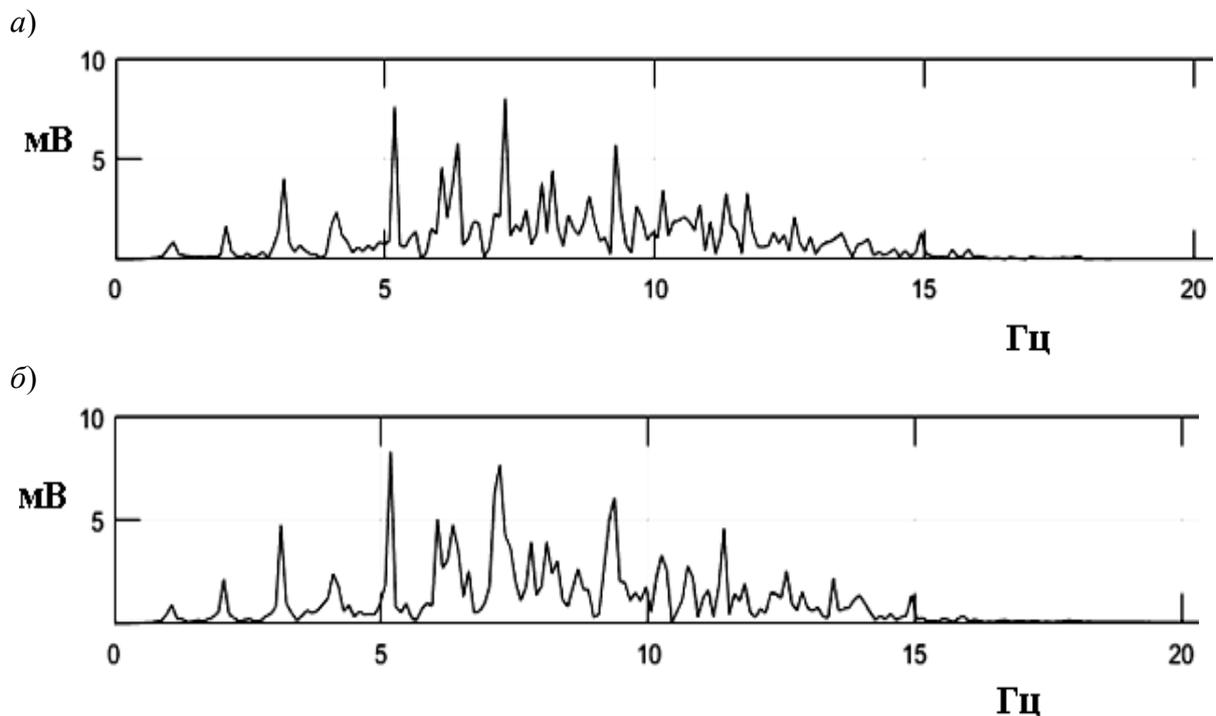


Рис. 7. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца: *а* – без нагрузки; *б* – с нагрузкой

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью вибронализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,89 и 1,32 м/с;
- пик-фактор составил 6,96 и 4,86;
- коэффициент эксцесса составил 1,08 и 0,17;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 8. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 6,59 и 13,82.

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника со сломанным звеном сепаратора.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,43 и 0,42 мВ;
- пик-фактор составил 6,19 и 3,87;
- коэффициент эксцесса составил 1,56 и 0,95;
- спектр сигнала приведен на рис. 9. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,54 и 2,48.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью вибронализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,08 и 1,74 м/с;
- пик-фактор составил 7,43 и 4,03;
- коэффициент эксцесса составил 0,96 и 0,11;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 10. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 11,95 и 17,86.

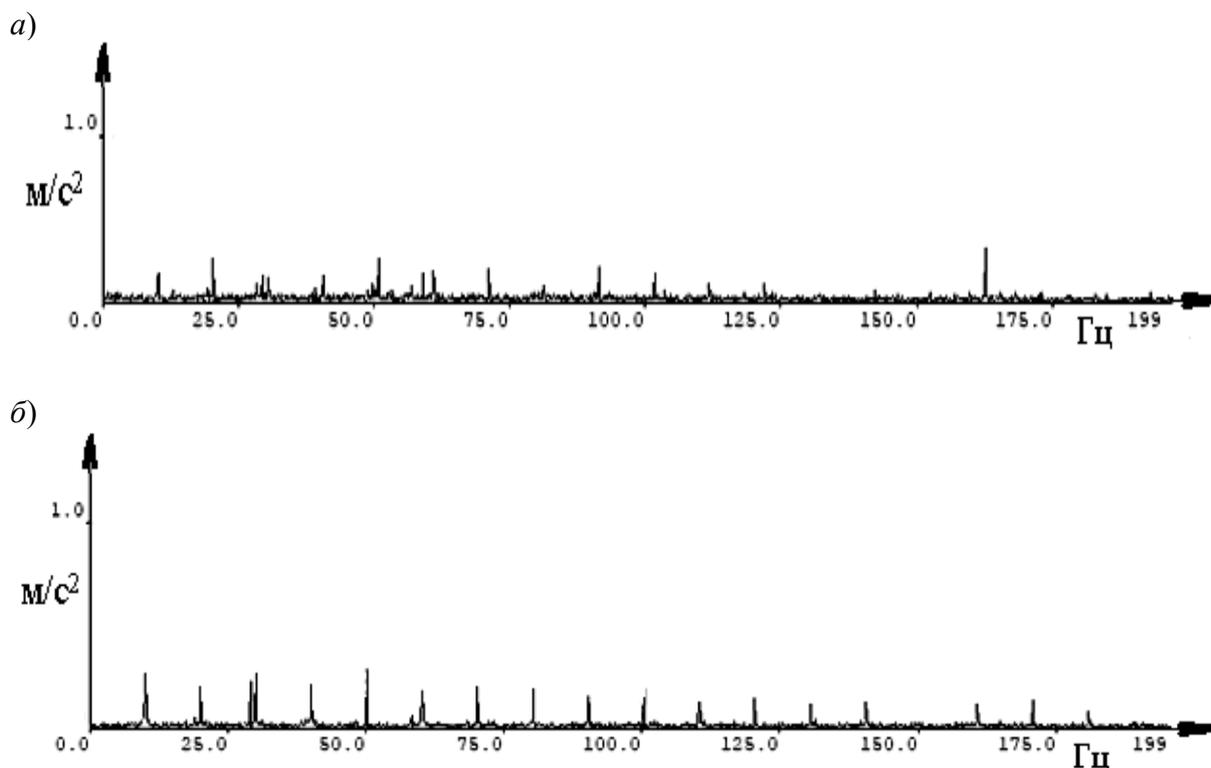


Рис. 8. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью вибронализатора BALTECH VP-3470, для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

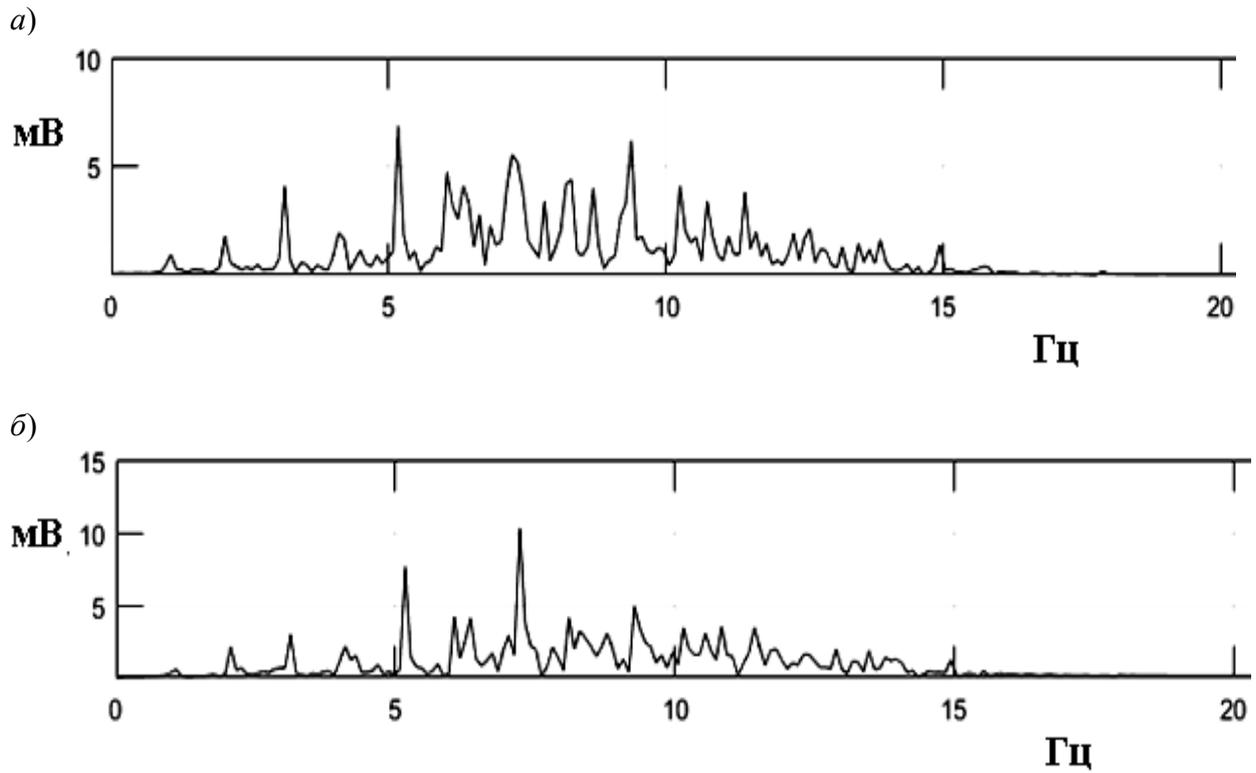


Рис. 9. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника со сломанным звеном сепаратора: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

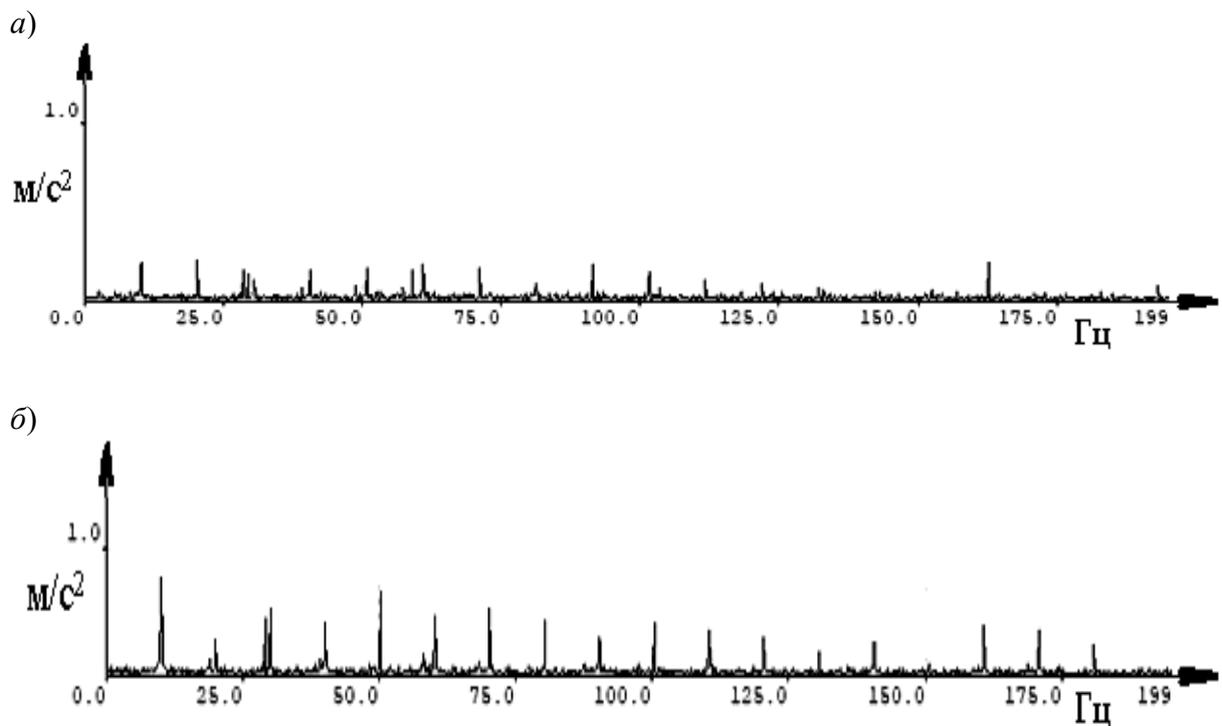


Рис. 10. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора VALTECH VP-3470, для подшипника со сломанным звеном сепаратора: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника с некачественной смазкой.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,44 и 0,48 мВ;
- пик-фактор составил 3,81 и 4,06;
- коэффициент эксцесса составил 0,98 и 2,37;
- спектр сигнала приведен на рис. 11. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 2,29 и 2,08.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,26 и 1,37 м/с;
- пик-фактор составил 5,24 и 4,41;
- коэффициент эксцесса составил 0,61 и 2,12;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 12. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 10,36 и 17,15.

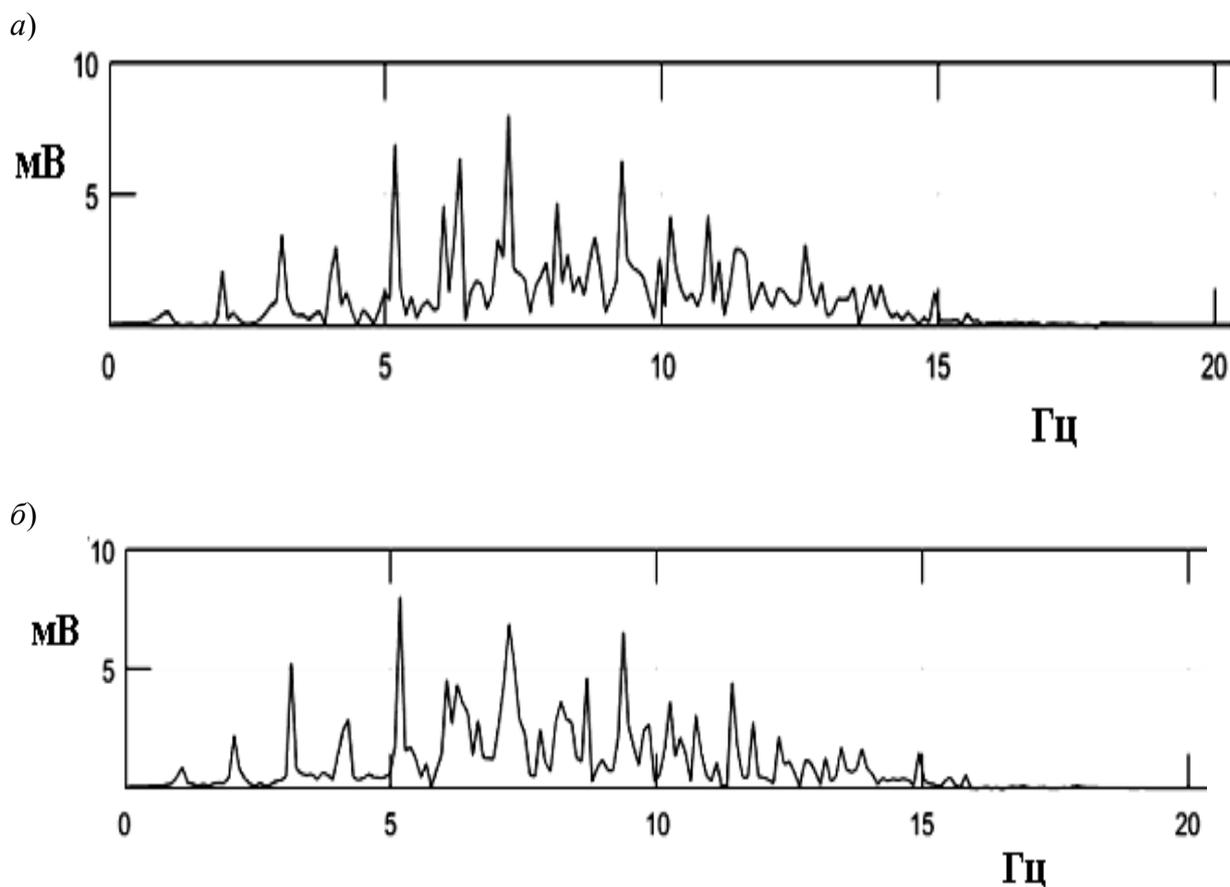


Рис. 11. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с некачественной смазкой: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

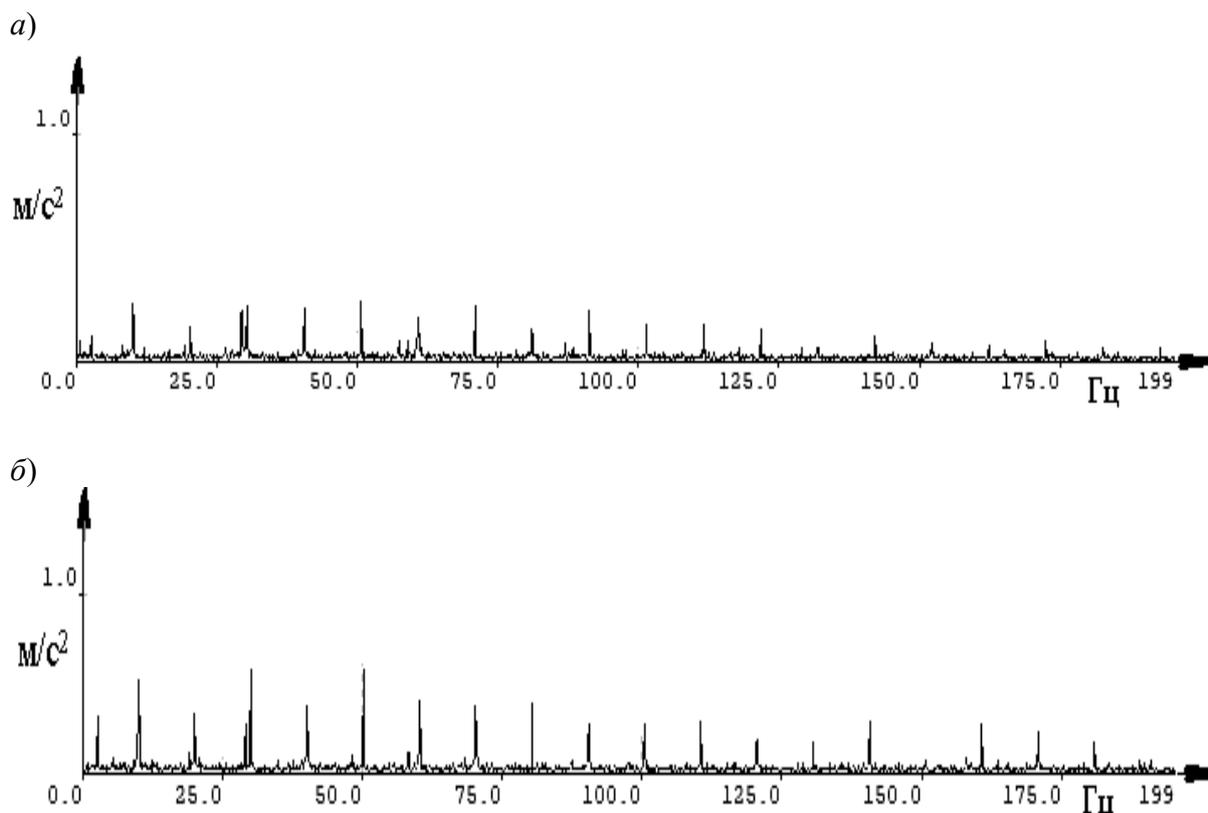


Рис. 12. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью вибронализатора VALTECH VP-3470, для подшипника с некачественной смазкой: *а* – без нагрузки; *б* – с нагрузкой

Анализ полученных результатов показывает, что диагностика по общему уровню вибрации (СКЗ виброскорости) не позволяет выявить приведенные дефекты. Также не удалось выявить ни одним из рассмотренных виброакустических методов диагностирования дефект в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца с диаметром 1,5 мм и глубиной 0,1 мм.

Износ беговой дорожки внутреннего кольца проявился при отсутствии нагрузки на валу при диагностике по методу пик-фактора. Превышение величины пик-фактора, по сравнению с новым подшипником, составило 1,6 при анализе сигнала с обоих измерительных приборов.

Дефект в виде сломанного звена сепаратора проявился также при отсутствии нагрузки на валу при диагностике по методу пик-фактора. Превышение

величины пик-фактора, по сравнению с новым подшипником, составило 1,7 при анализе сигнала с обоих измерительных приборов. Диагностика по спектру огибающей сигнала показала превышение, по сравнению с новым подшипником, пика амплитуды к СКЗ сигнала в 12 раз при отсутствии нагрузки на валу и в 18 раз при наличии нагрузки. На графике спектра сигнала для случая с нагрузкой на валу максимальная амплитуда была в 1,5 раза больше по сравнению с новым подшипником.

Диагностика подшипника качения с некачественной смазкой позволила выявить наличие дефекта по коэффициенту эксцесса при наличии нагрузки на валу и по спектру огибающей сигнала (пик амплитуды к СКЗ сигнала превысил эквивалентную величину для нового подшипника в 10 раз при отсутствии нагрузки на валу и в 17 раз при наличии

нагрузки). Также на спектре огибающей сигнала наблюдался пик на оборотной частоте.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило возможность применения методов (пик-фактор, коэффициент эксцесса, спектральный ана-

лиз сигнала) для обнаружения рассмотренных дефектов. Также подтверждена адекватность реализованных математических алгоритмов в Matlab на базе рассмотренных методов для анализа сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моргалик, Б. М.** Виброакустический контроль состояния элементов подшипников качения / Б. М. Моргалик, А. П. Прудников, Д. М. Ковалев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 60–68.
2. **Гаврилин, А. Н.** Диагностика технологических систем: учебное пособие: в 2 ч. / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2014. – Ч. 2. – 128 с.
3. **Бранцевич, П. Ю.** Цифровая обработка вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с. : ил.
4. **Попов, В. А.** Теория вероятностей: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 2: Случайные величины / В. А. Попов. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 45 с.
5. **Дедушев, С.** Экспертные вибродиагностические системы входного контроля подшипников / С. Дедушев // ТехСовет. – 2010. – № 9. – С. 20–22.

*Статья сдана в редакцию 12 сентября 2023 года*

Контакты:

prudnikovap85@gmail.com (Прудников Александр Петрович);  
borismorgalik@gmail.com (Моргалик Борис Маркович).

***A. P. PRUDNIKOV, B. M. MORGALIK***

#### **CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS**

##### **Abstract**

The article studies the main vibroacoustic methods for diagnosing rolling bearings. The results of diagnosing a new bearing and defective ones by using the methods under consideration are given. The results of diagnostics obtained using the software built into the vibration analyzer and mathematical algorithms implemented in Matlab are compared.

##### **Keywords:**

vibration, bearing, defect, diagnostics.

##### **For citation:**

Prudnikov, A. P. Condition monitoring and diagnostics of rolling bearings / A. P. Prudnikov, B. M. Morgalik // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 41–52.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_53

УДК 629.3

**С. А. РЫНКЕВИЧ**, *д-р техн. наук, доц.*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## СИСТЕМА БОРТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ АВТОСАМОСВАЛА

### Аннотация

Рассмотрены вопросы применения в конструкции карьерного самосвала с гидромеханической трансмиссией системы бортового диагностирования и мониторинга для оперативного определения технического состояния. Разработано математическое описание процессов функционирования гидромеханической передачи. На основе метода имитационного моделирования выявлены закономерности динамического регулирования фрикционных при автоматическом переключении передач, обеспечивающие снижение динамических нагрузок в трансмиссии и износа фрикционных дисков. Показаны экраны просмотра экспертной системы, где выводятся результаты анализа технического состояния трансмиссии.

### Ключевые слова:

гидромеханическая передача, карьерный самосвал, техническое состояние, мониторинг, бортовая система.

### Для цитирования:

Рынкевич, С. А. Система бортового диагностирования и мониторинга гидромеханической передачи автосамосвала / С. А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 53–60.

Применение современных автоматизированных трансмиссий на карьерных автосамосвалах с бортовыми системами управления и диагностирования повышает ресурс, увеличивает эффективность транспортной деятельности, обеспечивает комфорт и защищенность человека-водителя с качественным определением технического состояния машины.

Гидромеханическая коробка передач (ГМП) карьерного самосвала БелАЗ-7555, выбранная в качестве объекта исследования, изображена на рис. 1, а. Коробка передач (КП) является вальной и имеет четыре вала. Число пар трения фрикционных равно восемнадцати.

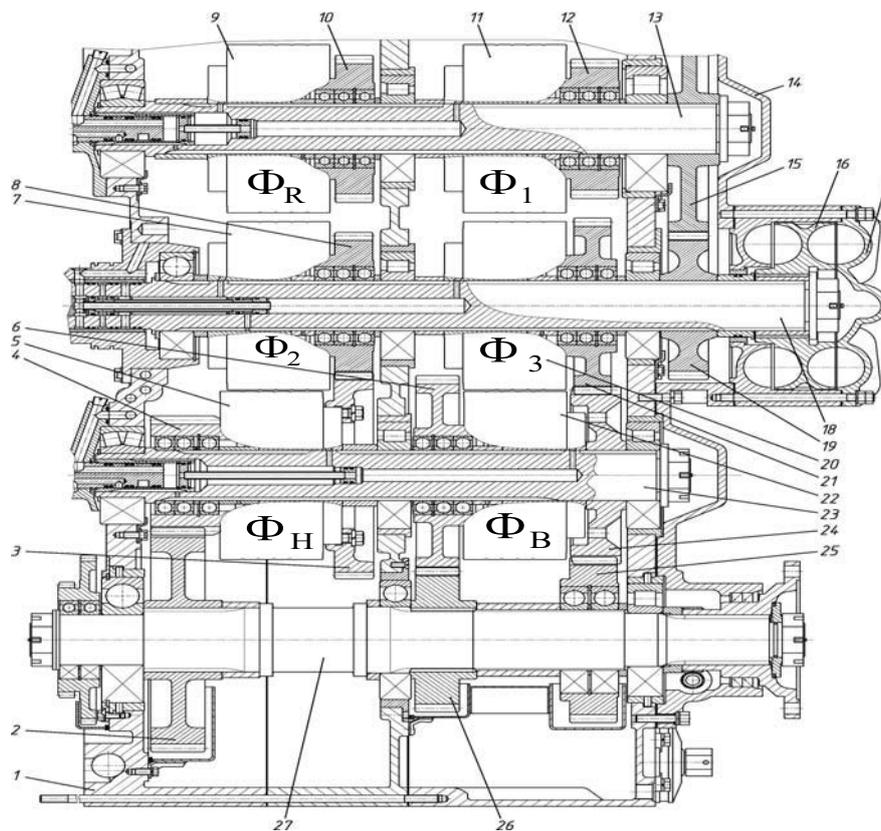
Фрикционы 7 и 20 второй и третьей ступеней ( $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ ) КП размещены на входном валу 18. Фрикционы первой ступени 11 и ступени реверса 9 ( $\Phi_R$ ) установлены на реверсивном валу.

Для того чтобы передать энергию маховика двигателя от турбины гидротрансформатора (ГТ) на промежуточный вал 23 КП, требуется осуществить замыкание одного из фрикционных КП. При этом включается нужная ступень (передача).

Рассмотрим пример. Предположим, требуется включить вторую ступень в КП (см. рис. 1, а). Для этого главное давление рабочей жидкости ГМП подводится к фрикциону 7. При срабатывании (замыкании) этого фрикциона ведущая шестерня 8 КП жестко блокируется с входным валом 18 и передает вращение промежуточному валу 23, который получает это вращение через находящуюся в зацеплении ведомую шестерню 3, закрепленную на корпусе фрикциона нижнего диапазона 5, установленного на валу 23 КП.

Первая и третья ступени и ступень реверса КП включаются аналогичным образом.

а)



б)

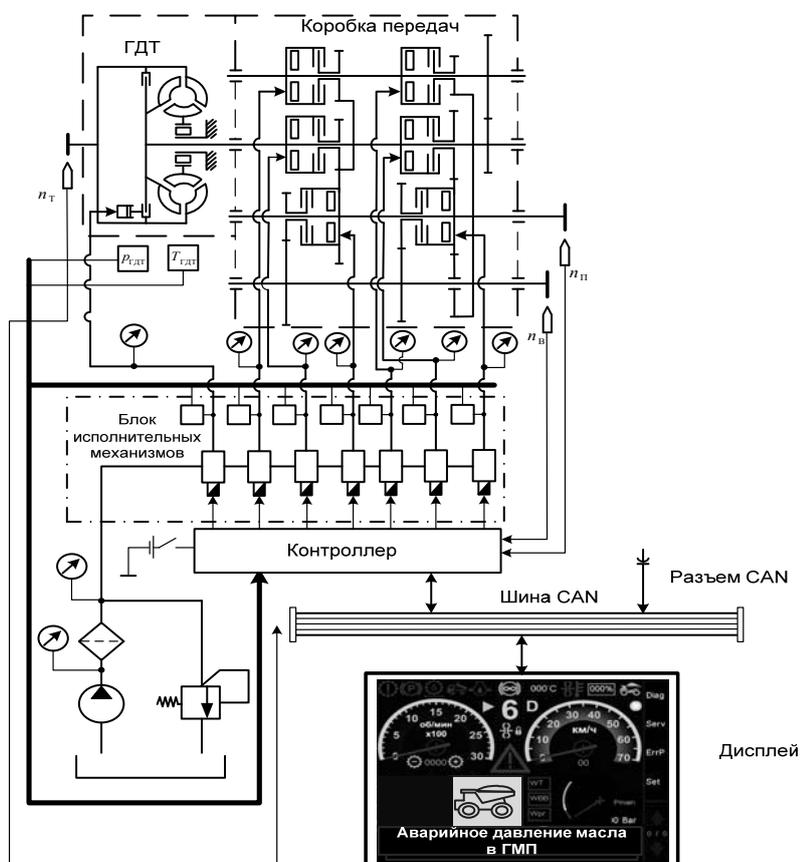


Рис. 1. Схемы ГМП карьерного автосамосвала (а) и системы ее бортового управления и диагностирования (СБУД) (б)

Особенностью данной КП является то, что на промежуточном валу 23 способны реализоваться три различные скорости вращения. Эти скорости соответствуют двум передачам переднего хода и одной заднего хода.

Благодаря диапазонным фрикционам  $\Phi_H$  и  $\Phi_B$  (поз. 5 и 22 соответственно) можно удвоить количество ступеней базовой КП (индексы «н» и «в» соответствуют нижнему и верхнему диапазону).

Схема и описание гидравлической системы гидромеханической трансмиссии ГМП автомобиля-самосвала БелАЗ-7555 достаточно подробно даны в [1, с. 101].

Модернизированная усилиями сотрудников кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета под руководством проф. В. П. Тарасика и специалистов ОАО «БелАЗ» электронно-гидравлическая система бортового управления и диагностирования (СБУД) ГМП показана на рис. 1, б.

СБУД и комплекс датчиков обмениваются данными через систему CAN (Control Area Network). CAN – это последовательный протокол связи с эффективной поддержкой распределения контроля в реальном времени и очень высоким уровнем безопасности. Подобные протоколы связи используются для организации передачи информации в сложных условиях, таких как среды с высоким уровнем различного рода помех. В связи с этим данный протокол передачи удобоприменим в автомобильной электронике. Появившийся на свет как стандарт промышленной сети, протокол CAN был ориентирован, прежде всего, на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и множества датчиков. Мультиплексная система передачи данных CAN может выполняться в виде высокоскоростной и среднескоростной шин.

Наличие в автомобиле CAN-шины открывает широкие возможности

для реализации практически неограниченного количества функций. Помимо высокоэффективной реализации основных функций по автоматическому управлению ГМП, появляются возможности электронного управления другими механизмами автомобиля – подвеской, кузовом, тормозной системой и т. д.

Имеется дисплей для просмотра диагностической информации. Входные каналы системы поступают от ряда датчиков, способных обрабатывать сигналы различной физической природы. К этим сигналам относятся механические, гидравлические, тепловые и электрические параметры и характеристики практически всех элементов ГМП.

Для получения данных о физических свойствах трансмиссии применено математическое моделирование. Поле экспликации, отражающее математическое описание гидромеханической трансмиссии, приведено далее. Заранее в модели примем следующие обозначения: EEMS (Elastic element of the mechanical system) и DEMS (Dissipative element of the mechanical system) – соответственно упругий и диссипативный элементы, которыми являются элементы валов и других деталей с упругими и диссипативными свойствами.

Упругие элементы EEMS, характеризуемые коэффициентами жёсткости, отображают упругие свойства соединения двигателя с гидромеханической передачей, вала турбины ГТ, карданной передачи к ведущему мосту, полуосей и окружной жёсткости шин ведущих колёс. Коэффициенты демпфирования DEMS учитывают диссипацию (рассеивание) энергии элементами соединений механизмов трансмиссии и шин.

Комплексный учет в модели элементов жёсткости и элементов рассеивания энергии позволяет с энергетических позиций отследить особенности функционирования и взаимодействия деталей и механизмов трансмиссии.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\omega_1}{dt} &= (M_{д} - M_{y1} - M_{д1})/J_1; \\
 \frac{d\omega_2}{dt} &= (M_{y1} + M_{д1} - M_{н}L_{н} - M_{ф6л}L_{6л})/J_2; \\
 \frac{d\omega_3}{dt} &= (M_{н}K_{тн}L_{н} + M_{ф6л}L_{6л} - M_{y2} - M_{д2})/J_3; \\
 \frac{d\omega_4}{dt} &= \left( M_{y2} + M_{д2} - \frac{M_{ф1}L_{ф1}}{u_{кп1,1}\eta_{кп1,1}} - \frac{M_{ф2}L_{ф2}}{u_{кп2,1}\eta_{кп2,1}} \right) / J_4; \\
 \frac{d\omega_5}{dt} &= (M_{ф1}L_{ф1}u_{кп1,2}\eta_{кп1,2} + M_{ф2}L_{ф2}u_{кп2,2}\eta_{кп2,2} - M_{y3} - M_{д3})/J_5; \\
 \frac{d\omega_6}{dt} &= (M_{y3} + M_{д3} - M_{ф3}L_{ф3} - M_{ф4}L_{ф4})/J_6; \\
 \frac{d\omega_7}{dt} &= (M_{ф3}L_{ф3}u_3\eta_3 + M_{ф4}L_{ф4}u_4\eta_4 - M_{y4} - M_{д4})/J_7; \\
 \frac{d\omega_8}{dt} &= \left( M_{y4} + M_{д4} - \frac{M_{y5} + M_{д5}}{u_0\eta_0} \right) / J_8; \\
 \frac{d\omega_9}{dt} &= \left( \frac{M_{y5} + M_{д5}}{u_k\eta_k} - M_{фк}L_{фк} \right) / J_9; \\
 \frac{d\omega_{10}}{dt} &= (M_{фк}L_{фк} - M_{y6} - M_{д6} - M_{f2})/J_{10}; \\
 \frac{d\omega_{11}}{dt} &= (M_{y6} + M_{д6} - M_{f1} - M_h - M_w)/J_{11},
 \end{aligned} \right\}$$

где  $M_{ф6л}, M_{ф1} \dots M_{ф4}$  – моменты трения фрикционов блокирования ГТ и ФМ ГМП;  $u_{кп1,1}, u_{кп2,1}, u_{кп1,2}, u_{кп2,2}$  – передаточные числа зубчатых колес в пределах входного и промежуточных валов КП;  $\eta_{кп1,1}, \eta_{кп2,1}, \eta_{кп1,2}, \eta_{кп2,2}$  – КПД зубчатых зацеплений;  $M_{д}$  – крутящий момент ДВС;  $K_{тн}$  – коэффициент, выражающий отношение момента на валу турбинного колеса к моменту на валу насосного колеса ГТ;  $u_3, u_4, \eta_3, \eta_4$  – передаточные числа и КПД зубчатых зацеплений понижающего и повышающего диапазонов КП;  $M_{y j}, j = \overline{1,6}$ ,  $M_{д j}, j = \overline{1,6}$  – моменты ЕEMS и DEMS;  $\omega_i, i = \overline{1,11}$  – угловые скорости

валов;  $M_{н}$  – момент насосного колеса ГТ;  $u_0, u_k$  – передаточные числа главной и колесной передач;  $\eta_0, \eta_k$  – их КПД;  $L_{6л}, L_{ф1} \dots L_{ф4}$  – функции состояний фрикционных муфт;  $L_{н}$  – функция состояния ГТ. Эти функции принимают дискретные значения.

Моменты трения ФМ ГМП с числом пар трения  $Z$  определяются по выражению

$$M_{ф} = \mu F_{сж} r_{э} z k_z,$$

где  $F_{сж}$  – сила, сжимающая диски;  $\mu$  – коэффициент трения материала;  $r_{э}$  – радиус трения (эквивалентный).

Функции  $L_{6л}, L_{ф1} \dots L_{ф4}$  могут

принимать значения 0 или 1, что зависит от состояния замыкания или размыкания ФМ.

Так, выражение для функции

$$L_{\text{бл}} = \begin{cases} 1 & \text{при } |\omega_2 - \omega_3| \leq \Delta \omega; \\ 0 & \text{при } |\omega_2 - \omega_3| > \Delta \omega, \end{cases}$$

где  $\Delta \omega$  – погрешность, принимаемая 0,05 рад/с.

Упругие элементы EEMS моделируют следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} dM_{y1}/dt &= c_1(\omega_1 - \omega_2); \\ dM_{y2}/dt &= c_2(\omega_3 - \omega_4); \\ dM_{y3}/dt &= c_3(\omega_5 - \omega_6); \\ dM_{y4}/dt &= c_4(\omega_7 - \omega_8); \\ dM_{y5}/dt &= c_5(\omega_8/u_0 - \omega_9 u_k); \\ dM_{y6}/dt &= c_6(\omega_9 - \omega_{10}). \end{aligned} \right\}$$

Выражения для диссипативных элементов DEMS похожи по структуре, только в левой части фигурирует величина  $M_{dj}$ , а в правой вместо  $c_j$  ставится  $\mu_j$ . Например, момент элемента DEMS описывается формулой  $M_{di} = \mu_i(\omega_i - \omega_{i+1})$ .

Единое вышеприведенное математическое описание дает возможность определить угловые скорости и угловые ускорения сосредоточенных масс и моменты в упругих трансмиссионных элементах.

Для того чтобы полностью решить систему ОДУ, в математическую модель добавлены четыре уравнения внешних воздействий.

$$M_{f1} = fm_{a1}gr_{k0};$$

$$M_{f2} = fm_{a2}gr_{k0},$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению;  $m_{a1}, m_{a2}$  – массы, нагружа-

ющие колеса переднего и заднего мостов;  $r_{k0}$  – радиус качения колеса.

Приведенные моменты сопротивления подъему и воздуха

$$M_h = m_a g h r_{k0};$$

$$M_w = k_w A_{\text{л}} v^2 r_{k0},$$

где  $k_w$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $m_a$  – масса машины;  $h$  – уклон дороги;  $A_{\text{л}}$  – лобовая площадь машины;  $v$  – скорость машины.

Однако сведения и данные о физических свойствах трансмиссии, полученные методом математического моделирования, будут неполными и недостаточными, если не добыть информацию о взаимозависимостях между выбранным вектором информационных переменных и назначенными критериями оценки технического состояния ГМП мобильной машины.

ФМ являются одним из «слабых звеньев» гидромеханической трансмиссии, в результате чего конструкция машины и элементы ее трансмиссии далеко не равнопрочные. Вследствие значительного износа даже многодисковые фрикционы подвергаются дефектам и быстро выходят из строя, что приводит к неизбежному исчерпанию ресурса.

Следует отметить, что для обеспечения плавности переключения передач в САУД ГМП автосамосвалов БелАЗ используется пропорциональное управление фрикционными муфтами (ФМ), что значительно снижает уровень трансмиссионных динамических нагрузок.

Работа ФМ, особенно в процессе замыкания дисков, носит циклически-периодический характер в области постоянно повышенных температур на поверхностях трения. Это неизбежно способствует короблению дисков и росту остаточного момента трения в выключенных ФМ, что снижает КПД трансмиссии и приводит к перекоосу и заеда-

нию дисков на шлицах как ведомой, так и ведущей полушлицы.

К другим опасным дефектам ФМ относятся: спекание фрикциона вследствие длительного буксования; односторонний предельный износ фрикционного слоя ведомого диска и отслаивание материалов от стальной основы; трещины дисков фрикциона и их поломки; деформации шлицев ведущей и ведомой частей ФМ с их последующим разрушением.

Принцип «слабого звена» широко используется в технике для защиты от опасностей в случае разрушения конструкций и устройств. Прогнозируя техническое состояние ослабленных элементов (в данном случае фрикционов), которые разрушаются при определенных предварительно рассчитанных факторах, можно обеспечить сохранность конструкций и устройств в целом.

В связи с изложенным, была поставлена задача исследовать влияние параметров регулирования ФМ на показатели технического состояния ГМП.

Необходимо было выбрать показатели анализа теплового состояния ФМ.

В качестве главного показателя была взята работа, затраченная на трение в период буксования фрикционной муфты, отнесенная к единице площади рабочей поверхности. Другими словами, это работа буксования  $W_{уд}$ , Дж/м<sup>2</sup>.

Такой показатель, как максимальный динамический момент на карданном валу  $M_{y4\max}$ , Н·м, позволил оценить динамическую нагруженность ГМП.

Движение машины с грузом моделировалось на персональном компьютере как имитационное движение по карьерному маршруту.

Ставилась задача определить, каким образом соотносятся между собой такие показатели, как скорость мобильной машины  $v_{п}$ , а также значения  $W_{уд}$ ,  $M_{y4\max}$  и величина длительности  $t_{п}$  перекрытия передач. Эту информацию можно в дальнейшем учитывать в алгоритме САУД ГМП.

Рис. 2 отражает полученные в ходе теоретических исследований результаты.

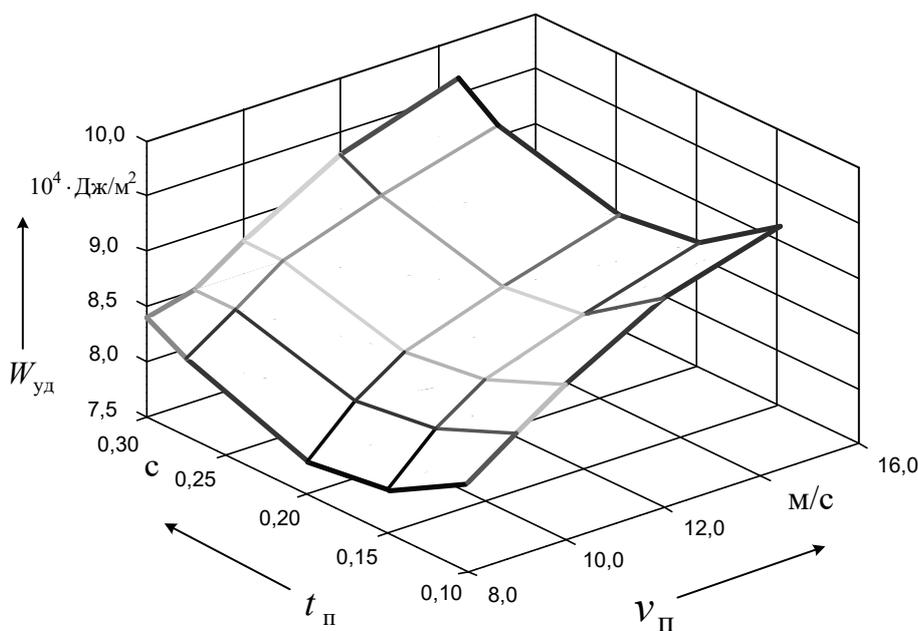


Рис. 2. Зависимость удельной работы буксования  $W_{уд}$  фрикционных дисков от параметров регулирования ГМП  $t_{п}$  и  $v_{п}$

Из рис. 2 хорошо видно, что построенные по результатам расчетов характеристики имеют явно нелинейный характер, причем с ростом скорости мобильной машины  $v_{II}$  значения  $W_{уд}$  увеличиваются.

Было установлено, что возрастают также и значения  $M_{y4\max}$  (данный график условно не приведен). Благодаря исследованиям была также выявлена интересная деталь.

Оказывается, существуют важные области, которые характеризуются благоприятным сочетанием варьируемых факторов  $t_{II}$  и  $v_{II}$ . При этом работа трения в период буксования фрикционной муфты, отнесенная к единице площади рабочей поверхности, снижается, что обеспечивает уменьшение интенсивности изнашивания дисков фрикционов.

Таким образом, фрикционы превращаются в «сильное звено» трансмиссии, что в итоге повышает ресурс машины. Важным является то, что установленные области соответствуют временному

диапазону длительности  $t_{II}$  перекрытия ступеней в КП в пределах 0,16...0,23 с.

Для своевременной и оперативной оценки технического состояния и прогнозирования возникновения неисправностей в трансмиссии были разработаны алгоритмы диагностирования и мониторинга.

Некоторые алгоритмы диагностирования мобильного применения, которые были апробированы на автосамосвалах БелАЗ, приведены в [1, 2].

На рис. 3 показаны экраны просмотра экспертной диагностической системы ГМП. Слева изображена картинка, показывающая датчики исполнительных механизмов переключения ступеней самосвала. Правый рисунок иллюстрирует панель индикации в кабине водителя, где отмечены важные параметры, такие как номер включенной передачи, состояние блокировки ГТ, степень загрузки автосамосвала, давление и температура масла в коробке передач, скорость автомобиля, частота вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и др.



Рис. 3. Экраны просмотра экспертной диагностической системы ГМП

По желанию заказчика (покупателя карьерной техники) конфигурация графических окон просмотра эксперт-

*Машиностроение*

ной системы (дисплеев в кабине водителя) может быть изменена. На панели индикации могут быть добавлены до-

полнительные опции или изменены меню и пиктограммы.

**Основные выводы.**

1. С использованием новых методик и выявленных взаимозависимостей между изменениями диагностических параметров и характеристик разработана система бортового диагностирования и мониторинга ГМП и ее алгоритмы функционирования, что обеспечивает своевременную оценку и прогнозирование технического состояния гидромеханической трансмиссии.

2. С помощью имитационного моделирования движения груженого карьерного автосамосвала получены рекомендации по динамическому регулированию +замыкания фрикционов при автоматическом переключении ступеней, реализация которых в алгоритмах диагностирования и мониторинга технического состояния обеспечивает снижение динамических нагрузок в трансмиссии и уменьшает истощение ресурса фрикционных дисков ГМП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Технологии искусственного интеллекта в диагностировании автотранспортных средств / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 280 с. : ил.
2. **Рынкевич, С. А.** Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.

*Статья сдана в редакцию 3 октября 2023 года*

Контакты:  
rynkev@tut.by (Рынкевич Сергей Анатольевич).

**S. A. RYNKEVICH**

**SYSTEM FOR ON-BOARD DIAGNOSTICS AND MONITORING OF DUMP TRUCK HYDROMECHANICAL TRANSMISSION**

**Abstract**

The paper considers the application of an on-board diagnostics and monitoring system in the design of a mining dump truck with hydromechanical transmission to promptly determine its technical condition. A mathematical description of the hydromechanical transmission functioning processes has been developed. Based on the simulation modeling method, patterns of dynamic regulation of friction clutches during automatic gear shifting have been identified, which reduce dynamic loads in the transmission and wear of friction discs. Display screens of the expert system are shown, which display results of analyzing the technical condition of transmission.

**Keywords:**

hydromechanical transmission, mining dump truck, technical condition, monitoring, on-board system.

**For citation:**

Rynkevich, S. A. System for on-board diagnostics and monitoring of dump truck hydromechanical transmission / S. A. Rynkevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 53–60.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_61

УДК 519.876.5:621.878

*Д. М. СВИРЕПА, канд. техн. наук, доц.*

*М. В. ТАРАДЕЙКО*

*И. А. ТАРАДЕЙКО*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМ НАКАТЫВАНИЕМ И ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

### **Аннотация**

Предложена математическая модель процесса совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Получены аналитические зависимости, описывающие кинематические характеристики деформирующего шара в момент взаимодействия его с шаром-отражателем, движением к обрабатываемой детали после его взаимодействия с шаром-отражателем и его взаимодействие с поверхностью обрабатываемой детали.

### **Ключевые слова:**

совмещенная обработка, пластическое деформирование, магнитное поле, ферромагнитная деталь, деформирующие шары, шары-отражатели, импульсно-ударное накатывание, ударное взаимодействие.

### **Для цитирования:**

Свирепа, Д. М. Математическое моделирование процесса совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем / Д. М. Свирепа, М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 61–69.

### **Введение**

Известны методы поверхностно-пластического деформирования с использованием энергии магнитного поля [1–6].

Обработка методом совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем позволяет получить поверхность с низкой шероховатостью, модифицированный поверхностный слой, обладающий новыми физико-механическими свойствами, обеспечив тем самым высокие качественные и эксплуатационные характеристики упрочненных поверхностей. Однако отсутствие научно обоснованных рекомендаций по применению данного метода не позволяет определить его оптимальные конструкторские, тех-

нологические и эксплуатационные характеристики. С этой целью и необходимо провести математическое моделирование процесса совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. В предыдущих исследованиях авторами получена система дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя при обработке наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Найдены начальные, текущие и конечные условия для численного интегрирования дифференциальных уравнений и определения кинематических характеристик деформирующего шара при различных режимах

обработки и конструктивных параметрах устройства для импульсно-ударного накатывания [7]. Однако отсутствует математическое описание других фаз движения деформирующего шара: взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем; перемещения деформирующего шара к детали после его взаимодействия с шаром-отражателем; взаимодействия деформирующего шара с поверхностью вращающегося вала.

### Объект исследования

Разработана конструкция инструмента, позволяющая осуществлять высокопроизводительную обработку импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем [8, 9]. Детали, входящие в состав инструмента, изготавливались с использованием аддитивных технологий.

Исследуемый инструмент был изготовлен и его фотография представле-

на на рис. 1.

Инструмент содержит следующие основные элементы: диски 1, 2, внутренние поверхности которых образуют внутреннюю 3 и внешнюю 4 кольцевые камеры, в которых расположены деформирующие шары 5 и шары-отражатели 6 соответственно; цилиндрические постоянные магниты, расположенные в аксиальных отверстиях дисков 1, 2 (цилиндрические постоянные магниты и аксиальные отверстия на рисунке не показаны); магнитопроводы 7, 8, предназначенные для модифицирования наружных поверхностей тел вращения вращающимся магнитным полем; зубчатые магнитопроводы 9, 10, предназначенные для привода деформирующих шаров 5 для осуществления импульсно-ударного накатывания. Магнитопроводы 7, 8 и зубчатые магнитопроводы 9, 10 контактируют с торцами цилиндрических постоянных магнитов.

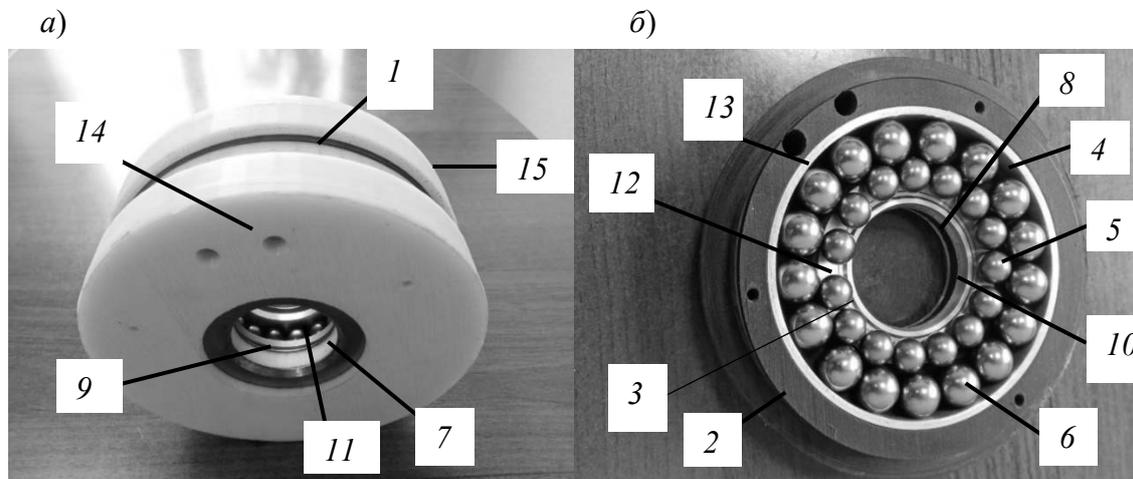


Рис. 1. Инструмент для совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем: а – вид инструмента в сборе; б – обойма инструмента с расположенными в нем деформирующими шарами и шарами-отражателями

Диски 1, 2 инструмента изготовлены из ABS-пластика методом аддитивного синтеза, с целью создания более легкой конструкции инструмента из немагнитопроводного материала. Для обеспечения стойкости инструмента диски 11, 12 для установки деформиру-

ющих шаров 5 и беговое кольцо 13 для опоры шаров-отражателей 6 изготавливаются из немагнитопроводных сталей и сплавов.

Инструмент содержит также крышки 14, 15, предназначенные для сборки инструмента и закрепления его в

технологическом оборудовании.

При разработке математической модели введем следующие допущения [7, 10]:

- продольная ось инструмента располагается горизонтально;

- рассматриваем движение одного деформирующего шара, т. к. все деформирующие шары инструмента находятся в одинаковых условиях;

- исследуем относительное движение деформирующего шара в плоскости, перпендикулярной продольной оси инструмента в подвижной системе координат;

- деформирующий шар и шар-отражатель рассматриваем как материальные точки с массами, помещенными в центр сфер соответствующих радиусов;

- магнитное взаимодействие между деформирующими шарами инструмента отсутствует;

- сила магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной детали и зубьям магнитопровода направлена по линии, соединяющей их геометрические центры;

- источники магнитного поля инструмента расположены с равномерным угловым шагом;

- на поверхности ферромагнитного вала источники магнитного поля инструмента создают однородное магнитное поле;

- при исследовании ударных явлений пренебрегаем неударными силами;

- перемещением тел за время удара пренебрегаем, считая их неподвижными.

### **Моделирование взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем**

В процессе отделочно-упрочняющей обработки происходит периодическое соударение деформирующего шара и шара-отражателя. При этом допускаем, что удар является косым центральным (удар, при котором импульсы силы

направлены по линии, соединяющей геометрические центры взаимодействующих шаров). Ударным трением в зоне контакта шаров пренебрегаем.

Коэффициент восстановления при ударе, определяющий долю потери энергии, необходимый для исследования ударного взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем, определим по формуле [10]

$$K = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – угол падения деформирующего шара,  $\alpha_1 = (\vec{v}_{c1} \wedge \vec{n})$ ;  $\vec{v}_{c1}$  – вектор скорости центра масс деформирующего шара в момент начала удара;  $\vec{n}$  – орт нормали, проведенный к поверхности приводного шара в точке контакта;  $\alpha_2$  – угол отражения деформирующего шара,  $\alpha_2 = (\vec{u}_{c1} \wedge -\vec{n})$ ;  $\vec{u}_{c1}$  – вектор скорости центра масс деформирующего шара в момент окончания удара [10].

Определим проекции скорости деформирующего шара на оси  $n$  и  $\tau$  в начальный момент удара деформирующего шара о шар-отражатель:

$$v_{1\tau} = \dot{y} \cdot \sin \gamma_1 + \dot{x} \cdot \cos \gamma_1; \quad (2)$$

$$v_{1n} = -\dot{y} \cdot \cos \gamma_1 + \dot{x} \cdot \sin \gamma_1; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{v_{1\tau}}{v_{1n}} = \frac{\dot{y} \cdot \sin \gamma_1 + \dot{x} \cdot \cos \gamma_1}{-\dot{y} \cdot \cos \gamma_1 + \dot{x} \cdot \sin \gamma_1}. \quad (4)$$

Угол отражения деформирующего шара определяется как

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{\dot{y} \cdot \sin \gamma_1 + \dot{x} \cdot \cos \gamma_1}{-\dot{y} \cdot \cos \gamma_1 + \dot{x} \cdot \sin \gamma_1} \cdot \frac{1}{K}, \quad (5)$$

где  $\gamma_1$  – угол между нормалью  $n$  и осью  $Oy$ .

В соответствии с рис. 2 угол можно определить как [10]

$$\gamma_1 = \gamma - \pi/2. \quad (6)$$

$$\frac{CN}{\sin \alpha} = \frac{ON}{\sin \gamma}. \quad (7)$$

Рассмотрев  $\Delta OCN$ , запишем выражение из теоремы синусов:

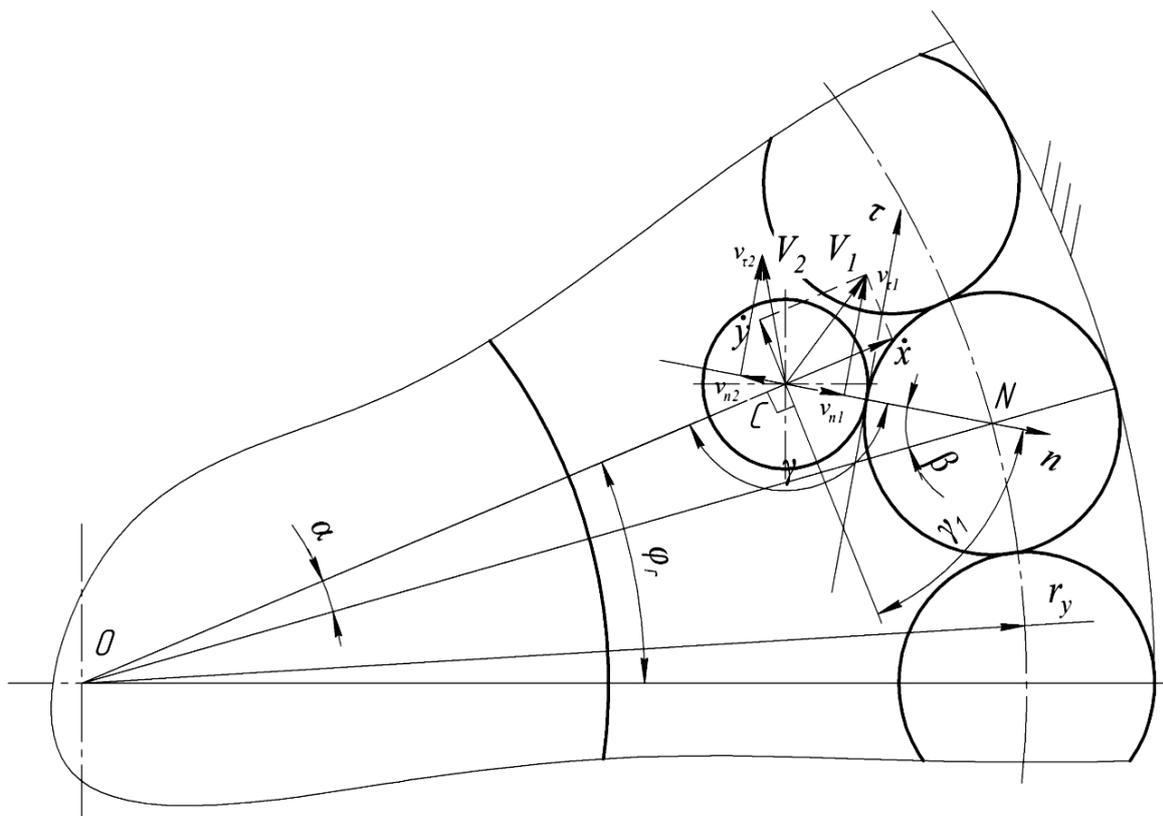


Рис. 2. Расчетная схема ударного взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем

Из геометрических параметров инструмента следует, что

$$CN = r_{du} + r_{uo}; \quad ON = R_{uo}, \quad (8)$$

где  $r_{du}, r_{uo}, R_{uo}$  – радиусы деформирующего шара, шара-отражателя и установки шаров-отражателей во внешней кольцевой камере соответственно.

Угол  $\alpha$  определяется от положения деформирующего шара в начале удара по следующей зависимости:

$$\alpha = \varphi_r - \frac{2\pi}{z_0} \cdot i_0, \quad (9)$$

где  $z_0, i_0$  – количество шаров-отражателей, установленных в кольцевой камере инструмента и порядковый номер

шара-отражателя, с которым столкнулся деформирующий шар, соответственно.

Порядковый номер шара-отражателя, с которым столкнулся деформирующий шар, определяется как «пол» следующего числа:

$$i_0 = \left\lfloor \frac{\varphi_r}{2\pi/z_0} \right\rfloor. \quad (10)$$

Подставляя (8)–(10) в (7) и проводя преобразования, получаем

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{(r_{du} - r_{uo}) \cdot \sin \left( \varphi_r - \frac{2\pi}{z_0} i_0 \right)}{R_{uo}} \right). \quad (11)$$

Скорости деформирующих шаров после удара можно записать как [10]

$$u_{2\tau} = v_{2\tau}; \quad (12)$$

$$u_{2n} = \frac{v_{1\tau}}{\operatorname{tg}\alpha_2} = (-\dot{y} \cdot \cos \gamma_1 + \dot{x} \cdot \sin \gamma_1) \cdot K. \quad (13)$$

Проекции вектора скорости на оси  $X$  и  $Y$  в конце удара следующие:

$$v_{2x} = u_{2n} \cdot \sin \gamma_1 + u_{2\tau} \cdot \cos \gamma_1; \quad (14)$$

$$v_{2y} = u_{2n} \cdot \cos \gamma_1 + u_{2\tau} \cdot \sin \gamma_1. \quad (15)$$

После подстановки и преобразований

$$v_{2x} = (1 - K) \dot{y} \cdot \cos \gamma_1 \sin \gamma_1 + \dot{x} \cdot \cos^2 \gamma_1 (K \cdot \operatorname{tg} \gamma_1 + 1); \quad (16)$$

$$v_{2y} = \dot{y} \cdot \cos^2 \gamma_1 (\operatorname{tg} \gamma_1 - K) + \dot{x} \cdot \sin \gamma_1 \cos \gamma_1 (K + 1). \quad (17)$$

**Моделирование перемещения деформирующего шара к детали после его взаимодействия с шаром-отражателем**

Запишем основное уравнение динамики относительного движения деформирующего шара (рис. 3):

$$m_1 \vec{a}_r = \vec{F}_{MD} + \vec{F}_{M3} + \vec{G}, \quad (18)$$

где  $\vec{F}_{MD}$ ,  $\vec{F}_{M3}$  – составляющие силы магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной поверхности детали и зубьям магнитопровода соответственно;  $\vec{G}$  – сила тяжести деформирующего шара (пренебрегаем, ввиду ее низкого значения).

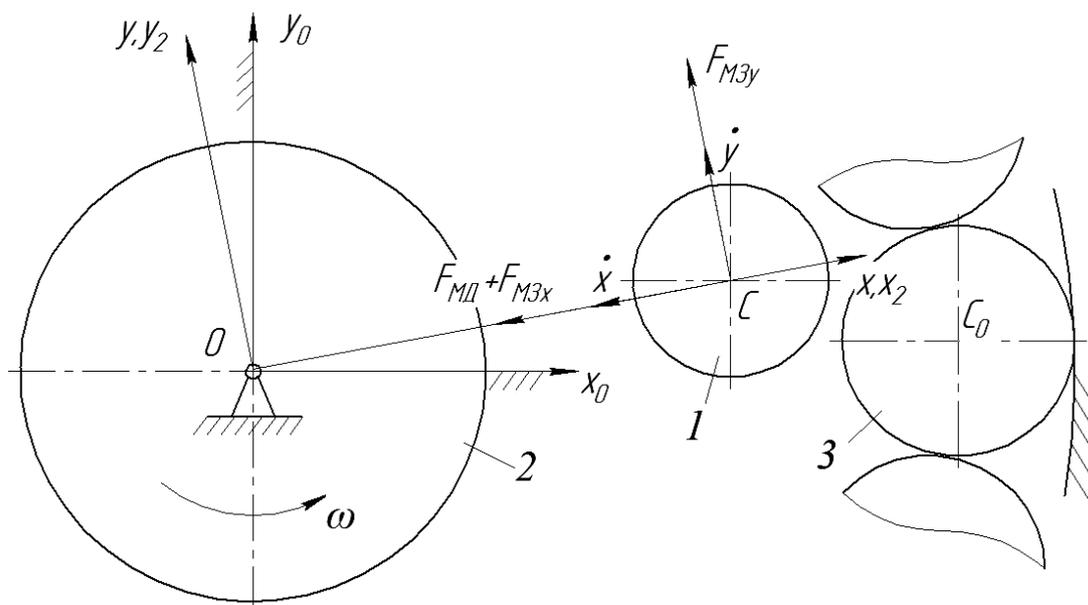


Рис. 3. Расчетная схема перемещения деформирующего шара к упрочняемой поверхности детали после его взаимодействия с шаром-отражателем: 1 – деформирующий шар; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала; 3 – шар-отражатель

С учетом определенных сил [7] и принятых допущений запишем урав-

нение (18) в проекциях компонентов на оси координат  $Ox$  в форме Коши:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m_1} \left( -A_1 (r - r_1)^{-b_1} - A_2 r_{31}^{-b_2} \left( \cos \gamma_1 + \left( \frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 \right) \right) \cos \varphi_r; \\ \ddot{y} = \frac{1}{m_1} \left( -A_1 (r - r_1)^{-b_1} - A_2 r_{31}^{-b_2} \left( \sin \gamma_1 + \left( \frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 \right) \right) \sin \varphi_r, \end{cases} \quad (19)$$

где  $A_1, b_1$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля и материала упрочняемой детали и деформирующего шара;  $A_2, b_2$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля, формы зубьев и материала зубчатого магнитопровода;  $r$  – расстояние между геометрическими центрами деформирующего шара и ферромагнитной детали;  $r_1$  – радиус ферромагнитного вала;  $r_{31}, r_{32}$  – расстояния от центра деформирующего шара до смежных зубьев магнитопровода;  $\varphi_r$  – угол поворота деформирующего шара относительно неподвижной системы координат  $xOy$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – углы смещения деформирующего шара относительно смежных зубьев магнитопровода.

Указанные параметры описаны в ходе предыдущих исследований [7].

При решении системы (19) методами численного интегрирования следует соблюдать граничные условия координат центра масс и скорости деформирующего шара:

– начальные

$$t = t_0; \quad x = x_k; \quad y = y_k;$$

$$\dot{x} = \dot{x}_k; \quad \dot{y} = \dot{y}_k; \quad \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r_k;$$

– текущие

$$t = t; \quad x = x; \quad y = y;$$

$$\dot{x} = \dot{x}; \quad \dot{y} = \dot{y}; \quad \sqrt{x^2 + y^2} = r;$$

– конечные

$$t = t_k; \quad x = r_1 + r_2; \quad y = 0;$$

$$\dot{x} = \dot{x}_k; \quad \dot{y} = \dot{y}_k; \quad \sqrt{x_k^2 + y_k^2} = r_1 + r_2,$$

где  $t_0, t_k, x_0, x_k, y_0, y_k, \dot{x}_0, \dot{x}_k, \dot{y}_0, \dot{y}_k$  – время, координаты центра деформирующего шара и проекции его скорости на оси  $Ox$  и  $Oy$  в начальный и конечный момент фазы его движения от шара-отражателя до поверхности детали соответственно.

### Моделирование взаимодействия деформирующего шара с поверхностью вращающегося вала

Рассмотрим ударное взаимодействие деформирующего шара с поверхностью вращающегося вала (рис. 4) [10].

Запишем проекции скорости центра масс деформирующего шара на нормаль  $n$  и бинормаль  $\tau$  в соответствии с теорией удара:

$$u_{1n} = k |\dot{x}_k|; \quad (20)$$

$$v_{1\tau} = u_{1\tau} = \dot{y}_k; \quad (21)$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{u_{1\tau}}{u_{1n}} = \frac{\omega r_n}{k \dot{x}_k}, \quad (22)$$

где  $\beta_2$  – угол отражения деформирующего шара,  $\beta_2 = (\vec{u}_{1c} \wedge \vec{n})$ ;  $\vec{u}_{1c}$  – вектор

скорости центра масс деформирующего шара в момент окончания удара;  $\vec{n}$  – единичный орт нормали, проведенный к поверхности вращаемого ва-

ла [10];  $k$  – коэффициент восстановления материала детали при ударе по ней деформирующего шара.

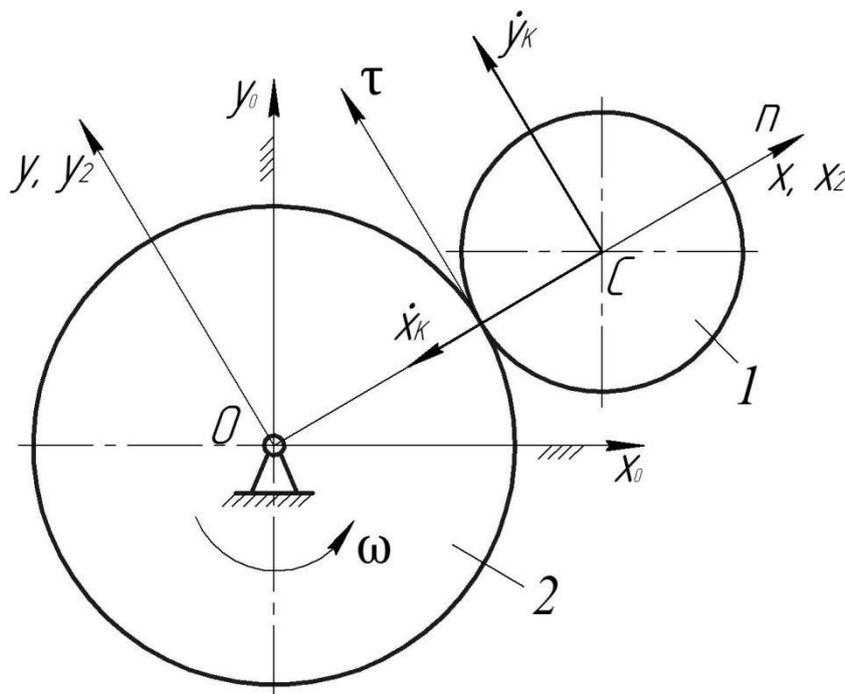


Рис. 4. Схема ударного взаимодействия деформирующего шара с поверхностью обрабатываемого вала: 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение вращаемого вала

Энергия пластического деформирования микронеровностей поверхности, за некоторым вычетом малой части энергии, затраченной на нагрев материала, равна потерянной кинетической энергии деформирующего шара при ударе.

В соответствии с теоремой Карно кинетическая энергия, которая затрачивается при ударе, определяется как [11]:

$$T_{\text{КП}} = \frac{1-k}{1+k} \left( \frac{1}{2} m_1 (v_{1n} - u_{1n})^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_{2n} - u_{2n})^2 \right),$$

где  $v_{1n}, u_{1n}, v_{2n}, u_{2n}$  – проекции скоро-

стей до и после удара деформирующего шара и упрочняемой детали соответственно.

Так как  $v_{1n} = \dot{x}_k, u_{1n} = k\dot{x}_k, v_{2n} = u_{2n}$ , то

$$T_{\text{КП}} = \frac{m_1 \dot{x}_k^2 (1-k)^3}{2(1+k)}. \quad (23)$$

Окончательно получим начальные условия при отрыве деформирующего шара от детали и выходе его на рабочий режим упрочняющей обработки:

$$t_0 = 0; \quad x_0 = r_1 + r_2 = r_n;$$

$$y_0 = 0; \quad \dot{x}_0 = u_{1n} = k\dot{x}_k, \quad \dot{y}_0 = \omega r_n.$$

### Заключение

В результате математического моделирования рассмотрено ударное взаимодействие деформирующего шара и шара-отражателя, получена система дифференциальных уравнений, описывающая кинематику движения деформирующего шара после его взаимодействия с шаром отражателем при совмещенной обработке наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Найдены начальные и конечные условия для численного интегрирования дифференциальных уравнений и определения кинематических ха-

рактеристик деформирующего шара при различных режимах и конструктивных параметрах комбинированного инструмента. Получены аналитические зависимости для определения скорости деформирующего шара в момент его взаимодействия с упрочняемой поверхностью ферромагнитного вращающегося вала.

В результате математического моделирования процесса совмещенной обработки наружных поверхностей вращения импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем получено выражение, определяющее долю затраченной энергии на пластическую деформацию.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Довгалец, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалец. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
2. **Малыгин, Б. В.** Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б. В. Малыгин. – Москва: Машиностроение, 1989. – 112 с.
3. **Скворчевский, Н. Я.** Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.
4. **Таранов, А. С.** Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А. С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 2. – С. 44–45.
5. **Довгалец, А. М.** Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 10–15.
6. Упрочняющий инструмент: пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 28.02.2012.
7. Математическое моделирование процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 3. – С. 16–25.
8. **Тарадейко, М. В.** Двухрядный инструмент для импульсно-ударного деформирования / М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 62.
9. **Тарадейко, М. В.** Конструкция инструмента для совмещенного магнитно-динамического накатывания наружных поверхностей вращения / М. В. Тарадейко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 34–35.
10. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности вращения / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 25–34.
11. **Вильке, В. Г.** Теоретическая механика / В. Г. Вильке. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГУ, 1998. – 272 с.

Статья сдана в редакцию 27 сентября 2023 года

Контакты:

svdima@tut.by (Свирепа Дмитрий Михайлович);

IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Марина Вадимовна);

IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Иван Анатольевич).

***D. M. SVIREPA, M. V. TARADEIKO, I. A. TARADEIKO***

## **MATHEMATICAL MODELING OF COMBINED PROCESSING OF EXTERNAL SURFACES OF ROTATION BY USING IMPULSE-IMPACT ROLLING AND A ROTATING MAGNETIC FIELD**

### **Abstract**

A mathematical model of combined processing of external surfaces of rotation by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field is proposed. Analytical dependencies were obtained that describe the kinematic characteristics of the deforming ball at the moment of its interaction with the reflecting ball, its movement towards the workpiece after the interaction with the reflecting ball and its interaction with the workpiece surface.

### **Keywords:**

combined processing, plastic deformation, magnetic field, ferromagnetic part, deforming balls, reflecting balls, impulse-impact rolling, impact interaction.

### **For citation:**

Svirepa, D. M. Mathematical modeling of combined processing of external surfaces of rotation by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field / D. M. Svirepa, M. V. Taradeiko, I. A. Taradeiko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 61–69.

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_70

УДК 534.86

**В. И. БОРИСОВ**, д-р физ.-мат. наук, проф.

**С. С. СЕРГЕЕВ**, канд. техн. наук, доц.

**Е. Н. ПРОКОПЕНКО**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

### АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЛИНЗОЙ ФРЕНЕЛЯ

#### Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения фокусирующих акустических преобразователей на основе акустических линз Френеля, представляющих собой кольцевую ступенчатую структуру, находящуюся в акустическом контакте с круглой пьезопластиной. Показано, что акустическое поле излучения таких пьезопреобразователей имеет схожие закономерности, как и для пьезопреобразователей в виде активных вогнутых концентраторов акустических волн.

#### Ключевые слова:

акустическое поле, фокусирующий пьезопреобразователь, пьезопластина, акустическая ось, ближняя зона, дальняя зона, акустическая волна, акустическое давление, линза Френеля, фокальная плоскость, фокус.

#### Для цитирования:

Борисов, В. И. Акустическое поле излучения пьезоэлектрического преобразователя с линзой Френеля / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 70–75.

#### Введение

Фокусирующие пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) в фокальной плоскости имеют минимальный поперечный размер генерируемого акустического пучка, что позволяет увеличить чувствительность и пространственную разрешающую способность неразрушающего акустического контроля при использовании их в качестве источников ультразвука.

Формы и конструкции применяемых в практике фокусирующих ПЭП разнообразны. Их разнообразие определяется как типом используемых излучателей, так и характером их расположения [1–4].

#### Основная часть

Применение фокусирующих ПЭП в виде активных вогнутых концентраторов акустических волн в качестве источников ультразвука при проведении неразрушающего акустического контроля приводит к трудностям удержания контактной жидкости в зазоре между поверхностью ПЭП и объектом контроля из-за большой величины зазора, уменьшение которого можно реализовать при использовании в качестве фокусирующего элемента акустического аналога оптической линзы Френеля [5].

Схема ПЭП с линзой Френеля приведена на рис. 1. Пьезопреобразователь состоит из круглой пьезопласти-

ны 1, в акустическом контакте с которой расположена линза Френеля 2, представляющая собой кольцеобразную ступенчатую структуру, выполненную из материала, скорость ультразвука в котором больше, чем скорость в среде, на которую нагружен пьезопреобразователь. Путем выбора толщины ступенек линзы  $h$  можно рассчитать фокусное расстояние линзы. Для выбранного фокусного расстояния акустические волны, генерируемые разными участками пьезопластины, должны приходить в фокальную точку в одной фазе. Это приводит к тому, что акустический путь (произведение модуля волнового вектора на геометрический путь) акустиче-

ских волн, проходящих через каждую ступеньку линзы Френеля в соответствии с рис. 1, удовлетворяет следующему выражению, которое позволяет рассчитать толщину ступенек линзы для выбранного значения фокусного расстояния линзы:

$$\frac{2\pi}{\lambda_1} h + \frac{2\pi}{\lambda_2} R = \text{const},$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – длина акустической волны в материале линзы и материале среды, в которой происходит фокусировка акустических волн, соответственно.

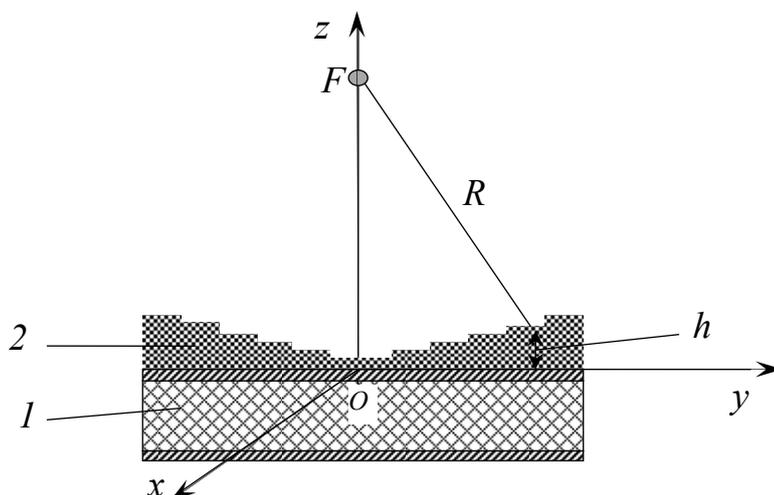


Рис. 1. Схема осевого сечения фокусирующего ПЭП с линзой Френеля: 1 – круглая пьезопластина; 2 – линза Френеля

Далее приведены результаты расчетов акустического поля излучения фокусирующего ПЭП с линзой Френеля, состоящей из 11 кольцевых ступенек. Диаметр центральной ступеньки равен 1,2 мм, а ширина последующих ступенек составляет 0,6 мм.

Расчеты проводились для непрерывного режима работы пьезокерамики на частоте 5 МГц. Все элементы линзы, состоящие из органического стекла (скорость ультразвука составля-

ла 2670 м/с), контактируют с водной средой, в которой осуществляется фокусировка акустических волн. Длина акустической волны в воде равна 0,3 мм. Расчеты акустического поля проводились без учета дифракции акустических волн на угловых элементах ступенчатой структуры линзы и без учета отражения волн на границе «оргстекло – вода».

Расчеты толщин ступенек для фокусных расстояний линзы Френеля 30, 50 и 75 мм приведены в табл. 1.

Табл. 1. Расчеты толщины ступенек для фокусных расстояний  $F$  линзы Френеля, равных 30, 50 и 75 мм

В миллиметрах

Номер кольца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$F = 30$ мм	0,134	0,164	0,218	0,3	0,41	0,547	0,709	0,901	1,115	1,359	1,625
$F = 50$ мм	0,134	0,152	0,184	0,234	0,3	0,282	0,481	0,595	0,726	0,873	1,036
$F = 75$ мм	0,134	0,145	0,168	0,2	0,244	0,3	0,364	0,442	0,529	0,627	0,736

Из таблицы видно, что максимальная толщина ступеньки линзы Френеля равна 1,625 мм для линзы с рассчитанным фокусным расстоянием 30 мм, что даже в этом случае позволит для такой линзы удержать слой контактной жидкости при проведении акустического контроля. При изготовлении линзы Френеля из материалов, скорость ультразвука в которых больше, чем скорость ультразвука в органическом стекле, толщина ступенек будет меньше примерно во столько раз, во сколько раз скорость ультразвука в выбранном материале больше скорости ультразвука в органическом стекле. Так, толщина одиннадцатой ступеньки для линзы Френеля, изготовленной из стали, рассчитанной для фокусного расстояния 50 мм, составляет 0,527 мм.

Расчеты акустического поля излучения рассматриваемого пьезопреобразователя проводились по методике, изложенной в [6].

На рис. 2 приведено распределение давления акустических волн, генерируемых ПЭП с линзой Френеля, рассчитанной на фокусное расстояние 30 мм, вдоль акустической оси пьезопреобразователя. На этом же рисунке в виде вставок приведено поперечное распределение давления акустических волн на разных расстояниях от пьезопреобразователя. Эти распределения отмечены на рис. 2 соответствующими сносками. Они позволяют определить характер изменения акустического поля излучения по мере удаления от пьезопластины.

Из рис. 2 видно, что в ближней

зоне наблюдается хаотическое изменение давления акустических волн. Максимальное значение давления акустических волн наблюдается на расстоянии 28,6 мм от пьезопластины, что немного меньше, чем рассчитываемое фокусное расстояние линзы 30 мм. Это обусловлено характером сферических акустических волн, генерируемых элементарными площадками пьезопластины. Аналогичное уменьшение расстояния от поверхности пьезопластины до плоскости, где наблюдается максимальное давление акустических волн, от рассчитываемого фокусного расстояния линзы Френеля наблюдается и для линз с другими фокусными расстояниями. Так, для линзы, рассчитанной для фокусного расстояния 50 мм, максимальное значение давления акустических волн наблюдается на расстоянии 45,2 мм от пьезопластины, а для линзы, рассчитанной для фокусного расстояния 75 мм, – на расстоянии 59,5 мм.

Диаметр акустического пучка по уровню половинного значения давления акустических волн на расстоянии 28,5 мм от пьезопластины равен 1 мм. Как видно из вставок на рис. 2, при удалении от фокальной точки акустический пучок носит неравномерный характер, испытывая уширение и искажение поперечной формы.

На рис. 3 приведено распределение давления акустических волн вдоль акустической оси пьезопреобразователя, генерируемых ПЭП с линзой Френеля, рассчитанной на фокусное расстояние 50 мм.

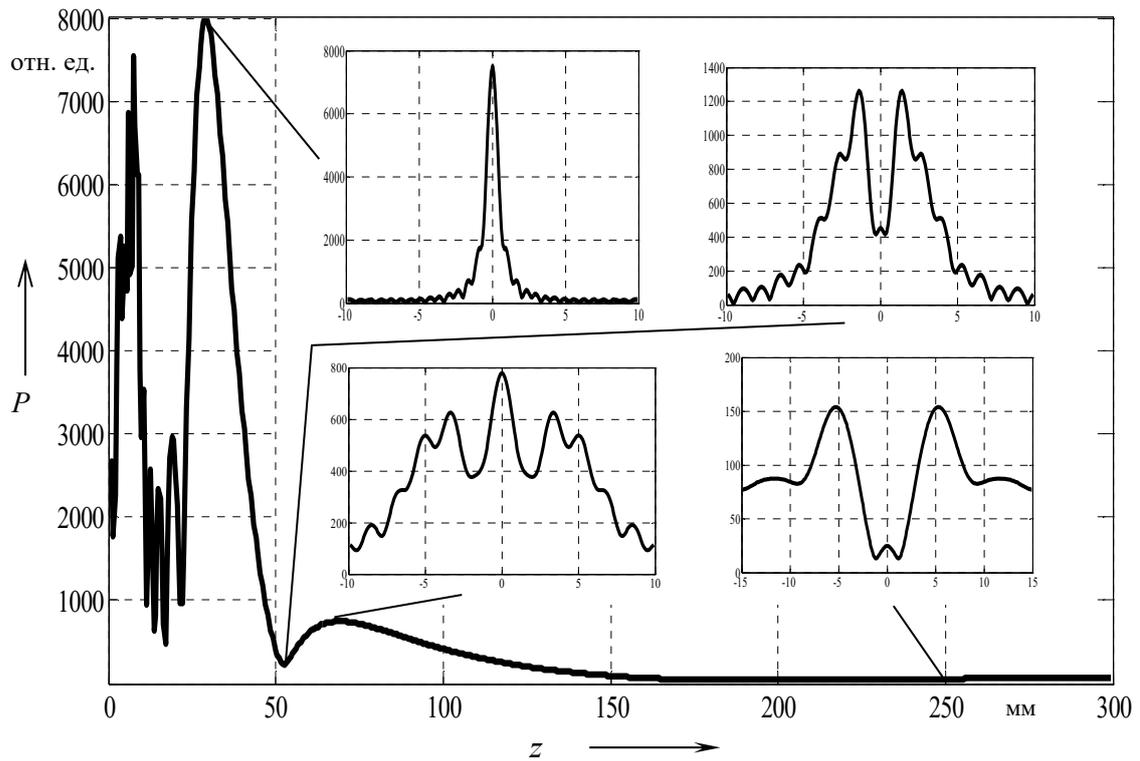


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль акустической оси ПЭП с линзой Френеля, рассчитанной для фокусного расстояния 30 мм

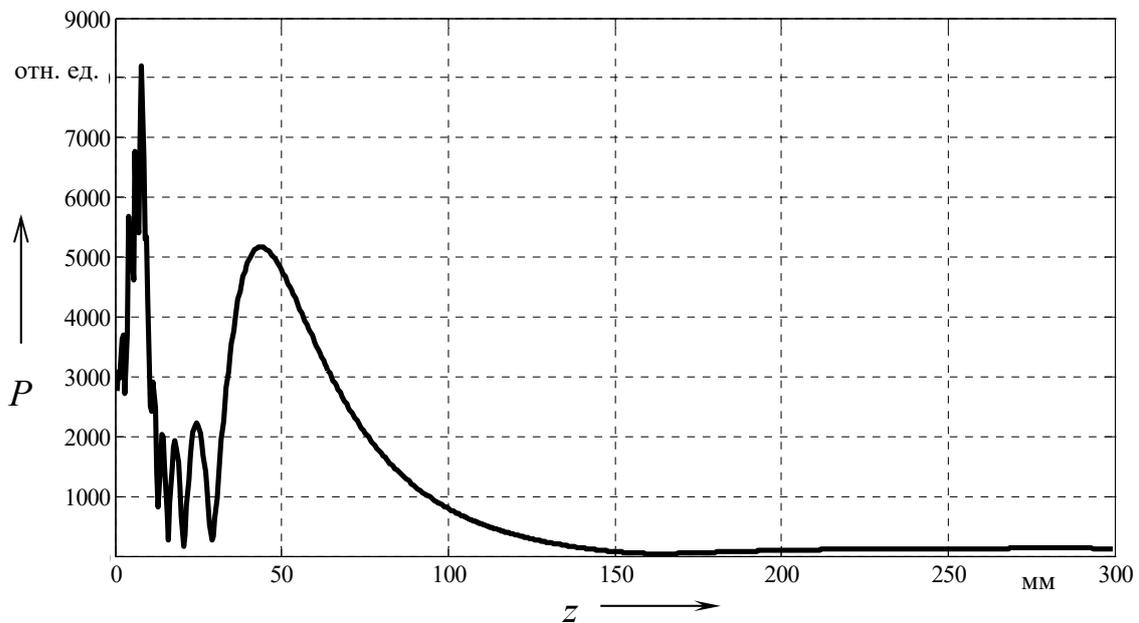


Рис. 3. Распределение давления акустических волн вдоль акустической оси ПЭП с линзой Френеля, рассчитанной для фокусного расстояния 50 мм

Акустическое поле излучения ПЭП в этом случае имеет характерный вид, как и для любого фокусирующего пьезопреобразователя, с проявлением ближней, дальней зон и плоскости, где наблюдается максимальное значение давления акустических волн, которая располагается на расстоянии 45,2 мм от центрального элемента линзы.

Из рис. 3 видно, что максимальное давление акустических волн для этого фокусирующего ПЭП меньше, чем максимальное давление для пьезопреобра-

зователя, рассчитанного для фокусного расстояния 30 мм, что связано с уменьшением амплитуды сферических акустических волн, генерируемых элементарными пьезоплощадками, от расстояния. Для определения характера изменения акустического поля в зависимости от расстояния от центрального элемента линзы на рис. 4 приведены вставки, на которых приведено распределение давления акустических волн на различных расстояниях.

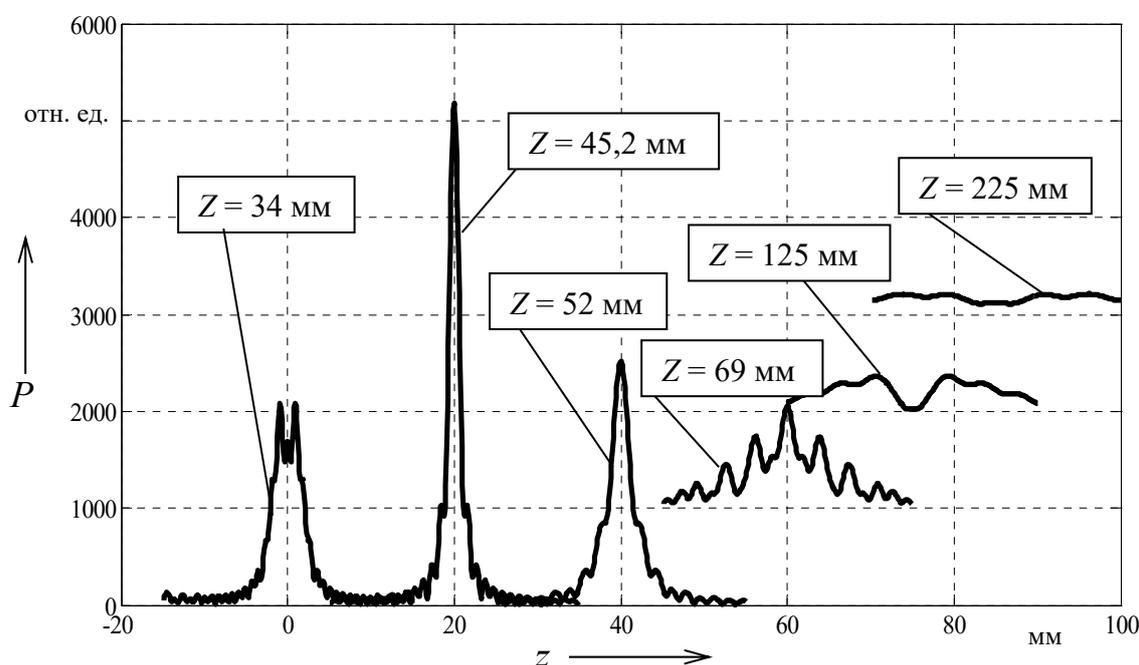


Рис. 4. Распределение давления акустических волн в осевом сечении ПЭП с линзой Френеля, рассчитанной для фокусного расстояния 50 мм, на разных расстояниях от центрального элемента линзы

Распределение акустического поля излучения приведено на круге диаметром 30 мм. Эти вставки привязаны только к масштабу оси давления  $P$ , но для расстояний 34, 45,2 и 52 мм нулевое значение оси акустического давления совпадает с нулевым значением оси  $P$ , для расстояния 69 мм нулевое значение акустического давления совпадает со значением 1000 оси давления, для расстояния 125 мм – со значением 2000 оси  $P$ , а для расстояния 225 мм – со значением 3000 оси давления.

Из рис. 4 видно, что по мере уда-

ления от пьезопреобразователя акустическое поле излучения носит разнообразный характер, когда на определенных расстояниях наблюдается максимум акустического давления как на акустической оси ПЭП, так и на расстоянии, где максимум акустического давления располагается вне акустической оси. На расстоянии 45,2 мм от центрального элемента линзы наблюдается узконаправленный акустический пучок, диаметр которого по уровню половинного значения давления акустических волн равен 1,4 мм. При дальнейшем

увеличении расстояния наблюдается практически монотонное уменьшение величины акустического давления.

### **Выводы**

Таким образом, показано, что акустический вариант линзы Френеля может применяться для создания фокуси-

рующего пьезоэлектрического преобразователя, акустическое поле излучения которого соответствует излучению фокусирующих пьезопреобразователей в виде активных концентраторов и использующих классические линзовые элементы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
3. Акустическое поле излучения активных концентраторов на основе пьезопластин в виде поверхностей второго порядка / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1 (58). – С. 104–111.
4. **Борисов, В. И.** Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде одномерной фазированной решетки / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 1. – С. 27–37.
5. **Заказнов, Н. П.** Теория оптических систем / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. – Москва: Машиностроение, 1992. – 448 с.
6. **Борисов, В. И.** Акустическое поле излучения двухпластинчатого круглого пьезоэлектрического преобразователя / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2 (75). – С. 49–56.

*Статья сдана в редакцию 28 сентября 2023 года*

Контакты:

borisov\_vasil@mail.ru (Борисов Василий Иванович);  
sss.bru@tut.by (Сергеев Сергей Сергеевич);  
enprokopenko@yandex.ru (Прокопенко Елена Николаевна).

***V. I. BORISOV, S. S. SERGEEV, E. N. PROKOPENKO***

## **ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH A FRESNEL LENS**

### **Abstract**

Using numerical analysis, acoustic radiation field of focusing acoustic transducers based on acoustic Fresnel lenses which are an annular stepped structure in acoustic contact with a circular piezoelectric plate is calculated. It is shown that the acoustic radiation field of such piezoelectric transducers has similar patterns as piezoelectric transducers in the form of active concave concentrators of acoustic wave have.

### **Keywords:**

acoustic field, focusing piezoelectric transducer, piezo plate, acoustic axis, near zone, far zone, acoustic wave, acoustic pressure, Fresnel lens, focal plane, focus.

### **For citation:**

Borisov, V. I. Acoustic radiation field of a piezoelectric transducer with a Fresnel lens / V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 70–75.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_76

УДК 621.3.083.1

**О. А. КАПИТОНОВ**

**А. С. ТРЕТЬЯКОВ**

**Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

### УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

#### Аннотация

Произведен анализ существующих вариантов реализации наблюдателя скорости вращения ротора для асинхронного электродвигателя. Показана необходимость разработки математической модели асинхронного электродвигателя с учетом эффектов вытеснения тока в стержневой обмотке ротора и потерь в магнитопроводе статора. Такая модель может быть использована для уточненного моделирования работы идентификатора параметров схемы замещения и наблюдателя скорости. Показано, что для достижения высокой точности работы наблюдателя необходимо введение коррекции параметров роторной цепи по нелинейному закону.

#### Ключевые слова:

асинхронный электродвигатель, схема замещения, идентификация параметров, предварительная идентификация, текущая идентификация, метод разностных уравнений.

#### Для цитирования:

Капитонов, О. А. Уточненная методика построения наблюдателя скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя / О. А. Капитонов, А. С. Третьяков, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 76–83.

#### Введение

В настоящее время наблюдается непрерывное развитие цифровых систем управления силовыми преобразователями в автоматизированном электроприводе. В таких системах происходит постоянная обработка поступающей с датчиков информации и выработка управляющих воздействий для поддержания скорости вращения электродвигателя, или других параметров технологического процесса.

Информация, поступающая в систему управления технологическим процессом, не всегда может быть получена явно. Часть необходимых системе управления величин можно получить

только косвенно, без прямого измерения. Одним из примеров может служить работа преобразователей частоты в замкнутой по скорости системе управления при поддержании скорости вращения на постоянном уровне, без использования датчика скорости. Данная задача может решаться с помощью алгоритма (модели), носящего название «наблюдатель состояния».

Наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно к объекту управления и получающая непрерывную информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулирующей величины.

Существует большое количество разновидностей наблюдателей состоя-

ния, объединенных наличием электромагнитной модели асинхронного электродвигателя, лежащей в их основе. Для точной работы наблюдателей крайне важно знать точные значения активных и реактивных сопротивлений Т- или Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя. Для решения этой задачи есть другой класс моделей – идентификаторы параметров схемы замещения.

Идентификатор параметров схемы замещения – это алгоритм, который на основе специально сформированного сигнала напряжения, поданного на одну из фаз асинхронного электродвигателя, достаточно быстро и точно определяет параметры схемы замещения.

Основной недостаток таких алгоритмов – это использование постоянных по величине параметров схемы замещения.

*Цель работы* – разработка электромагнитной модели, учитывающей:

- зависимость активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения;
- потери в стали;
- эффект вытеснения тока ротора.

### **Описание электромагнитной модели асинхронного электродвигателя**

Для исследования работы предлагаемого наблюдателя состояния методом компьютерного моделирования разработана уточненная модель асинхронного электродвигателя в осях  $\alpha - \beta$ ,  $d - q$  [1]. Такая модель была выбрана для того, чтобы иметь возможность учета эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора, поскольку в данной модели, в отличие от более распространенных моделей с неподвижным ротором, частота тока роторной цепи изменяется при изменении как величины скольжения, так и частоты приложенного к статору напряжения, и соответствует частоте тока ротора у

реального электродвигателя. Эта особенность предлагаемой модели дает возможность реализации зависимостей величин приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания роторной цепи от значения частоты тока роторной цепи, при питании статора напряжением переменной частоты, а также при питании напряжением несинусоидальной формы. В таком случае роторная цепь в предлагаемой модели будет иметь различную величину активного и индуктивного сопротивлений для каждой из гармоник тока несинусоидальной формы, в соответствии с их частотой. Недостатком предлагаемой модели электродвигателя является сложность решения системы дифференциальных уравнений с изменяющимися по периодическому закону параметрами. В этой связи использование данной системы уравнений предлагается для применения в методах компьютерного моделирования путем численного интегрирования. В [2] представлен математический аппарат зависимости активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения, учета потерь в стали, и эффекта вытеснения тока в роторе. В текущей версии электромагнитной модели математическое описание эффекта вытеснения тока в роторе доработано на основе методики, предложенной в [3]. Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы асинхронного электродвигателя с учетом вышеназванных условий, имеет вид

$$u_{\alpha} = i_{\alpha} R_1 + L_{1\mu} \frac{di_{\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt};$$

$$u_{\beta} = i_{\beta} R_1 + L_{1\mu} \frac{di_{\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{m\beta}}{dt};$$

$$\frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt} = e_{\alpha} \frac{R_{\mu}}{L_{12}^2} - \Psi_{m\alpha} \frac{R_{\mu}}{L_{12}};$$

$$\frac{d\Psi_{m\beta}}{dt} = e_{\beta} \frac{R_{\mu}}{L_{12}^2} - \Psi_{m\beta} \frac{R_{\mu}}{L_{12}};$$

$$\begin{aligned}
 e_{\alpha} &= L_{12} \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{2d}}{dt} - L_{12} \sin \varphi \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 e_{\beta} &= L_{12} \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \sin \varphi \frac{di_{2d}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 0 &= L_{2p} L_{2a} \frac{d^2 i_{2d}}{dt^2} + (L_{2p} R_{2p} + L_{2p} R_{2a} + L_{2a} R_{2p}) \times \\
 &\times \frac{di_{2d}}{dt} + R_{2p} R_{2a} i_{2d} + L_{2a} \frac{de_{2d}}{dt} + (R_{2p} + R_{2a}) e_{2d}; \\
 0 &= L_{2p} L_{2a} \frac{d^2 i_{2q}}{dt^2} + (L_{2p} R_{2p} + L_{2p} R_{2a} + L_{2a} R_{2p}) \times \\
 &\times \frac{di_{2q}}{dt} + R_{2p} R_{2a} i_{2q} + L_{2a} \frac{de_{2q}}{dt} + (R_{2p} + R_{2a}) e_{2q}; \\
 e_{2d} &= L_{12} \cos \varphi \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \sin \varphi \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \frac{di_{2d}}{dt}; \\
 e_{2q} &= -L_{12} \sin \varphi \frac{di_{\alpha}}{dt} + L_{12} \cos \varphi \frac{di_{\beta}}{dt} + L_{12} \frac{di_{2q}}{dt}; \\
 L_{1\mu} &= L_1 - L_{12}; \\
 L_{2\mu} &= L_2 - L_{12}; \\
 M &= \frac{3}{2} p L_{12} [(i_{\beta} i_{2d} - i_{\alpha} i_{2q}) \cos \varphi - \\
 &- (i_{\alpha} i_{2d} + i_{\beta} i_{2q}) \sin \varphi]; \\
 M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}; \\
 \frac{d\varphi}{dt} &= \omega, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $u_{\alpha}$ ,  $u_{\beta}$  – напряжения, прикладываемые к фазам  $\alpha$  и  $\beta$  двухфазной модели, В;  $i_{\alpha}$ ,  $i_{\beta}$  – токи обмотки статора, А;  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$  – токи обмотки ротора, А;

$R_1$  – сопротивление обмотки статора, Ом;  $L_1$ ,  $L_2$  – индуктивности обмоток статора и ротора, Гн;  $L_{1\mu}$ ,  $L_{2\mu}$  – индуктивности намагничивания, Гн;  $R_{\mu}$  – сопротивление намагничивающего контура, Ом;  $e_{\alpha}$ ,  $e_{\beta}$  – ЭДС, индуцируемые потокоцеплением статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , В;  $e_{2d}$ ,  $e_{2q}$  – ЭДС, индуцируемые потокоцеплением ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , В;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн;  $\Psi_{m\alpha}$ ,  $\Psi_{m\beta}$  – потокоцепления намагничивания, Вб;  $R_{2a}$ ,  $R_{2p}$  – сопротивления ветвей обмотки ротора, Ом;  $L_{2a}$ ,  $L_{2p}$  – индуктивности ветвей обмотки ротора, Гн;  $\varphi$  – угол между обмотками статора и ротора, эл. град;  $M$  – электромагнитный момент, Н·м;  $J$  – момент инерции, кг·м<sup>2</sup>.

#### Описание наблюдателя состояния

Существует достаточно много разновидностей наблюдателей состояния [4–10].

Для оценки скорости вращения электродвигателя выбран адаптивный наблюдатель скорости [4]. Данный наблюдатель включает в себя:

- двухфазную модель асинхронного электродвигателя в осях  $\alpha$ – $\beta$ ;

- адаптор, осуществляющий настройку параметров модели асинхронного электродвигателя на основании текущих значений невязки величин токов статора, полученных на модели электродвигателя и токов статора исследуемого электродвигателя.

В ходе работы наблюдателя адаптор осуществляет непрерывную подстройку значения скорости вращения в модели электродвигателя до обеспечения минимального различия токов статора, рассчитанных на модели, и токов статора реального исследуемого электродвигателя. Таким образом, наблюдатель обеспечивает вычисление текущей скорости вращения исследуемого асин-

хронного электродвигателя и текущее значение отклонения величины активного сопротивления ротора от исходного значения, обусловленное нагревом обмотки ротора.

Для повышения точности работы наблюдателя в его внутреннюю модель электродвигателя был добавлен алгоритм, изменяющий значение активного сопротивления и индуктивности рассеивания роторной цепи в зависимости от текущей скорости вращения электродвигателя, для учета влияния эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора на параметры роторной цепи.

Система уравнений наблюдателя скорости и активного сопротивления статора электродвигателя имеет вид

$$\frac{d\hat{i}_{aa}}{dt} = a_1\hat{i}_a + a_2\hat{\Psi}_{2a} - a_3\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ b_1u_a + g_1\tilde{i}_{aa} - g_2\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{i}_{bb}}{dt} = a_1\hat{i}_b + a_3\hat{\Psi}_{2a} + a_2\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ b_2u_b + g_2\tilde{i}_{aa} + g_1\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{\Psi}_{2a}}{dt} = a_4\hat{i}_a + a_5\hat{\Psi}_{2a} - a_6\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ g_3\tilde{i}_{aa} - g_4\tilde{i}_{bb};$$

$$\frac{d\hat{\Psi}_{2b}}{dt} = a_4\hat{i}_b + a_6\hat{\Psi}_{2a} + a_5\hat{\Psi}_{2b} +$$

$$+ g_4\tilde{i}_{aa} + g_3\tilde{i}_{bb};$$

$$\hat{\omega} = k_p(\hat{\Psi}_{2b}\tilde{i}_{aa} - \hat{\Psi}_{2a}\tilde{i}_{bb}) +$$

$$+ k_i \frac{d(\hat{\Psi}_{2b}\tilde{i}_{aa} - \hat{\Psi}_{2a}\tilde{i}_{bb})}{di};$$

$$\tilde{i}_{aa} = i_a - \hat{i}_a; \quad \tilde{i}_{bb} = i_b - \hat{i}_b;$$

$$b_1 = b_2 = \frac{1}{\sigma}; \quad a_1 = -\left(\frac{\hat{R}_1}{\sigma} + \alpha \cdot \beta \cdot L_m\right);$$

$$a_2 = \alpha \cdot \beta; \quad a_3 = -p_n \cdot \beta \cdot \hat{\omega};$$

$$a_4 = \alpha \cdot L_m; \quad a_5 = \alpha; \quad a_6 = p_n \cdot \hat{\omega};$$

$$g_1 = a_1(k-1); \quad g_2 = a_6(k-1);$$

$$g_3 = a_1(k-1) - \left(-\left(\frac{\hat{R}_1}{\sigma} + \alpha\right)(k-1)\frac{1}{\beta}\right);$$

$$g_4 = -\frac{a_6}{\beta}(k-1);$$

$$\Delta\hat{R}_1 = k_p(i_a\hat{i}_{aa} + i_b\hat{i}_{bb}) + k_i \frac{(i_a\hat{i}_{aa} + i_b\hat{i}_{bb})}{di}, \quad (2)$$

где  $\tilde{i}_a, \tilde{i}_b$  – ошибки оценивания компонентов вектора тока статора, А;  $u_a, u_b$  – компоненты вектора напряжения статора, В;  $\hat{i}_{aa}, \hat{i}_{bb}$  – оцененные значения компонентов вектора невязок тока статора, А;  $\hat{\Psi}_{2a}, \hat{\Psi}_{2b}$  – оцененные значения потокосцеплений ротора;  $a_1 \dots a_6$  – коэффициенты матрицы объекта;  $g_1 \dots g_4$  – коэффициенты матрицы коррекции;  $\alpha, \beta, \sigma$  – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя;  $\hat{\omega}$  – угловая частота вращения ротора, рад/с;  $p_n$  – число пар полюсов;  $k_p, k_i$  – коэффициенты закона адаптации;  $k$  – настроечный коэффициент;  $\Delta\hat{R}_1$  – оценочное значение изменения сопротивления статора в единицу времени, Ом.

При этом предлагается приведенное активное сопротивление ротора  $R_2'$

определять при  $s \geq s_{ном}$  по выражению [11]

$$R_2' = R_{2,0}' + \Delta R_2 (s - s_{ном}), \quad (3)$$

где

$$\Delta R_2 = \frac{R_{2n}' - R_{2,0}'}{1 - s_{ном}}; \quad (4)$$

$R_{2,0}'$  – приведенное активное сопротивление ротора для скольжений ( $-s_{ном} \leq s \leq s_{ном}$ );  $R_{2n}'$  – приведенное активное сопротивление ротора для пускового режима ( $s = 1$ );  $s, s_{ном}$  – текущее и номинальное скольжения АД.

### **Моделирование и итоги**

В ходе моделирования работы наблюдателя скорости исследована работа наблюдателя скорости с коррекцией значений приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора по линейному закону в функции скольжения. При линейной зависимости сопротивление и индуктивность рассеивания линейно изменяются от значений пускового режима (при неподвижном роторе) до номинальных значений.

На рис. 1 показан график работы наблюдателя скорости без предлагаемой коррекции, полученный методом компьютерного моделирования с использованием модели электродвигателя с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора. График 1 показывает реальную зависимость скорости вращения ротора от времени. График 2 показывает результат работы нескорректированного наблюдателя скорости.

На рис. 2 показан график работы наблюдателя скорости с коррекцией значений приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора по линейному закону в

функции скольжения. График 1 показывает реальную зависимость скорости вращения ротора от времени. График 2 показывает результат работы скорректированного наблюдателя скорости.

Из рис. 1 видно, что нескорректированный наблюдатель скорости дает значительную ошибку определения скорости при значениях скольжения выше критического. На рисунке наблюдаются значительные пульсации вычисленного наблюдателем значения скорости. Применение коррекции параметров роторной цепи по линейному закону существенно снижает величину ошибки определения скорости и величину пульсаций вычисленного значения скорости, однако ошибка все равно остается значительной. Таким образом, для существенного повышения точности работы наблюдателя скорости необходим переход к использованию нелинейных зависимостей параметров роторной цепи от скорости, что может являться предметом дальнейших исследований.

### **Выводы**

В результате проведенных исследований предложен улучшенный наблюдатель скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя. Компьютерное моделирование показало, что предлагаемые изменения в алгоритме наблюдателя позволяют значительно повысить точность косвенного определения значения скорости при работе с реальным электродвигателем, у которого проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора. Исследования показали, что наилучшего результата можно добиться путем расчета или предварительной идентификации зависимостей сопротивления и индуктивности рассеивания роторной цепи от скорости вращения и введения этих зависимостей во внутреннюю модель наблюдателя.

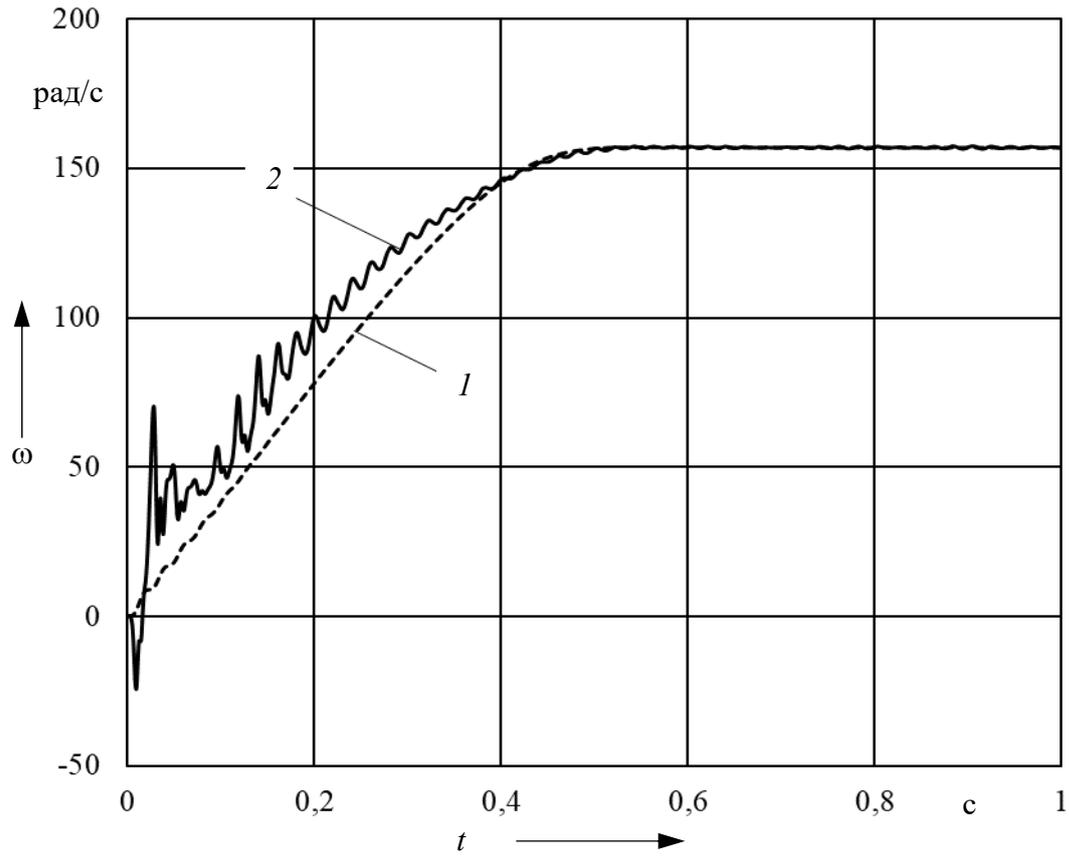


Рис. 1. Результаты моделирования нескорректированного наблюдателя скорости

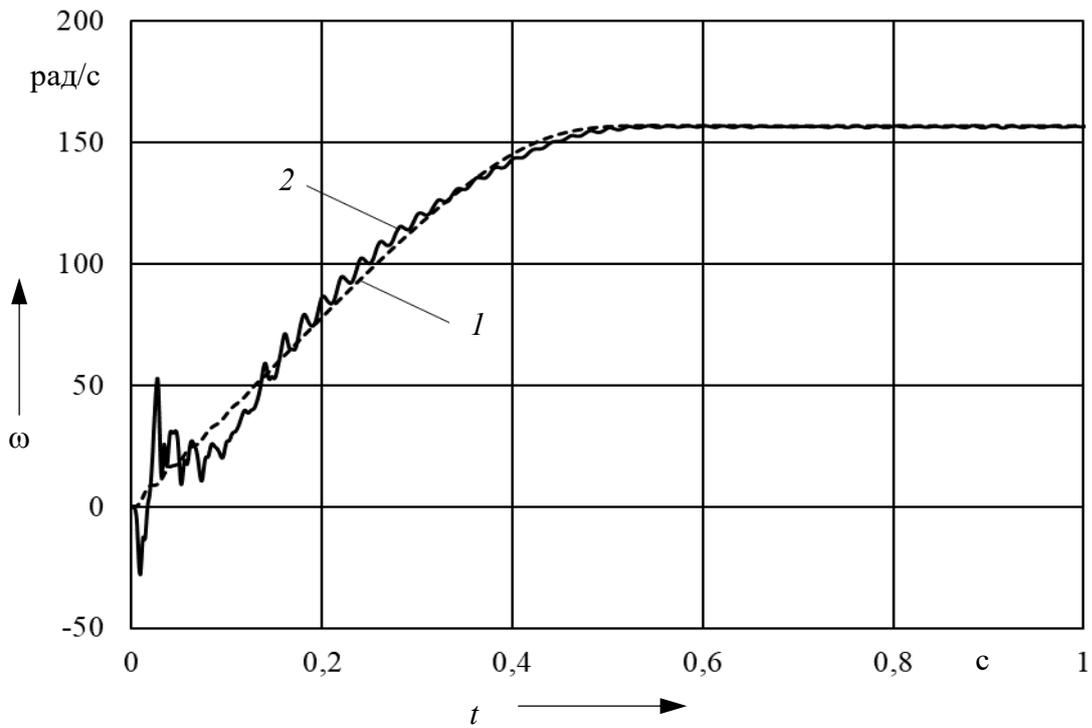


Рис. 2. Результаты моделирования скорректированного наблюдателя скорости

Исследования работы наблюдателя скорости, реализованного по принципу наблюдателя состояния, показали, что при работе с реальным электродвигателем, у которого проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора, возможны погрешности определения и пульсации получаемого значения ско-

рости. Дальнейшее повышение точности работы наблюдателя скорости возможно при переходе к внесению в наблюдатель нелинейных зависимостей приведенного сопротивления ротора и индуктивности рассеивания цепи ротора от скольжения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Третьяков, А. С.** Разработка уточненной электромагнитной модели асинхронного электродвигателя / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов, Г. С. Леневский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 69–77.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
3. **Hudobin, K. V.** Ukraine Adding effect of current displacement and magnetic circuit saturation in an asynchronous motor mathematical model / K. V. Hudobin // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2014. – № 2. – P. 56–59.
4. **Kubota, H.** Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation / H. Kubota // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30, № 5. – P. 1219–1224.
5. **Hinkkanen, M.** Analysis and Design of Full-Order Flux Observers for Sensorless Induction Motors / M. Hinkkanen // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 51, № 5. – P. 1033–1040.
6. **Hinkkanen, M.** 2004 Stabilization of Regenerating-Mode Operation in Sensor-less Induction Motor Drives by Full-Order Flux Observer Design / M. Hinkkanen // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 51, № 4. – P. 1318–1328.
7. **Peresada, S.** Adaptive observers for self-commissioning of induction motor drives: Theory and experiment / S. Peresada // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2014. – P. 240–245.
8. **Vladimir, V. P.** New off-line identification method of induction motor parameters / V. P. Vladimir // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002: Workshop Proceedings. – 2002. – Vol. 2. – P. 85–87.
9. **Castaldi, P.** Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / P. Castaldi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 13, № 3. – P. 386–400.
10. **Lee, R.** Reference Frames for the Simulation of Induction Motors / R. Lee // Department of electrical Engineering University of Natal, King George V Avenue, Durban 4001 (South Africa). – 1984.
11. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

Статья сдана в редакцию 22 августа 2023 года

Контакты:  
kapitonov1987@gmail.com (Капитонов Олег Александрович);  
loggie121@gmail.com (Третьяков Артем Сергеевич);  
emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич).

***O. A. KAPITONOV, A. S. TRETIAKOV, G. S. LENEVSKY***

**A REFINED METHOD FOR CONSTRUCTING AN OBSERVER FOR ROTATIONAL SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ROTOR**

**Abstract**

The analysis of the existing options for implementing an observer for rotor rotation speed in an asynchronous electric motor has been carried out. It is shown that it is necessary to develop a mathematical model of an asynchronous electric motor taking into account the effects of current displacement in the bar winding of the rotor and losses in the stator magnetic circuit. Such a model can be used for a refined simulation of the operation of a substitution scheme parameter identifier and a velocity observer. In order to achieve high accuracy of the observer operation, the correction of parameters of rotary circuit according to a nonlinear law must be introduced.

**Keywords:**

asynchronous motor, substitution scheme, parameter identification, preliminary identification, current identification, method of difference equations.

**For citation:**

Kapitonov, O. A. A refined method for constructing an observer for rotational speed of an asynchronous motor rotor / O. A. Kapitonov, A. S. Tretiakov, G. S. Lenevsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 76–83.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_84

УДК 621.3.083.1

**А. С. ТРЕТЬЯКОВ**

**О. А. КАПИТОНОВ**

**Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

### **Аннотация**

Рассматривается вопрос предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя. Представлен анализ методов реализации предварительной идентификации и на его основе выбран метод независимого тестирования для идентификации всех параметров схемы замещения. Метод оптимизирован для использования его в микропроцессорных системах на базе микроконтроллеров архитектуры ARM. Проведено математическое моделирование с целью проверки адекватности, сходимости и быстродействия оптимизированного метода.

### **Ключевые слова:**

асинхронный электродвигатель, схема замещения, идентификация параметров, предварительная идентификация, планирование эксперимента, регрессионные уравнения, метод разностных уравнений.

### **Для цитирования:**

Третьяков, А. С. Предварительная идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 84–92.

### **Введение**

При векторном управлении асинхронных электроприводов необходимо знать параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя. Для решения этой задачи используется процесс идентификации данных параметров.

Идентификация параметров схемы замещения – это процесс восстановления истинных значений параметров схемы замещения на основе пакета исходных данных (например, ток и напряжение на статоре).

В ходе исследований по тепловой идентификации [2] асинхронного электродвигателя возникла подзадача определения параметров схемы замещения. При этом данная подзадача заключается не в разработке, а поиске наиболее оптимальной методики для нахождения параметров схемы замещения.

*Цель работы* – выбор оптимальной методики предварительной идентификации параметров асинхронного электродвигателя и ее оптимизации для решения задач тепловой идентификации.

### **Обзор методов идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя**

Все методы идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя можно разделить на следующие группы.

1. Независимое тестирование (индивидуальное тестирование двигателя, полностью отключенного от рабочего механизма) [2–4].

2. Предварительная идентификация (адаптация системы управления при первом включении электропривода) [2, 3, 5].

3. Текущая идентификация (непрерывное определение параметров в режиме реального времени) [2, 3, 6].

Методы предварительной идентификации предполагают предварительное тестирование двигателя, присоединенного к рабочему механизму. В данном случае определение параметров схемы замещения АД происходит до запуска электродвигателя по специальному алгоритму, заложенному в систему управления, в практически холодном состоянии.

При текущей идентификации параметров схемы замещения по специальным алгоритмам происходит непрерывная оценка отклонения идентифицируемого параметра от его предварительного значения при практически холодном состоянии электродвигателя.

Предварительную идентификацию можно разделить на следующие виды [7–9].

1. Методы независимого тестирования.
2. Регрессионные модели.
3. Расчет параметров на основе паспортных данных АД и т. д.

Самым простым способом расчета параметров схемы замещения АД является расчет по каталожным данным [7–9]. Но такой способ расчета крайне неэффективен – величина ошибки может достигать 50 %.

Методы независимого тестирования предполагают определение параметров схемы замещения АД, полностью отсоединенного от рабочего механизма путем подачи тестовых сигналов на статор [2, 3, 10]. При этом вал может быть как неподвижным, так и вращаться. Главным минусом данной группы методов является невозможность самонастройки в составе

технологического объекта. В то же время достоинством данной группы методов является полное определение параметров АД совместно с получением статических характеристик.

Существуют также методы поэтапного определения параметров схемы замещения, при которых для каждого этапа требуется своя методика [9]: методы при однофазном тестировании асинхронного электродвигателя напряжениями разной частоты [7], методы регрессионных моделей [11] и т. д.

При использовании регрессионных моделей обычно применяется две модели: одна для определения сопротивления статора, вторая – для остальных параметров. Минусом таких методик является необходимость формирования сложного сигнала для системы управления преобразователем частоты. Однако такие модели можно использовать для решения ряда подзадач при предварительной идентификации, например, определение оптимальных настроечных коэффициентов.

### **Описание предварительной идентификации**

На основе анализа публикаций по данной тематике была выбрана группа методов независимого тестирования. За основу взята методика предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, предложенная в [1]. Математический аппарат, описывающий данный метод, представлен в виде системы уравнений:

$$\hat{\Psi}_a p = -R_1 i_a + u_a + k_\psi \tilde{i}_a;$$

$$\hat{\Psi}_b p = -R_1 i_b + u_b + k_\psi \tilde{i}_b;$$

$$\hat{i}_a p = -(\hat{\rho} + R_1 \hat{d}) \hat{i}_a - \omega p_n \hat{i}_b + \hat{b} \hat{\Psi}_a + R_2 = \alpha L_1, \quad (1)$$

$$+ \hat{d} \omega p_n \hat{\Psi}_a + \hat{d} u_a + k_i \tilde{i}_a + \hat{d} \omega p_n \tilde{\Psi}_b;$$

$$\hat{i}_b p = -(\hat{\rho} + R_1 \hat{d}) \hat{i}_b + \omega p_n \hat{i}_a + \hat{b} \hat{\Psi}_b -$$

$$- \hat{d} \omega p_n \hat{\Psi}_a + \hat{d} u_b + k_i \tilde{i}_b - \hat{d} \omega p_n \tilde{\Psi}_a;$$

$$\hat{b} p = \gamma_b (\hat{\Psi}_a \tilde{i}_a + \hat{\Psi}_b \tilde{i}_b);$$

$$\hat{d} p = \gamma_d (\varphi_a \tilde{i}_a + \varphi_b \tilde{i}_b);$$

$$\hat{\rho} p = -\gamma_\rho (\hat{i}_a \tilde{i}_a + \hat{i}_b \tilde{i}_b);$$

$$\tilde{\Psi}_a p = -k_\Psi \tilde{i}_a - \gamma_\Psi \omega p_n \tilde{i}_b;$$

$$\tilde{\Psi}_b p = -k_\Psi \tilde{i}_b + \gamma_\Psi \omega p_n \tilde{i}_a;$$

$$\tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a; \quad \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b;$$

$$\varphi_a = -R_1 \hat{i}_a + \omega p_n \hat{\Psi}_b + \omega p_n \tilde{\Psi}_b + u_a;$$

$$\varphi_b = -R_1 \hat{i}_b - \omega p_n \hat{\Psi}_a - \omega p_n \tilde{\Psi}_a + u_b;$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_m};$$

$$d = \frac{1}{\sigma}; \quad b = d\alpha; \quad \rho = \alpha L_m \beta + \alpha;$$

$$L_1 = \frac{\rho \sigma}{\alpha}; \quad L_m = \sqrt{L_1(L_1 - \sigma)};$$

где  $i_a, i_b$  – компоненты вектора тока статора, А;  $\hat{i}_a, \hat{i}_b$  – оцененные значения компонентов вектора тока статора, А;  $\tilde{i}_a, \tilde{i}_b$  – ошибки оценивания компонентов вектора тока статора, А;  $u_a, u_b$  – компоненты вектора напряжения статора, В;  $R_1$  – заранее измеренное значение сопротивления обмотки статора, Ом;  $p$  – оператор Лапласа;  $\hat{\Psi}_a, \hat{\Psi}_b$  – оцененные значения потокосцеплений статора и ротора;  $\tilde{\Psi}_a, \tilde{\Psi}_b$  – ошибки оцененных значений потокосцеплений статора и ротора;  $\hat{b}, \hat{d}, \hat{\rho}$  – оцененные значения параметров констант  $b, d, \rho$ ;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с;  $p_n$  – число пар полюсов;  $k_\Psi, k_i, \gamma_b, \gamma_d, \gamma_\rho$  – коэффициенты, определяющие свойства идентификации (интенсивность, сходимость, точность и т. д.);  $\alpha, \beta, \sigma$  – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя;  $L_1$  – определяемая индуктивность обмотки статора, Гн;  $L_2$  – определяемая индуктивность обмотки ротора, Гн;  $L_m$  – определяемая индуктивность рассеяния, Гн;  $R_2$  – определяемое сопротивление роторной цепи, Ом.

### Оптимизация методики предварительной идентификации асинхронного электродвигателя

В версии [1] метод предварительной идентификации работает следующим образом.

1. По методике, заложенной в прошивку специализированного преобразователя частоты, определяется сопротивление статора  $R_1$ .

2. На первом периоде времени к фазе  $\alpha$  прикладывается полигармоническое напряжение  $u_\alpha$ , состоящее из гармоник высокой и низкой частоты.

Напряжение  $u_\beta$  равно нулю, вал двигателя неподвижен.

3. На втором интервале времени к фазе  $\beta$  прикладывается напряжение  $u_\beta$ , вал двигателя свободно вращается. При этом идет идентификация параметров схемы замещения.

Но у данного метода есть свои минусы.

1. Настраечные коэффициенты не имеют аналитических выражений для расчета и их приходится подбирать.

2. Нет алгоритма предварительной оценки идентифицируемых параметров схемы замещения, что может вызвать увеличение времени идентификации.

3. Для реализации данного метода на практике необходимо наличие специального аппаратно-программного обеспечения.

Для практического применения данная методика была доработана и расширена.

Вместо специализированного преобразователя частоты используется реверсивный широтно-импульсный преобразователь, который выдает либо постоянное напряжение для идентификации сопротивления статора, либо согласно рекомендациям [13] формирует полигармоническое напряжение. Данный преобразователь питается от лабораторного блока питания с высокостабилизированным напряжением постоянного тока.

Центральным звеном измерительной системы является цифровой осциллограф, позволяющий снимать сигналы с датчиков тока и напряжения, обрабатывать их, заносить в массив памяти и пересылать на персональный компьютер для последующего отображения на экране монитора в виде графиков и текстовой информации.

Для измерения сигналов тока и напряжения на статоре асинхронного электродвигателя используются измерительные шунты. Эти датчики подключаются к цифровому осциллографу.

Для проведения предварительной идентификации на статор асинхронного электродвигателя подается напряжение постоянного тока определенной величины. Цифровой осциллограф считывает сигналы тока и напряжения и передает их на персональный компьютер, где программное обеспечение IM View по заложенному в него алгоритму вначале определяет экспериментальное значение сопротивления статора. Затем на статор электродвигателя подается полигармоническое напряжение и осуществляется определение остальных параметров схемы замещения.

### Теория разностных уравнений

Математический аппарат оптимизированного метода был переведен в пространство разностных уравнений. Это привело к тому, что отпала необходимость использовать отдельный метод для решения системы дифференциальных уравнений. Такое решение дало возможность использовать этот метод в прошивках современных микроконтроллеров архитектуры ARM.

Описание преобразования дифференциальных уравнений в разностные приведено в [15]. На основе данного описания математический аппарат имеет вид

$$\begin{aligned} f[i] &= f[i-1] + (-R1 * c[i-1] + \\ &+ a[i-1] + kpsi * m[i-1]) * k * Ts; \\ g[i] &= g[i-1] + (-R1 * r[i-1] + \\ &+ s[i-1] + kpsi * l[i-1]) * k * Ts; \\ k[i] &= k[i-1] + (-(p + R1 * d) * k[i-1] - \\ &- e[i-1] * pn * l[i-1] + \\ &+ b * f[i-1] + d * e[i-1] * pn * g[i-1] + \\ &+ d * a[i-1] + ki * m[i-1] + \\ &+ d * e[i-1] * pn * t[i-1]) * k * Ts; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l[i] &= l[i-1] + (-p + R1 * d) * l[i-1] + \\
 &+ e[i-1] * pn * k[i-1] + \\
 + b * g[i-1] - d * e[i-1] * pn * f[i-1] + \\
 &+ d * s[i-1] + ki * n[i-1] - \\
 &- d * e[i-1] * pn * o[i-1]) * k * Ts; \\
 b[i] &= b[i-1] + gb * (f[i-1] * m[i-1] + \\
 &+ g[i-1] * n[i-1]) * k * Ts; \\
 d[i] &= d[i-1] + gd * (u[i-1] * m[i-1] + \\
 &+ q[i-1] * n[i-1]) * k * Ts; \\
 p[i] &= p[i-1] - gp * (k[i-1] * m[i-1] + \\
 &+ l[i-1] * n[i-1]) * k * Ts; \\
 o[i] &= o[i-1] + (-kpsi * m[i-1] - \\
 &- gpsi * e[i-1] * pn * n[i-1]) * k * Ts; \\
 t[i] &= t[i-1] + (-kpsi * n[i-1] + \\
 &+ gpsi * e[i-1] * pn * m[i-1]) * k * Ts; \\
 m[i] &= c[i] - k[i]; \quad n[i] = r[i] - l[i]; \\
 u[i] &= -R1 * k[i] + e[i] * pn * g[i] + \\
 &+ e[i] * pn * t[i] + a[i]; \\
 q[i] &= -R1 * l[i] - e[i] * pn * f[i] - \\
 &- e[i] * pn * o[i] + s[i]; \\
 \text{sigma}[i] &= 1 / d[i]; \\
 \text{alfa}[i] &= b[i] * \text{sigma}[i]; \\
 L[i] &= (p[i] * \text{sigma}[i]) / \text{alfa}[i]; \\
 Lm[i] &= \text{sqr}(L[i] * (L[i] - \text{sigma}[i])); \\
 R2[i] &= \text{alfa}[i] * L[i], \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $a = u_a$ ;  $s = u_b$ ;  $c = i_a$ ;  $r = i_b$ ;  
 $e = \omega$ ;  $f = \hat{\Psi}_a$ ;  $g = \hat{\Psi}_b$ ;  $k = \hat{i}_a$ ;  $l = \hat{i}_b$ ;  
 $m = \tilde{i}_a$ ;  $n = \tilde{i}_b$ ;  $o = \hat{\Psi}_a$ ;  $u = \Phi_a$ ;  $q = \Phi_b$ ;  
 $t = \hat{\Psi}_b$ ;  $kpsi = k_\psi$ ;  $ki = k_i$ ;  $p = \rho$ ;  
 $gb = \gamma_b$ ;  $gd = \gamma_d$ ;  $gp = \gamma_p$ .

В качестве параметров  $k$  и  $Ts$  выступают параметры трапецеидальных цифровых интеграторов.

### Оценка настроечных коэффициентов

Для оценки настроечных коэффициентов использован метод, предложенный в [15].

В его основе лежит планирование эксперимента. На основе анализа вариантов [15] выбран центрально-композиционный план второго порядка. Поскольку все исследования проводятся на асинхронных электродвигателях мощностью 3 кВт, то выбран диапазон от 2 до 1 кВт. В качестве факторов выбраны мощность асинхронного электродвигателя и его скорость вращения. Полученные данные сведены в табл. 1.

В табл. 2 согласно [15] представлены исходные данные для составления плана эксперимента. В табл. 3 представлена матрица планирования.

На основании матрицы планирования проведена серия экспериментов, на основе которых были получены значения результирующих функций. Далее по методике, изложенной в [15], рассчитаны коэффициенты уравнений регрессий, проверены значимости каждого коэффициента и их достоверность. На основании полученных данных составлены уравнения регрессий. Далее, подставляя значения факторов в полученные уравнения регрессии, получены и раскодированы значения требуемых настроечных коэффициентов. В табл. 4 представлена матрица значений результирующих настроечных коэффициентов.

В табл. 5 представлены искомые настроечные коэффициенты для асинхронного электродвигателя АИР100S4.

Для автоматического применения данного метода (первичная оценка параметров схемы замещения преобразователем частоты при первом подключении к нему нового асинхронного электродвигателя) предполагается наличие готовой библиотеки настроечных коэффициентов при заранее выбранных факторах, которые указываются в системе управления для корректной идентификации параметров схемы замещения.

Табл. 1. Описание факторов

Фактор	Мощность двигателя, Вт	Скорость вращения, об/мин
Условное обозначение	X1	X2
Основной уровень	2000	1200
Интервал	1000	200
Верхний уровень	3000	1400
Нижний уровень	1000	1000

Табл. 2. Исходные данные для планирования эксперимента

Исходные данные	Значение
Количество факторов	2,000
Количество экспериментов	9,000
Центральная точка	1,000
Полный факторный эксперимент	4,000
Звездная точка	1
Число звездных точек	4
Расстояние между центральной и звездной точкой	0,667

Табл. 3. Матрица планирования

Фактор	Номер опыта	Входной фактор			Фактор взаимодействия		
		X0	X1	X2	X1 <sup>2</sup>	X2 <sup>2</sup>	X1*X2
Полный факторный эксперимент	1	1	-1	-1	0,333	0,333	1
	2	1	-1	1	0,333	0,333	-1
	3	1	1	-1	0,333	0,333	-1
	4	1	1	1	0,333	0,333	1
Звездные точки	5	1	-1	0	0,333	-0,667	0
	6	1	1	0	0,333	-0,667	0
	7	1	0	-1	-0,667	0,333	0
	8	1	0	1	-0,667	0,333	0
Центр плана	9	1	0	0	-0,667	-0,667	0

Табл. 4. Матрица значений настроечных коэффициентов

Номер двигателя	$k_{\psi}$	$k_i$	$\gamma_b$	$\gamma_d$	$\gamma_p$	$\gamma_{\psi}$
1	5	50	10000	10	500	1
2	4,6	48	10000	9,5	450	1
3	4,8	46	10000	9,7	420	1
4	4,5	47	10000	9,6	405	1
5	4,7	45	10000	9,8	390	1
6	4,4	46	10000	9,5	375	1
7	4,6	44	10000	9,6	350	1
8	4,5	45	10000	9,5	330	1
9	4,4	44	10000	9,4	300	1

Табл. 5. Настроечные коэффициенты для двигателя АИР100S4

$k_{\psi}$	$k_i$	$\gamma_b$	$\gamma_d$	$\gamma_p$	$\gamma_{\psi}$
5	4,7	45	10000	9,8	390

### **Математическое моделирование. Основные результаты**

На основании системы разностных уравнений (2) разработана математическая модель в программе Matlab. В качестве входных данных выступают:

- массивы токов и напряжений на статоре асинхронного электродвигателя;
- паспортные данные двигателя;
- поправочные коэффициенты.

В качестве массивов и токов напряжений могут служить данные, полученные экспериментальным или расчетным путем и преобразованные (пересчитанные) по формулам преобразования «3 – в – 2» для их корректной обработки в двухфазной математической модели асинхронного электродвигателя.

Выходными данными являются:

- активное сопротивление фазы ротора;

- индуктивность фазы статора (ротора);

- индуктивность взаимной индукции.

Все расчеты проводились для двигателя АИР100S4У3. Для сравнения полученных результатов параметры схемы замещения также были просчитаны по паспортным данным на основе методики Б. И. Фираго [16].

Сравнительная характеристика полученных данных приведена в табл. 6.

Анализируя полученные результаты, можно увидеть, что точность расчетов оптимизированного метода не уступает оригинальному методу. Пробные испытания широтно-импульсного преобразователя со вшитым в прошивку оптимизированным методом показали хорошую адаптивность метода к микроконтроллерам и экономном потреблении его ресурсов.

Табл. 6. Сравнительная характеристика расчетных параметров схемы замещения

Параметр	Оригинальный метод	Оптимизированный метод	Методика Б. И. Фираго
Активное сопротивление фазы статора, Ом	2,410	2,419	2,201
Активное сопротивление фазы ротора, Ом	2,070	2,078	2,050
Индуктивность фазы статора, Гн	0,220	0,223	0,203
Индуктивность фазы ротора, Гн	0,220	0,223	0,203
Индуктивность взаимной индукции, Гн	0,205	0,209	0,22

### Выводы

В результате произведенных исследований получен оптимизированный метод предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, который лишен недостатков оригинального метода. Применение широтно-импульсного преобразователя с возможностью формирования полигармонического напряжения для идентификации параметров дает возможность широкого применения полученного метода, в том числе

и в первичной адаптации преобразователя частоты при его первом включении. Применение уравнений регрессии дает возможность автоматической подборки оптимальных настроечных коэффициентов, а использование разностных уравнений позволяет применять данный метод в прошивках микроконтроллеров. В плане дальнейшего развития и доработки данного метода для получения оптимальной скорости идентификации можно предусмотреть отдельный код для первичной оценки идентифицируемых параметров.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пересада, С. М.** Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. – № 34. – С. 27–34.
2. **Третьяков, А. С.** Моделирование тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей при питании от синусоидального источника напряжения / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 66–73.
3. **Терёхин, А. А.** Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А. А. Терёхин, Д. А. Даденков // Вестн. ПНИПУ. – 2017. – № 22. – С. 55–66.
4. **Боловин, Е. В.** Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей / Е. В. Боловин // Науч. вестн. НГТУ. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 7–27.
5. **Lima, A. M. N.** Nonlinear parameter estimation of steady-state induction machine models / A. M. N. Lima, C. B. Jacobina, E. B. de Souza Filho // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1997. – Vol. 44, № 3. – P. 390–397.
6. **Wade, S.** A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines / S. Wade, M. W. Dunnigan, B. W. Williams // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1997. – Vol. 44, № 2. – С. 247–257.
7. Prediction of equivalent circuit parameters of induction motors by DC decay test using voltage-source PWM inverter / T. Oyama [et al.] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. – 2009. – P. 1–6.

8. **Горячев, О. В.** Сравнительный анализ алгоритмов расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / О. В. Горячев, А. О. Степочкин // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2016. – Вып. 12, ч. 4. – С. 133–139.
9. **Каширских, В. Г.** Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: монография / В. Г. Каширских. – Кемерово: КузГТУ, 2005. – 139 с.
10. **Усольцев, А. А.** Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А. А. Усольцев, Д. В. Лукичев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 35–41.
11. **Gastli, A.** Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test / A. Gastli // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, № 1. – P. 51–56.
12. **Jacobina, C. В.** Estimating the parameters of induction machines at standstill / C. В. Jacobina, J. E. C. Filho, A. M. N. Lima // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2002. – Vol. 17, № 1. – P. 85–89.
13. **Castaldi, P.** Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / P. Castaldi, A. Tilli // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 13, № 3. – P. 386–400.
14. **Третьяков, А. С.** Использование разностных уравнений для работы с системами управления силовым преобразователем на основе микроконтроллеров / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов // Современные проблемы машиноведения: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 115–118.
15. **Грачев, Ю. П.** Математические методы планирования эксперимента / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – Москва: ДеЛипринт, 2005. – 296 с.
16. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

*Статья сдана в редакцию 22 августа 2023 года*

Контакты:

loggie121@gmail.com (Третьяков Артем Сергеевич);  
kapitonov1987@gmail.com (Капитонов Олег Александрович);  
emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич).

***A. S. TRETIKOV, O. A. KAPITONOV, G. S. LENEVSKIY***

## **PRELIMINARY IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR SUBSTITUTION SCHEME PARAMETERS**

### **Abstract**

This article discusses the issue of preliminary identification of parameters for the induction motor substitution scheme. An analysis of methods for implementing the preliminary identification is presented, and on its basis, the method of independent testing is selected to identify all parameters of the substitution scheme. The method is optimized for its use in microprocessor systems based on ARM architecture microcontrollers. Mathematical modeling has been carried out in order to check the adequacy, convergence and performance speed of the resulting optimized method.

### **Keywords:**

induction motor, substitution scheme, parameter identification, preliminary identification, experiment planning, regression equations, difference equation method.

### **For citation:**

Tretiakov, A. S. Preliminary identification of induction motor substitution scheme parameters / A. S. Tretiakov, O. A. Kapitonov, G. S. Lenevskiy // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 84–92.

ЭКОНОМИКА.  
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_93

УДК 338.45

**О. Д. МАКАРЕВИЧ**

**Т. А. БОРОДИЧ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ОЦЕНКА ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Аннотация**

Представлены результаты аналитического обзора тенденций развития промышленного комплекса Республики Беларусь за 2019–2022 гг. в разрезе динамического развития в целом, а также с учетом территориального деления национальной экономики. Сделан упор на особенности развития промышленности в Могилевской области, по результатам изучения которых проведена оценка промышленного потенциала региона и сделаны выводы о возможных резервах его роста в будущем.

**Ключевые слова:**

промышленность, структура производства, региональное развитие, промышленный потенциал.

**Для цитирования:**

Макаревич, О. Д. Аналитический обзор результатов развития промышленного комплекса Республики Беларусь и оценка промышленного потенциала Могилевской области / О. Д. Макаревич, Т. А. Бородич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 93–102.

**Введение**

Одним из наиболее значимых и крупных комплексов экономических видов деятельности Республики Беларусь является промышленный, который оказывает существенное влияние на динамику всех показателей национальной экономики. Промышленное производство формирует четверть валового внутреннего продукта Республики Беларусь, причем его доля растет: этот показатель составил 25,5 % в 2020 г., 27,1 % в 2021 г. и 28,3 % в 2022 г. [1]. Актуальность темы исследования определяется тем, что применение комплексного аналитического инструментария для выявления тенденций развития отдельных секторов

экономики страны в разрезе экономических видов деятельности позволяет планировать стратегические направления развития промышленного комплекса и тем самым укреплять конкурентные позиции на рынке.

**Основная часть**

Промышленность Республики Беларусь, в соответствии с ОКРБ 005–2011, представлена такими видами экономической деятельности, как горнодобывающая, обрабатывающая промышленность, снабжение электроэнергией, газом, паром и т. д., водоснабжение, сбор, обработка и удаление отходов. На рис. 1 наглядно представлена информация о

структуре вышеназванных видов экономической деятельности по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2022 г.

Аналитическая информация свидетельствует о том, что обрабатываю-

щая промышленность занимает 89,5 % в объеме промышленного производства в 2022 г. Другие виды экономической деятельности имеют незначительный удельный вес в структуре промышленности.

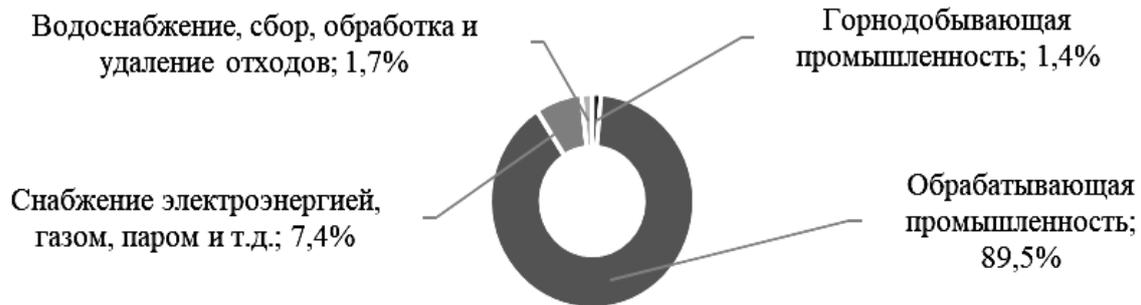


Рис. 1. Структура промышленного производства Республики Беларусь в 2022 г.

Анализ изменения структуры промышленного производства в Республике Беларусь за период с 2017 г. по 2022 г. позволил сделать вывод о том, что обрабатывающая промышленность является основной отраслью промышленности Республики Беларусь на протяжении всего периода наблюдения, ее доля в общем объеме промышленного производства составила от 85,6 % до 89,5 %. Доля горнодобывающей промышленности в общем объеме промышленного производства оставалась относительно стабильной и составляла от 1,1 % до 1,4 %. Доля снабжения электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом в общем объеме промышленного производства колебалась от 7,7 % до 11,5 %. Доля водоснабжения, сбора, обработки и удаления отходов в общем объеме промышленного производства оставалась относительно стабильной и составляла около 1,7 %. В целом, структура объема промышленного производства в Республике Беларусь оставалась относительно стабильной в течение всего периода наблюдения, имелись неко-

торые колебания в долях отдельных отраслей. Это свидетельствует о сохранении структурно-видовой деятельности экономики страны.

Для оценки тенденции развития промышленного производства в отдельные годы анализируемого периода на рис. 2 изучены темпы роста объемов промышленного производства в Беларуси с использованием информации из [1].

В текущих ценах наибольший рост наблюдается в 2021 г., а в 2019–2020 гг. – наименьший. В 2022 г. наблюдается замедление развития промышленности, о чем свидетельствует более низкий темп роста: 108,83 % против 131,64 % в 2021 г. Таким образом, наблюдается тенденция замедления темпов развития промышленного производства, что свидетельствует о наметившейся отрицательной тенденции и необходимости разработки мероприятий по поддержке промышленного сектора экономики страны.

Для более объективной оценки развития промышленного комплекса проведен аналитический обзор темпов развития объемов промышленного про-

изводства в сопоставимых ценах и результаты представлены на рис. 3.

В сопоставимых ценах (см. рис. 3) в 2020 г. наблюдается снижение объемов производства как в целом по промышленности, так и по видам экономической деятельности. Сложившаяся ситуация объективно обусловлена падением объемов производства и в горнодобывающей, и в обрабатывающей

промышленности: в 2020 г. объемы производства в этих отраслях промышленности снизились, по сравнению с предыдущим годом, почти на 2,2 % и 0,2 % соответственно. В 2022 г. общее падение объема производства в сопоставимых ценах обусловлено снижением объема производства в обрабатывающей промышленности – на 6,2 %.



Рис. 2. Динамика объема производства продукции промышленности в действующих ценах

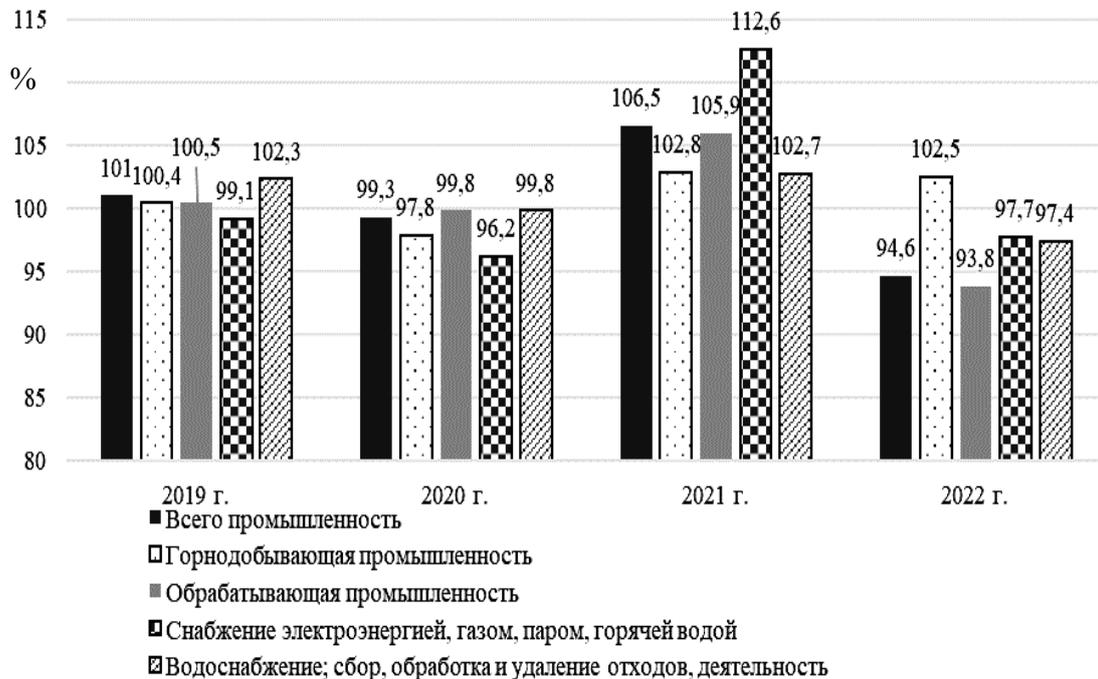


Рис. 3. Динамика объема произведенной продукции по видам экономической деятельности в сопоставимых ценах за 2019–2022 гг.

Одним из основных критериев социально-экономического развития национальной экономики выступает валовой внутренний продукт. Анализ региональной структуры его развития за 2019–2022 гг. свидетельствует о том, что более половины ВВП страны формируют три региона: г. Минск, Минская и Гомельская области (рис. 4) [2]. Изменения в структуре ВВП обусловлены сложившейся структурой экономики регионов. Так,

в 2022 г. наблюдается рост доли валового регионального продукта Могилевской области на 0,24 п. п. относительно 2021 г., когда нераспределённая часть ВРП была включена в соответствующие регионы. Аналогичная ситуация наблюдается по Минской области – 0,14 п. п., Брестской – 0,69 п. п., Гродненской – 0,32 п. п. По Гомельской области и г. Минску наблюдается снижение доли ВРП.

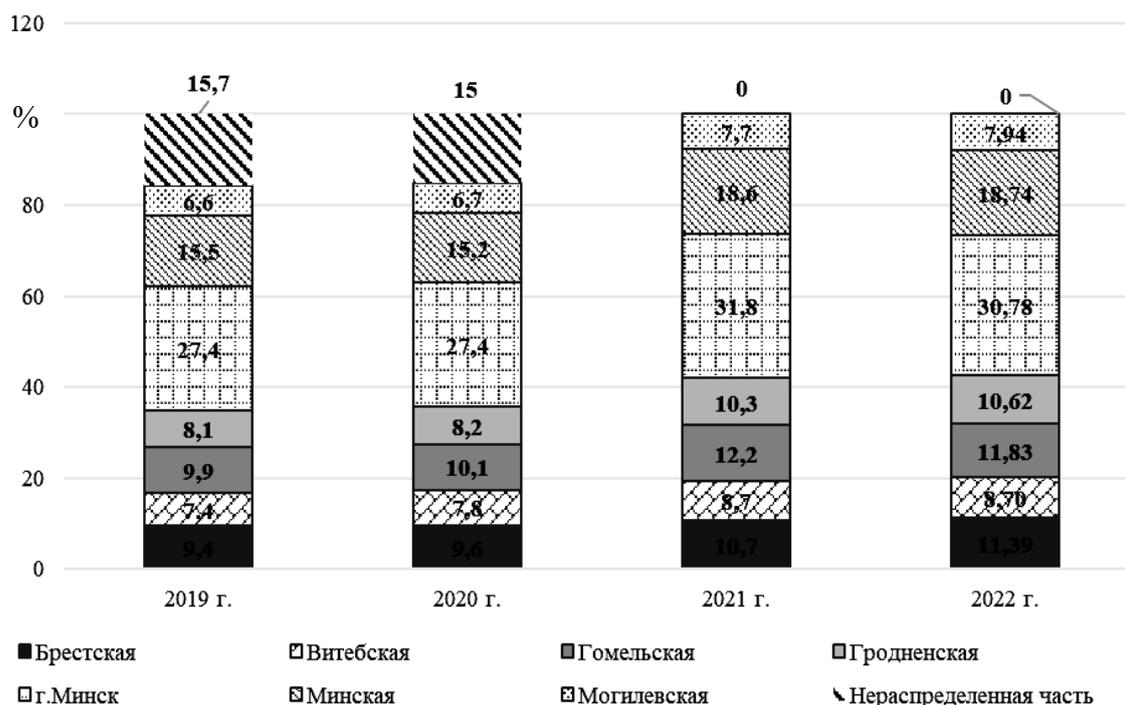


Рис. 4. Структура ВВП в разрезе регионов за 2019–2022 гг.

По итогам 2021 г. рост ВРП достигнут в Минской области (102,3 % к 2020 г.), Брестской (102,5 %), г. Минске (103,2 %), Могилевской области (100,7 %), Гомельской (100,7 %), Гродненской (105,1 %). В Витебской области допущено падение ВРП до 99,6 % к 2020 г.

В 2022 г. в сопоставимых ценах наблюдается падение ВРП по всем областям относительно 2021 г, что обусловлено экономическим кризисом на фоне политических событий (рис. 5).

Наиболее резкое снижение ВРП характерно для Минской области и г. Минска, наименьшее – для Брестской, Витебской и Могилевской областей, что обусловлено сосредоточением наиболее пострадавших от санкций производств в Минской области и г. Минске.

Основная доля ВРП формируется предприятиями промышленного комплекса (рис. 6).

В республиканском разделении труда основными индустриальными ре-

гионами являются Гомельская (за 2022 г. – 19,9 % объема промышленного производства страны), Минская (20,5 %), Витебская (12,5 %) области и г. Минск (15,6 %). На долю остальных регионов

(Брестской, Гродненской и Могилевской областей) приходится 31,5 % объема промышленного производства республики (рис. 7) [3].

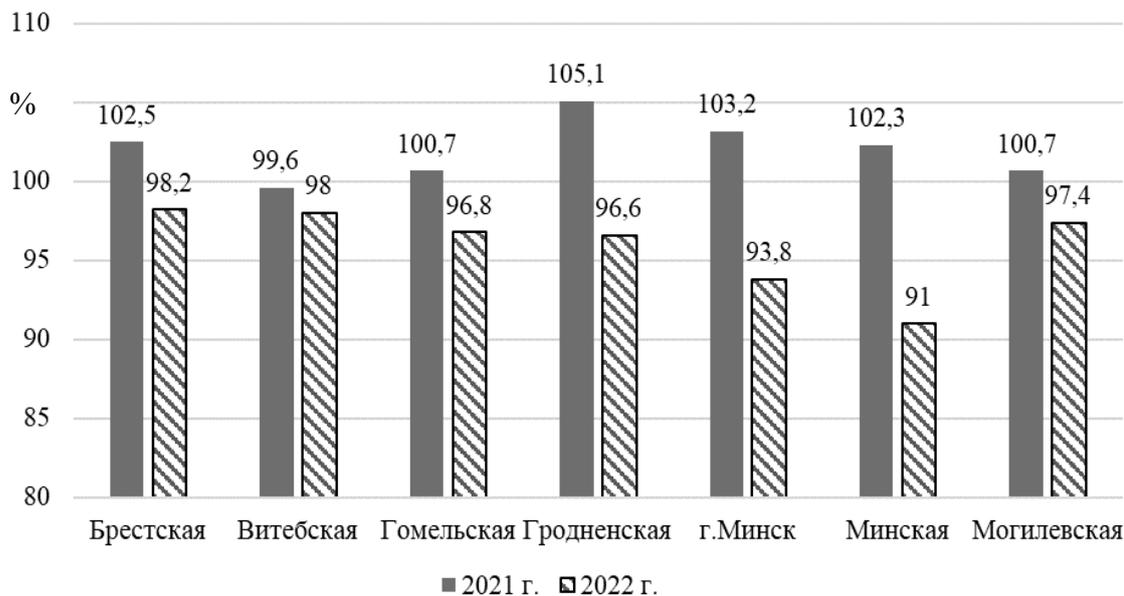


Рис. 5. Динамика ВРП в сопоставимых ценах относительно предыдущего года

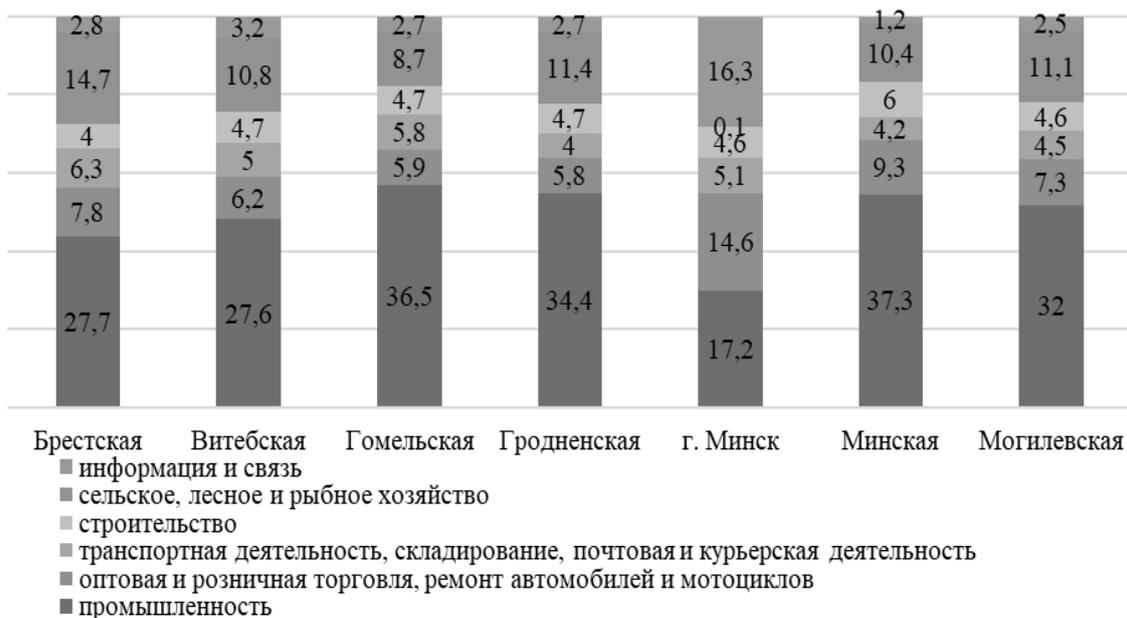


Рис. 6. Структура ВРП в 2022 г. по видам экономической деятельности



Рис. 7. Структура объема производства промышленности в разрезе регионов в 2022 г.

Основным видом деятельности является обрабатывающая промышленность, которая формирует от 15,1 % ВРП в г. Минске до 40,6 % в Минской области. В 2022 г. отрасль внесла положительный вклад в ВРП во всех регионах, кроме Витебской области («минус» 0,5 %) и г. Минска («минус» 0,1 %), чему способствовало создание условий для эффективного развития предприятий, глубоко перерабатывающих отече-

ственное сырье.

В рамках дальнейшего аналитического обзора проведена оценка развития промышленного комплекса Могилевской области как региона с низкими показателями эффективности производственной деятельности. Основные показатели работы промышленности Могилевской области в 2020–2022 гг. представлены в табл. 1 [3].

Табл. 1. Динамика показателей работы промышленности Могилевской области в 2020–2022 гг.

Показатель	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Темп роста, %	
				2021 г. к 2020 г.	2022 г. к 2021 г.
Объем промышленного производства, млн р.	10 733,7	13 487,9	14 706	125,7	109,0
Доля промышленности в ВРП, %	32,8	30,8	32	93,9	103,9
Число организаций промышленности на конец года, ед.	16 391	16 287	16 504	99,4	101,3
Запасы готовой продукции на складах организаций промышленности в процентах к среднемесячному объему производства	60	52	63,9	86,7	122,9
Удельный вес отгруженной инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции в организациях промышленности, %	12,3	13,5	13,3	109,8	98,5
Рентабельность продаж, %	7	7,4	7,5	105,7	101,4

Как можно видеть из табл. 1, в текущих ценах рост объема производства в 2021 г. составил 125,7 %, в 2022 г. – 109 %, т. е. наблюдается замедление темпов роста объема производства про-

мышленности Могилевского региона. Удельный вес отгруженной инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции в организациях обрабатывающей промышленности Мо-

гилевской области в 2022 г. снизился, по сравнению с уровнем 2021 г., на 0,2 п. п. и составил 13,3 %. Рост в 2022 г. запасов готовой продукции на складах организаций промышленности в процентах к среднемесячному объему производства указывает на наличие проблем со сбытом произведенной продукции, что обусловлено ростом санкционного давления на Республику Беларусь, необходимость переориентации производств на потребности восточных рынков (Азии, РФ).

Исследование структуры обрабатывающей промышленности на основе статистических данных по Могилевской области [2] показывает, что наибольший удельный вес в ее структуре занимает производство продуктов питания, напитков и табачных изделий – около 30 %. Это свидетельствует, прежде всего, об активном участии пищевой промышленности в обеспечении продовольственной безопасности региона. При этом в период 2019–2020 гг. удельный вес этого вида экономической деятельности увеличивался, а в 2021 г. снижается до 25,71 %. В результате анализируемый показатель снизился, по сравнению с 2020 г., почти на 3,64 п. п. На долю текстильной промышленности приходится около 4 %, причем на протяжении анализируемого периода наблюдается ее снижение с 3,86 % в 2019 г. до 3,42 % в 2021 г. Это свидетельствует о замедляющемся развитии данного производства по сравнению с развитием обрабатывающей промышленности в целом.

В процессе аналитической оценки развития промышленного комплекса на региональном уровне важным является комплексная оценка потенциала его развития. Промышленный потенциал региона – это комплексная характеристика, позволяющая оценить тенденции

развития промышленного комплекса с увязкой с социально-экономическим уровнем развития региона. Высокий уровень экономического развития региона обеспечивается конкурентоспособным производимым продуктом в рамках промышленного производства, а также является значимой характеристикой в обеспечении места региона в разделении труда.

С целью проведения комплексной оценки промышленного потенциала Могилевской области в расчетах была использована методика, предложенная А. О. Ларионовым, в которой оценка промышленного потенциала региона проводится в разрезе материально-технического потенциала, инновационного потенциала, трудового потенциала, инфраструктурного потенциала, инвестиционного потенциала, используя для этого группы традиционных показателей эффективности по видам ресурсов и видам деятельности [4].

В табл. 2 представлены исходные данные за 2020–2022 гг. по результатам работы промышленного комплекса Могилевской области, используемые для расчета промышленного потенциала региона.

Представленные в табл. 2 данные требуют дальнейшей нормализации значений, для чего в соответствии с принятой методикой применен метод многомерного сравнительного анализа, который позволяет учитывать не только абсолютные величины показателей региона, но и степень их близости (дальности) к показателю-эталону.

Результаты сводных расчетов значений групповых и интегрального показателей промышленного потенциала Могилевской области представлены в табл. 3.

Табл. 2. Исходные данные для расчёта промышленного потенциала Могилёвской области

Показатель	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Индекс	
				2021 г./ 2020 г.	2022 г./ 2021 г.
<b>1. Материально-технический потенциал промышленности</b>					
1.1. Среднегодовая стоимость основных производственных средств на душу населения страны	10,3	11,4	13,9	1,11	1,22
1.2. Уровень износа основных средств	41	44	43,2	1,07	0,98
1.3. Фондоотдача	1,02	1,17	1,06	1,14	0,91
<b>2. Инновационный потенциал промышленности</b>					
2.1. Удельный вес инновационно-активных организаций в числе всех организаций промышленности	19,2	19,6	20,1	1,02	1,03
2.2. Доля отгруженной инновационной продукции в общем объеме промышленной продукции	12,3	13,5	13,3	1,10	0,99
2.3. Удельный вес затрат на технологические инновации в промышленных инвестициях	5,57	2,54	1,51	0,46	0,60
2.4. Число работников, занятых исследованиями и конструкторскими разработками, в расчете на тысячу занятых в промышленности	14,20	16,63	17,82	1,17	1,07
<b>3. Финансовый потенциал промышленности</b>					
3.1. Доля прибыльных организаций в общем количестве промышленных организаций	0,81	0,838	0,898	1,03	1,07
3.2. Сальдированный финансовый результат промышленных предприятий на 1 р. основных средств	-0,01	0,06	0,05	-5,55	0,93
3.3. Прибыльность активов организаций	7,4	8,6	7,1	1,16	0,83
<b>4. Трудовой потенциал промышленности</b>					
4.1. Доля промышленно-производственного персонала в общей численности занятых в экономике	12,3	12,2	14,5	0,99	1,19
4.2. Доля молодых специалистов (выпускников) с высшим образованием в общей численности промышленного персонала	79,9	80,2	80,3	1,00	1,00
4.3. Доля молодых специалистов (выпускников) со средним профессиональным образованием в общей численности занятых	67,3	67,9	66,8	1,01	0,98
<b>5. Инфраструктурный потенциал промышленности</b>					
5.1. Густота железнодорожных путей общего пользования, километров на 1000 км <sup>2</sup> территории	28,09	28,12	28,12	1,001	1,000
5.2. Густота автомобильных дорог с твердым покрытием, километров дорог на 1000 км <sup>2</sup> территории	399,48	400,6	400,5	1,003	1,000
<b>6. Инвестиционный потенциал промышленности</b>					
6.1. Объем инвестиций в основной капитал промышленности на душу населения страны	1997,54	2232,46	2160,64	1,118	0,968
6.2. Удельный вес инвестиций в активную часть основных средств (машины, оборудование и транспортные средства) в общем объеме инвестиций в основной капитал организаций промышленности	52,3	41,7	35	0,797	0,839

Табл. 3. Сводные расчеты промышленного потенциала региона по его составляющим

Наименование потенциала	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Вес
Ир материально-технический	0,90	0,94	0,94	0,15
Ир инновационный	0,94	0,87	0,85	0,17
Ир финансовый	0,57	0,97	0,94	0,17
Ир трудовой	0,94	0,94	1,00	0,16
Ир инфраструктурный	0,998	1,000	1,000	0,15
Ир инвестиционный	0,95	0,90	0,82	0,2
Итого промышленный потенциал региона	0,879	0,933	0,919	1

Сравнительная оценка промышленного потенциала показала, что ухудшение позиций Могилёвской области в 2022 г. обусловлено низким техническим состоянием основных средств производства, малым числом организаций, выполняющих научные исследования и конструкторские разработки, со-

кращением объемов инвестиций в основной капитал, снижением финансовых результатов многих промышленных предприятий.

Более наглядно динамика промышленного потенциала Могилевской области представлена на рис. 8.

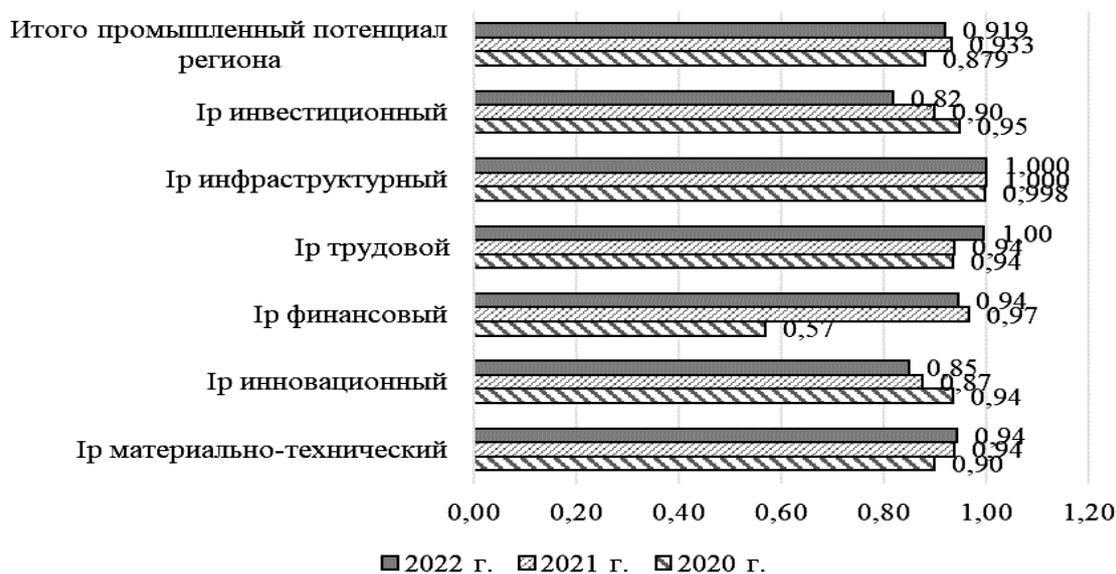


Рис. 8. Динамика промышленного потенциала Могилевской области

### Заключение

Проведенное аналитическое исследование состояния и развития промышленного комплекса Республики Беларусь и регионов позволяет сделать

следующие выводы.

Промышленное производство формирует четверть валового внутреннего продукта Беларуси. При этом обрабатывающая промышленность занимает 89,5 % в объеме промышленного производства

в 2022 г. Другие виды экономической деятельности имеют незначительный удельный вес в структуре промышленности. В 2022 г. наблюдается замедление развития промышленности. Более половины ВВП страны формируют три региона: г. Минск, Минская и Гомельская области. В республиканском разделении труда основными промышленными регионами являются Гомельская (за 2022 г. – 19,9 % объема промышленного производства страны), Минская (20,5 %), Витебская (12,5 %) области и г. Минск (15,6 %). На долю остальных регионов (Брестской, Гродненской и

Могилевской областей) приходится 31,5 % объема промышленного производства республики.

В текущих ценах по Могилевской области рост объема производства в 2021 г. составил 125,7 %, в 2022 г. – 109 %, т. е. наблюдается замедление темпов роста объема производства промышленности региона.

Оценка промышленного потенциала Могилевской области по данным за 2020–2022 гг. свидетельствует о наличии резервов роста в инновационно-инвестиционном секторе развития промышленности региона.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленный комплекс Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infocenter.nlb.by/ekonomika-i-biznes/promyshlennost/>. – Дата доступа: 15.09.2023.
2. Палковская, Е. М. Регионы Республики Беларусь 2022. Социально-экономические показатели: в 2 т. / Е. М. Палковская. – Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2022. – Т. 1. – 730 с.
3. Социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь, январь – декабрь 2022 г. – Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2023. – 286 с.
4. Ларионов, А. О. Оценка промышленного потенциала региона / А. О. Ларионов // Проблемы развития территории. – 2015. – Вып. 2 (76). – С. 45–61.

*Статья сдана в редакцию 6 октября 2023 года*

Контакты:  
25092007@tut.by (Макаревич Ольга Дмитриевна);  
tanjabor11@gmail.com (Бородич Татьяна Анатольевна).

***O. D. MAKAREVICH, T. A. BORODICH***

#### **AN ANALYTICAL REVIEW OF THE RESULTS OF BELARUSIAN INDUSTRIAL COMPLEX DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF INDUSTRIAL POTENTIAL OF THE MOGILEV REGION**

##### **Abstract**

The article presents the results of an analytical review of trends in the development of the industrial complex of the Republic of Belarus for 2019–2022 in the context of dynamic development in general, as well as taking into account the territorial division of the national economy. The emphasis is placed on the peculiarities of the Mogilev region industrial development, and based on them an assessment of the industrial potential of the region has been carried out with conclusions being drawn about possible reserves for its growth in the future.

##### **Keywords:**

industry, production structure, regional development, industrial potential.

##### **For citation:**

Makarevich, O. D. An analytical review of the results of Belarusian industrial complex development and assessment of industrial potential of the Mogilev region / O. D. Makarevich, T. A. Borodich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 93–102.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_103

УДК 656.1

**Т. В. РОМАНЬКОВА**, канд. экон. наук, доц.  
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## ПОКАЗАТЕЛИ МОНИТОРИНГА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

### Аннотация

Обоснованы показатели мониторинга городских пассажирских перевозок в рамках направлений его проведения и структурных элементов. Определено влияние показателей мониторинга городских пассажирских перевозок на развитие и эффективность функционирования транспортной системы города. Предложен способ установления уровня развития городской транспортной системы, позволяющий выявить неэффективно функционирующие ее структурные элементы и разработать направления дальнейшего развития.

### Ключевые слова:

мониторинг городских пассажирских перевозок, эффективность функционирования, городская транспортная система, транспортная сеть, показатели, транспортная доступность и обеспеченность, пассажирооборот, число перевезенных пассажиров.

### Для цитирования:

Романькова, Т. В. Показатели мониторинга результатов работы городского пассажирского транспорта / Т. В. Романькова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 103–110.

### Введение

Перевозки пассажиров в рамках региона осуществляются в городах, междугороднем, межрайонном и международном сообщениях. Как предлагалось ранее [6], проведение мониторинга региональной транспортной системы осуществляется:

- в разрезе структурных элементов (транспортная инфраструктура региона; транспортные предприятия; транспортные средства; региональное управление);
- по направлениям (наличие; объем выполненных работ; эффективность использования; безопасность и экологичность);
- по показателям, характеризующим результативность работы пассажирского и грузового транспорта.

При этом следует отметить, что транспортная система региона имеет сложную структуру и включает перевозки пассажиров и грузов. Перевозка

пассажира (грузов) осуществляется:

- в пределах города;
- за границами города.

Структура транспортной системы региона представлена на рис. 1.

Таким образом, региональная транспортная система состоит из двух основных элементов: городской и внегородской.

Для повышения эффективности функционирования региональной транспортной системы возникает необходимость оценить влияние каждого ее элемента, что позволит выявить наиболее важные из них, т. е. те, которые в первую очередь приведут к наибольшему экономическому эффекту в короткие сроки.

В связи с тем, что не все элементы имеют количественную характеристику, предлагается использовать метод экспертных оценок, т. е. эксперты, исходя из установленной шкалы, присваивают высший ранг элементу, который счита-

ется самым важным (оказывает наибольшее влияние на результаты функционирования региональной транспорт-

ной системы), другим – балл присваивается в сравнении с ранее оцененными.



Рис. 1. Структура региональной транспортной системы

Для сбора информации применялись опросные листы. В качестве экспертов были привлечены высококвалифицированные специалисты транспортных организаций, имеющие большой практический опыт в исследуемой области.

Результаты обрабатывались следующим образом. Оценки, полученные в результате опроса экспертов, сводились в матрицу оценок. Для каждого элемента региональной транспортной системы

подсчитывалась сумма рангов, отклонения от средней суммы рангов и квадрат отклонений. Затем рассчитывалась степень согласованности мнений экспертов с помощью расчета коэффициента конкордации.

Результаты опроса экспертов, полученные при обработке анкет с рассчитанным весовым коэффициентом, представлены в табл. 1.

Табл. 1. Значимость элементов региональной транспортной системы

Наименование элемента	Весовой коэффициент $B_i$	Значимость
<i>Городская транспортная система</i>		
1. Перевозка грузов	0,33	II
2. Перевозка пассажиров	0,67	I
Итого	1,0	–
<i>Внегородская транспортная система</i>		
1. Перевозка грузов	0,82	I
2. Перевозка пассажиров	0,18	II
Итого	1,0	–

Весовой коэффициент указывает оценку относительной роли данного элемента в городской (внегородской) транспортной системе. При этом сумма весовых коэффициентов для элементов одной группы равна 1.

Как показывают данные табл. 1, наиболее значимым элементом городской транспортной системы, по мнению экспертов, является «перевозка пассажиров». Наименее значимым – «перевозка грузов по городу».

Среди элементов внегородской транспортной системы наиболее важным, т. е. оказывающим наибольшее влияние на развитие региона и его основные макроэкономические показатели, выступает «перевозка грузов», т. к. его удельный вес равен 82 %, а наименее – «перевозка пассажиров» (18 %).

Таким образом, совершенствование и повышение результативности работы городской транспортной системы должно осуществляться за счет перевозки пассажиров в городах региона.

Пассажирский транспорт представляет собой отрасль, которая оказывает услуги по перевозке городского населения. Его основной задачей выступает удовлетворение потребностей населения в перемещении с высоким качеством оказываемых услуг и уровнем безопасности.

Поэтому необходимо осуществлять мониторинг городских пассажирских перевозок по обоснованным показателям.

### Основная часть

Мониторинг городских пассажирских перевозок представляет собой систематическое наблюдение за состоянием и результатами работы городского пассажирского транспорта, что позволит оценить, спрогнозировать и разработать пути развития и эффективности функционирования пассажирского транспорта в городе.

Проблеме мониторинга городского пассажирского транспорта уделено не-

достаточное внимание и посвящены работы лишь отдельных зарубежных авторов: Т. В. Меркеловой и Ю. С. Коротких, И. М. Поповой, А. П. Беликова, Е. А. Поповой [2, 5].

Так как транспортная инфраструктура города обеспечивает перевозку пассажиров и состоит из большого числа элементов, учесть которые достаточно сложно, то предлагается рассмотреть основные из них.

#### 1. Транспортная сеть.

##### 1.1. Городская:

- автомобильная;
- железнодорожная;
- троллейбусных линий;
- трамвайных линий;
- линий метрополитена.

2. Пассажирские железнодорожные станции, остановочные пункты, находящиеся в пределах города.

3. Аэропорты, остановки общественного транспорта.

4. Станции технического обслуживания, гаражи и депо.

5. Организации по ремонту транспортных средств.

##### 6. Заправочные станции и др.

Наличие транспортной инфраструктуры, применяемой для перевозки пассажиров в городах, предлагается оценить относительными показателями, характеризующими обеспеченность и транспортную доступность городского населения на основании расчета показателя относительной густоты транспортной сети (формула Э. Энгеля) [4]:

$$d_{kj} = \frac{L_{\text{ПРИВ.Э}j}^{\Gamma}}{\sqrt{S_j H_j}}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{ПРИВ.Э}j}^{\Gamma}$  – эксплуатационная длина приведенной городской (автомобильных маршрутов, троллейбусных и трамвайных линий, метрополитена) маршрутной сети, км;  $S_j$  – площадь  $j$ -го города, км<sup>2</sup>;  $H_j$  – численность населения  $j$ -го города, чел.

Среднее значение обеспеченности

городской транспортной сети остановочными пунктами, вокзалами, пассажирскими железнодорожными станциями, находящимися в пределах города, аэропортами, остановками общественного транспорта, станциями технического обслуживания, гаражами и депо, организациями по ремонту транспортных средств, заправочными станциями:

$$\overline{OB}_{OCT} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{OCTij}^{\Gamma}}{L_{ПРИВ.Эj}^{\Gamma}}, \quad (2)$$

где  $K_{OCTij}^{\Gamma}$  – число автовокзалов, остановок, остановочных пунктов, вокзалов на маршрутах  $i$ -го вида транспорта (автомобильного, железнодорожного) городской сети, шт.

Объем работы городской транспортной инфраструктуры предлагается оценить пассажироемкостью экономики города. Данный показатель позволит оценить вклад организаций, занимающихся перевозкой пассажиров в экономику города:

$$П_{EMj} = \frac{П_{ПРИВj}}{ВП_j}, \quad (3)$$

где  $П_{EMj}$  – пассажироемкость экономики  $j$ -го города, пасс.·км/млн р.;  $П_{ПРИВ.j}$  – приведенный пассажирооборот  $j$ -го города, пасс.·км;  $ВП_j$  – валовая стоимость всех произведенных товаров и услуг  $j$ -го города, млн р.

Эффективность эксплуатации городской транспортной инфраструктуры, используемой для перевозки пассажиров, предлагается оценивать удельным объемом пассажиров, пропущенных по путевой инфраструктуре города:

$$У\partial.n_j = \frac{\sum_{i=1}^n OB_{Пij}^{\Gamma}}{L_{ПРИВij}^{\Gamma}}, \quad (4)$$

где  $OB_{Пij}^{\Gamma}$  – объем перевезенных пассажиров путевой инфраструктурой по городу  $i$ -м видом транспорта, пасс.

Безопасность перевозок характеризуется аварийностью на городских дорогах, поэтому безопасность использования транспортной инфраструктуры предлагается оценить долей аварий при перевозке пассажиров, обусловленных слабо развитой городской инфраструктурой или несвоевременно выполненным ремонтом:

$$D_{ABj}^{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{AB.ИНФij}^{\Gamma}}{\sum_{i=1}^n K_{AB.ОБЩij}^{\Gamma}}, \quad (5)$$

где  $K_{AB.ИНФij}^{\Gamma}$  – число аварий в  $j$ -м городе при перевозке пассажиров  $i$ -ми видами транспорта за рассматриваемый период времени, обусловленных несвоевременно отремонтированной или слабо развитой городской инфраструктурой;  $K_{AB.ОБЩij}^{\Gamma}$  – общее число аварий в  $j$ -м городе, произошедших на различных видах транспорта в городе за рассматриваемый период времени.

Очень важным элементом транспортной системы города выступают транспортные предприятия (организации). Их наличие целесообразно оценивать количеством и масштабом. Для оценки масштаба предлагается использовать такой показатель, как доля персонала городских транспортных предприятий по перевозке пассажиров в общей численности занятых в экономике города:

$$D_{Пij}^{\Pi} = \frac{\sum Ч_{Пij}^{\Pi}}{Ч_{3.Эkj}}, \quad (6)$$

где  $Ч_{Пij}^{\Pi}$  – численность персонала транспортных организаций  $j$ -го города, занимающихся перевозкой пассажиров  $i$ -ми видами транспорта, чел.;  $Ч_{3.Эkj}$  – числен-

ность населения, занятого в экономике  $j$ -го города, чел.

Объем работ, выполненных городскими транспортными организациями при перевозке пассажиров, характеризуется вкладом в валовую стоимость всех произведенных товаров и услуг городом:

$$D_{TP.Pj}^{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n OB_{Pij}^{\Pi}}{BP_j}, \quad (7)$$

где  $OB_{Tij}^{\Pi}$  – объем работ, выполненных транспортными предприятиями  $j$ -го города по перевозке пассажиров  $i$ -ми видами транспорта, р.;  $BP_j$  – валовая стоимость всех произведенных товаров и услуг  $j$ -го города, р.

Эффективность функционирования городских транспортных организаций, оказывающих услуги по перевозке пассажиров, оценивается коэффициентом рентабельности пассажирских перевозок

$$R_{PPj}^{GP} = \frac{\sum_{i=1}^n PP_{PRij}^{\Pi}}{\sum_{i=1}^n Z_{PRij}^{\Pi}}, \quad (8)$$

где  $PP_{PRij}^{\Pi}$ ,  $Z_{PRij}^{\Pi}$  – прибыль и затраты на перевозку пассажиров  $i$ -ми видами городского транспорта соответственно, р.

Безопасность процесса городских пассажирских перевозок, оказываемых транспортными организациями города, предлагается оценить на основании расчета доли аварий, произошедших по вине водителей, поломки транспортных средств при перевозке:

$$D_{AB.TPj}^{\Pi} = \frac{\sum K_{AB.Vij}^{\Pi}}{\sum K_{AB.OBij}^{\Pi}}, \quad (9)$$

где  $K_{AB.Vij}^{\Pi}$  – число аварий в  $j$ -м городе за рассматриваемый период времени, обу-

словленных ошибками водителей при управлении городскими пассажирскими транспортными средствами, их поломкой на  $i$ -м виде транспорта.

Третьим элементом городской транспортной системы выступают транспортные средства.

Наличие транспортных средств определяется их количеством и средним уровнем обеспеченности населения (пассажиров) города транспортными средствами:

$$OB_{TP.Cj}^{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{TP.Cij}^{\Pi}}{Ч_{Hj}}, \quad (10)$$

где  $K_{TP.Cij}^{\Pi}$  – количество пассажирских транспортных средств, используемых  $i$ -ми видами транспорта  $j$ -го города, ед.;  $Ч_{Hj}$  – численность населения  $j$ -го города (потенциальных пассажиров), чел.

Объем работ, выполненных городскими транспортными средствами, используемыми для перевозки пассажиров, описывают пассажирооборот приведенный и количество перевезенных пассажиров всеми видами пассажирского городского транспорта.

Пассажирооборот приведенный определяется по формуле

$$PO_{ПРИВ} = \sum P_i \cdot L_{ПРИВ.i}, \quad (11)$$

где  $P_i$  – число перевезенных пассажиров  $i$ -м видом городского транспорта за анализируемый период времени, тыс. пасс.

Эффективность использования городских транспортных средств целесообразно определять результативностью их работы, т. е. производительностью

$$P_{TP.Cj} = \frac{P_{TP..C.ПРИВj}}{\sum_{i=1}^n K_{TP.Cij}^{PC}}, \quad (12)$$

где  $P_{TP.C.ПРИВj}$  – приведенный пассажи-

рооборот городских транспортных средств  $i$ -х видов транспорта, пасс. · км.

Экологичность пассажирского транспорта определяется величиной выбросов загрязняющих веществ на основании данных статистического сборника по г. Могилеву.

При проведении мониторинга осуществляется постоянное отслеживание (контроль) результатов работы городского пассажирского транспорта по выделенным показателям. Их изменение в динамике (рост или снижение) покажет наметившиеся тенденции развития городской транспортной системы и позволит выявить пути ее совершенствования за счет пассажирского транспорта.

Повышение эффективности функционирования и развития транспортной системы города диагностируется при динамике:

1) роста (прямое влияние):

- относительной густоты городской транспортной сети;

- обеспеченности городской сети остановочными пунктами, вокзалами, пассажирскими железнодорожными станциями, находящимися в пределах города, аэропортами, остановками общественного транспорта, станциями технического обслуживания, гаражами и депо, организациями по ремонту транспортных средств, заправочными станциями;

- пассажироёмкости валовой стоимости всех произведенных товаров и услуг городом;

- удельного объема пассажиров, пропущенных по путевой инфраструктуре города;

- производительности городских пассажирских транспортных средств;

- доли персонала транспортных предприятий города по перевозке пассажиров в общей численности занятых в экономике города;

- объема работ, выполненных транспортными организациями города при перевозке пассажиров, характеризуется вкладом в валовую стоимость всех

произведенных товаров и услуг;

- коэффициента эффективности (рентабельности) городских пассажирских перевозок;

- среднего уровня обеспеченности населения города транспортными средствами;

- приведенного городского пассажирооборота и количества перевезенных пассажиров в городе;

2) снижения (обратное влияние):

- доли аварий при перевозке пассажиров, обусловленных слабо развитой городской инфраструктурой или несвоевременно выполненным ремонтом дорожной сети в городе;

- доли аварий, произошедших по вине водителей, поломки транспортных средств, при перевозке пассажиров в городе;

- экологичности городского пассажирского транспорта (величины выбросов загрязняющих веществ).

Установление уровня развития транспортной системы региона за счет пассажирских перевозок осуществляется в следующей последовательности.

1. По показателям, оказывающим прямое влияние на эффективность функционирования и развития транспортной системы города, рассчитываются динамические коэффициенты изменения  $K_{Д_i}^{ПП}$ :

$$K_{Д_i}^{ПП} = \frac{M_t}{M_{t-1}}, \quad (13)$$

где  $M_t$  – значение показателя  $M$  в отчетном году;  $M_{t-1}$  – значение показателя  $M$  в прошлом году.

2. По показателям, оказывающим обратное влияние на транспортную систему города, динамические коэффициенты изменения  $K_{Д_i}^{ОБ}$  определяются по формуле

$$K_{Д_i}^{ОБ} = \frac{M_{t-1}}{M_t}. \quad (14)$$

3. Расчет комплексного показателя, определяемого по средней геометрической величине, на основании коэффициентов динамики  $K_{Дi}$ :

$$K_{Д} = \sqrt[n]{K_{Д1} \cdot \dots \cdot K_{Дn}} \quad (15)$$

Уровень комплексного показателя будет свидетельствовать о степени развития городской транспортной системы по перевозке пассажиров.

Его значение будет характеризовать:

- 1) высокую степень развития ( $K_{Д} > 1,0$ );
- 2) среднюю степень развития ( $0,5 < K_{Д} < 1,0$ );
- 3) низкую степень развития ( $0,1 < K_{Д} < 0,49$ ).

### Заключение

Таким образом, проведение мониторинга по обоснованным показателям оценки развития и эффективности осуществления пассажирских перевозок в городе позволит:

1) выявить элементы городской транспортной системы при перевозке пассажиров, функционирующие или используемые неэффективно;

2) разработать комплекс мероприятий по направлениям проведения мониторинга городских пассажирских перевозок, способствующих повышению качества обслуживания пассажиров в городе;

3) сформировать информационную базу для разработки программы развития транспортного комплекса города по перевозке пассажиров.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горев, А. Э.** Развитие городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, О. В. Попова // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 2 (81). – С. 45–47.
2. **Меркелова, Т. В.** Способы организации мониторинга пассажиропотока общественного транспорта / Т. В. Меркелова, Ю. С. Коротких // Наука без границ. – 2021. – №4 (56). – С. 48–51.
3. Мониторинг рынка транспортных услуг : учебное пособие / А. А. Михальченко [и др.]. – Гомель: БелГУТ, 2017. – 271 с.
4. **Никольский, И. В.** Избранные труды / И. В. Никольский. – Смоленск: Ойкумена, 2009. – 332 с.
5. **Попова, И. М.** Внедрение системы мониторинга как возможность повышения эффективности работы городского пассажирского транспорта / И. М. Попова, А. П. Беликов, Е. А. Попова // Вестн. СГТУ. – 2013. – № 2 (71). – С. 344–347.
6. **Романькова, Т. В.** Методические подходы к мониторингу грузовых перевозок в региональной транспортной системе / Т. В. Романькова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 4 (77). – С. 101–109.

Статья сдана в редакцию 16 мая 2023 года

Контакты:

romankova.by@mail.ru (Романькова Татьяна Васильевна).

**T. V. ROMANKOVA**

## **INDICATORS FOR MONITORING PERFORMANCE OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION**

### **Abstract**

The article substantiates the indicators for monitoring urban passenger transportation within the framework of its directions and structural elements. The influence of indicators for monitoring urban passenger transportation on the development and efficiency of the city's transport system has been determined. A method has been proposed to establish the level of development of the urban transport system, which makes it possible to identify its ineffectively functioning structural elements and develop directions for further development.

### **Keywords:**

monitoring of urban passenger transportation, operational efficiency, urban transport system, transport network, indicators, transport accessibility and provision, passenger turnover, number of passengers transported.

### **For citation:**

Romankova, T. V. Indicators for monitoring performance of urban passenger transportation / T. V. Romankova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 93–110.

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_4\_111

УДК 332.12

**А. В. ШАДРАКОВ**, канд. геогр. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕХОДА К ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКЕ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И МЕСТНОМ УРОВНЯХ

### Аннотация

Обосновывается возможность применения стратегического и среднесрочного планирования в качестве важнейших механизмов развития циркулярной экономики регионов в Республике Беларусь различных уровней административной иерархии: областного, городов областного подчинения и административных районов. Представлен опыт осуществления вертикальной интеграции документов стратегического и среднесрочного планирования национального, областного и местного уровней, оказывающих непосредственное влияние на развитие циркулярной экономики. Систематизированы основные этапы процесса разработки региональных и местных стратегий, программ (планов) развития циркулярной экономики на примере Брестской и Могилевской областей. Представлен алгоритм разработки стратегии перехода к циркулярной экономике на микроуровне.

### Ключевые слова:

циркулярная экономика, регион, устойчивое развитие, стратегическое планирование, механизмы реализации.

### Для цитирования:

Шадраков, А. В. Механизмы перехода к циркулярной экономике на региональном и местном уровнях / А. В. Шадраков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 111–121.

### Введение

За последние несколько десятилетий «зеленая» экономика не только заняла центральное место в глобальной повестке дня, но и выступает активным драйвером экономического роста, содействуя достижению глобальных Целей устойчивого развития (далее – ЦУР). Большинство стран мира переориентировало свою экологическую политику на переход от традиционной модели, в которой охрана окружающей среды рассматривается как нагрузка на экономику, к модели, в которой экология выступает двигателем развития, т. е. к «зеленой» экономике, практическим инструментом реализации которой выступает циркулярная экономика.

В Республике Беларусь на национальном уровне создана и укрепляется нормативная правовая база для развития

экономики замкнутого цикла. Ее развитие названо в числе важнейших приоритетов, обозначенных в ряде стратегических и программных документов: Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 г. (далее – НСУР-2035), а также Национальном плане действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденном постановлением Совета Министров от 10 декабря 2021 г. № 710 [1, 2].

При этом разработка областных и местных (административный район, населенный пункт, отдельная организация) стратегий и программ, связанных с развитием циркулярной экономики в Республике Беларусь, носит в настоящее время рекомендательный характер, поэтому данные документы не включаются в систему документов государственного планирования и прогнозирования регио-

нального развития.

В то же время опыт ряда государств показывает, что именно регионы, создающие условия для развития экологических, инклюзивных и устойчивых местных сообществ, играют все большую роль в переходе к углеродно-нейтральной и циркулярной экономике. Представители местных сообществ конкретной территории обладают достаточными знаниями в отношении основных процессов, природных компонентов и продуктов жизнедеятельности человека, связанных с развитием циркулярной экономики: твердые коммунальные отходы, вода, антропогенная среда, землепользование, изменение климата и пр. Находясь ближе к местному населению и предприятиям и являясь более гибкими в отношении применения нововведений и экспериментов, региональные и местные органы власти могут выступать в качестве не только посредников, но и активных инициаторов в деле скорейшего развития циркулярной экономики.

В данном контексте весьма актуальным является исследование существующих и разработка новых механизмов развития экономики замкнутого цикла, включая вопросы стратегического и среднесрочного планирования, внедрения принципов и бизнес-моделей циркулярной экономики на региональном и местном уровнях.

### ***Материалы и методы***

Стратегическое управление регионом представляет собой довольно сложную социально-экономическую систему и осуществляется комплексом экономических, организационно-правовых, социально-психологических методов. Методы стратегического планирования представляют конкретные приемы, способы, инструменты для решения конкретных задач. На каждой из стадий используется система методов, выполняющая роль информационного обеспечения процесса, устанавливающая принципы и крите-

рии выполнения требуемой функции, а также обеспечивающая логическое завершение каждого этапа и функции в целом [3].

В то же время для разработки стратегий (программ) устойчивого развития (перехода к циркулярной экономике, безотходному производству и пр.) региона на сегодняшний день не выработано универсальных методик, а имеющиеся типовые подходы для осуществления стратегического планирования зачастую заимствованы из управления корпоративными структурами и адаптируются для потребностей регионального местного развития с учетом специфики развития конкретной территории [4].

Системное измерение, изучение и оценка влияния различных факторов на результаты экономической деятельности на национальном и региональном уровнях проводятся с использованием приемов и способов экономического, стратегического анализа, зарекомендовавших себя в бизнес-практике и широко используемых в стратегическом менеджменте. К ним относят SWOT-анализ, конкурентный анализ по модели пяти сил М. Портера, диаграмму Омаэ, анализ ресурсов, модель жизненного цикла производства и конкурентных позиций ADL/LS, портфельный стратегический анализ, матрицу развития И. Ансоффа и ряд других [5].

В Беларуси за последние годы при разработке документов стратегического планирования регионального развития были апробированы группы методов, касающихся [6]:

- определения проблем, дисбалансов и перспектив регионального развития;
- выбора стратегических приоритетов для концентрации усилий на наиболее важных аспектах регионального развития;
- определения точек роста регионального развития;
- выработки механизмов вертикального взаимодействия (областной,

районный уровни) и горизонтального согласования на уровне органов местного управления и самоуправления в процессе регионального стратегического и среднесрочного планирования;

– вовлечения местного сообщества в процесс разработки и обсуждения региональных стратегий устойчивого развития;

– разработки основных подходов к увязке стратегий регионального развития, а также документов градостроительного территориального планирования.

В данном исследовании представлен опыт разработки стратегических и среднесрочных документов перехода к развитию циркулярной экономики Брестской и Могилевской областей с использованием SWOT-анализа, PEST-анализа методов региональной диагностики и прогнозирования, экспертного метода «Дельфи», многокритериального анализа решений, сценар-

ного метода и др.

**Стратегическое и среднесрочное планирование перехода к циркулярной экономике на субнациональном (областном) уровне**

Примером системного подхода к развитию циркулярной экономики на региональном уровне в настоящее время является Могилевская область, в которой разработана и реализуется Стратегия устойчивого развития Могилевской области на период до 2035 г. (далее – СУР-2035) [7]. В рамках достижения регионального акселератора (ускорителя перехода к устойчивому развитию) Могилевской области «Экологизация регионального развития» в СУР-2035 предусмотрено выполнение стратегической цели № 2 «Переход к развитию циркулярной экономики» (рис. 1).

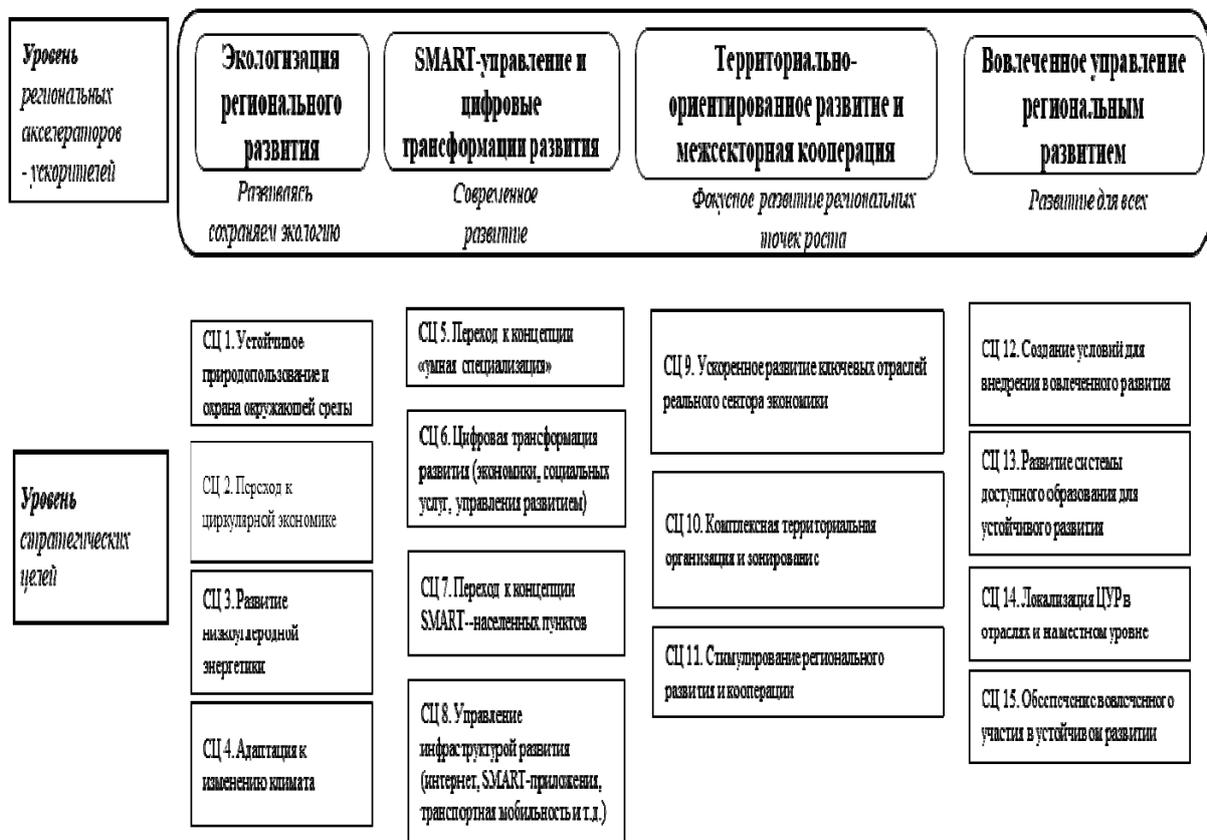


Рис. 1. Место циркулярной экономики в структуре акселераторов и стратегических целей СУР-2035 [8]

Переход к циркулярной экономике в Могилевской области позволит получить синергетический эффект от каждого процесса в жизненном цикле товара или услуги, сократить потребление ресурсов из окружающей среды, а также уменьшить их возвращение в окружающую среду в виде отходов.

С этой целью предполагается разработка и реализация Программы перехода к циркулярной экономике в Могилевской области на период до 2025 г. Программа будет ориентирована на повышение региональной конкурентоспо-

собности при минимальном воздействии субъектов хозяйствования и населения на экологию.

Для внедрения принципов и бизнес-моделей циркулярной экономики в регионе планируется реализация трех оперативных целей (ОЦ) СУР-2035 (рис. 2).

За период 2020–2022 гг. в Могилевской области в рамках перехода к развитию циркулярной экономики было осуществлено два содержательных этапа: подготовительный и непосредственной реализации перехода к циркулярной экономике (рис. 3).



Рис. 2. Оперативные цели перехода Могилевской области к развитию циркулярной экономики [7]

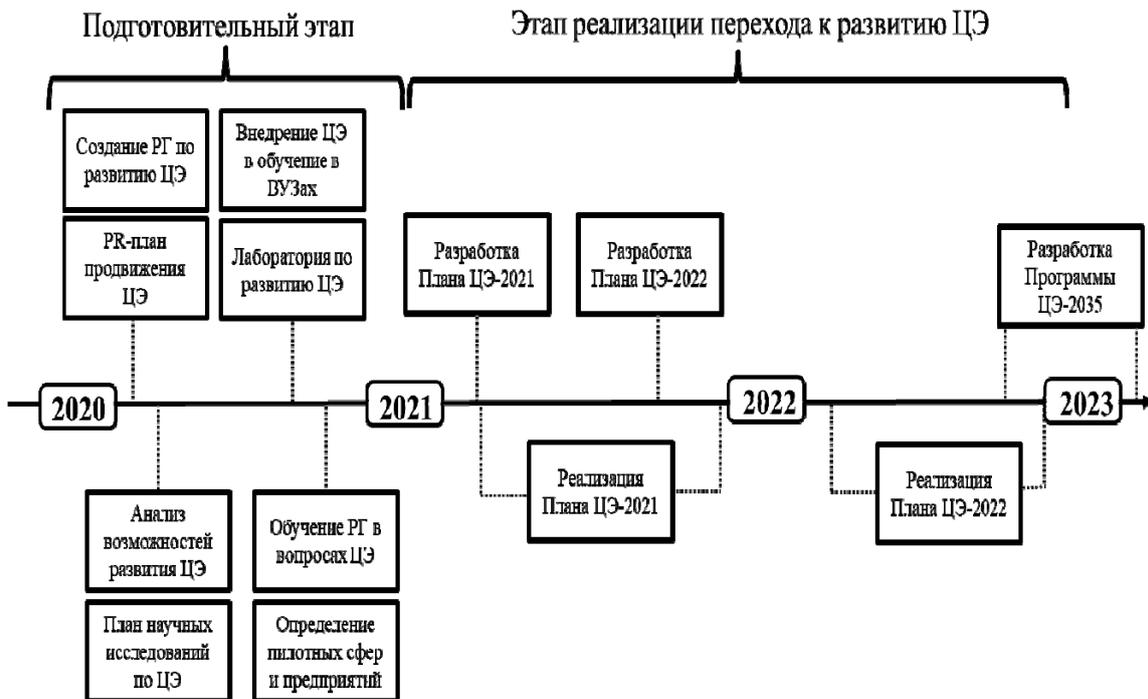


Рис. 3. Практические шаги по переходу Могилевской области к развитию циркулярной экономики [8]

*Подготовительный этап* проводился в 2020 г. и включал три содержательных компонента [9]:

1) *организационно-практический компонент* предусматривал формирование и обучение областной рабочей группы по развитию экономики замкнутого цикла, разработку PR-плана сопровождения и продвижения мероприятий по развитию циркулярной экономики, определение наиболее перспективных сфер и предприятий для внедрения циркулярных бизнес-моделей;

2) *образовательный компонент* был направлен на создание педагогическо-студенческой лаборатории по развитию циркулярной экономики на базе Экологического научно-образовательного центра (далее – ЭНОЦ) МГУ им. А. А. Кулешова, а также на определение возможностей внедрения идей циркулярной экономики в образовательные процессы ведущих вузов области;

3) *научно-исследовательский компонент* был посвящен анализу исходной ситуации и определению точек роста для развития циркулярной экономики региона, а также подготовке плана аналитической работы педагогическо-студенческого сообщества в сфере образования Могилевской области в контексте развития циркулярной экономики.

Профильная рабочая группа включала представителей ключевых заинтересованных сторон в развитии циркулярной экономики региона: субъектов хозяйствования, территориальных органов государственного управления, общественных организаций, научных организаций и учреждений образования.

Основными результатами подготовительного этапа следует считать:

- создание системы управления переходом Могилевской области к циркулярной экономике;
- проведение анализа развития Могилевской области в контексте необходимости, возможностей и условий для перехода к циркулярной экономике;
- определение фокусов (тематиче-

ских направлений), обеспечивающих более эффективный переход Могилевской области к циркулярной экономике;

- разработку PR-плана популяризации и продвижения развития циркулярной экономики региона;
- определение 25 потенциальных проектов, отнесенных к шести тематическим блокам развития циркулярной экономики региона: управление твердыми бытовыми отходами и отходами производства; промышленное производство; использование продуктов; экологические решения для циркулярной экономики; продажа и маркетинг; система поддержки перехода к циркулярным бизнес-моделям.

Первым шагом *этапа перехода к развитию циркулярной экономики* стала разработка и реализация плана развития основ циркулярной экономики Могилевской области на 2021 г. Его результатами стали:

- информирование представителей организаций и широкой общественности по вопросам эффективного обращения с отходами;
- консультирование представителей предприятий реального сектора экономики по вопросам повышения ресурсоэффективности;
- развитие систем обращения с коммунальными отходами, включая их отдельный сбор в секторе индивидуальной и жилой застройки;
- обеспечение полной загрузки линий сортировки отдельно собранных и смешанных твердых коммунальных отходов (далее – ТКО);
- строительство в Бобруйском районе объекта по сортировке и использованию ТКО;
- создание во всех районах Могилевской области площадок для компостирования органической части ТКО;
- определение пилотных организаций для тестирования бизнес-моделей развития циркулярной экономики;
- развитие проектной деятельности в сфере циркулярной экономики.

Вторым шагом *внедрения принципов экономики замкнутого цикла* стало начало разработки в 2022 г. дорожной

карты по переходу Могилевской области к циркулярной экономике на период до 2023 г. (табл. 1).

Табл. 1. Структура дорожной карты по переходу Могилевской области к циркулярной экономике на период до 2035 г.

Блок мероприятий	Мероприятие
1. Аналитико-исследовательский	1.1. Создание межвузовской междисциплинарной исследовательской группы по переходу Могилевской области к развитию циркулярной экономики. 1.2. Разработка научно обоснованных предложений по переходу к циркулярным бизнес-моделям отраслей экономики (сельское хозяйство; производство продуктов питания; производства изделий из дерева; химическое производство)
2. Экспериментально-технологический	2.1. Определение пилотных предприятий для тестирования циркулярных бизнес-моделей. 2.2. Диагностика и оценка ресурсоэффективности пилотных предприятий. 2.3. Разработка и начало реализации инициатив по внедрению циркулярных бизнес-моделей на пилотных предприятиях
3. Ресурсно-информационный	3.1. Проведение анализа ресурсного обеспечения реализации программы. 3.2. Проработка возможностей диверсификации источников и расширения объема финансирования программы. 3.3. Выработка направлений PR-сопровождения реализации плана

Брестская область является еще одним пилотным регионом, для которого в 2020 г. был разработан областной документ среднесрочного планирования, определяющий направления развития циркулярной экономики, – Программа развития циркулярной экономики Брестской области на 2021–2025 гг. В качестве приоритетных сфер развития в ней были определены сельское и лесное хозяйство, а также пищевая промышленность (рис. 4).

В структуре данной программы были выделены следующие разделы [10]:

– риски, вызовы и возможности развития циркулярной экономики Республики Беларусь;

– цель, задачи, основные направления, приоритеты и принципы развития циркулярной экономики Брестской области на 2021–2025 гг.;

– трансформация традиционных секторов экономики на базе принципов циркулярной экономики;

– финансовое обеспечение программы.

Приоритетные формы реализации

программы: сетевые структурные объединения и промышленные симбиозы; циркулярные бизнес-модели и продуктово-сервисные системы. В документе проработан перечень инвестиционных идей по развитию циркулярной экономики в Брестской области в 2021–2025 гг., а также потенциальных исполнителей в отраслевом разрезе. Среди важнейших реализуемых проектов по развитию циркулярной экономики в Брестской области следует отметить:

– СП «Санта Бремор» ООО – запущен в эксплуатацию инновационный холодильный комплекс, представляющий собой самую большую в республике холодильную систему каскадного типа, работающую на природных хладагентах, без использования фреона;

– ООО «ЭлегмаИнвест» – реализуется проект по организации производства гранул из полиэтилена и пропилена;

– КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» – осуществляется строительство цеха по производству полимерных изделий (в производстве будут использоваться полимерные отхо-

ды, извлекаемые при сортировке коммунальных отходов);  
 – ООО «БП Коммунальник» – ре-

ализуется проект по организации производства бугорчатой тары (упаковочный материал для птицефабрик).

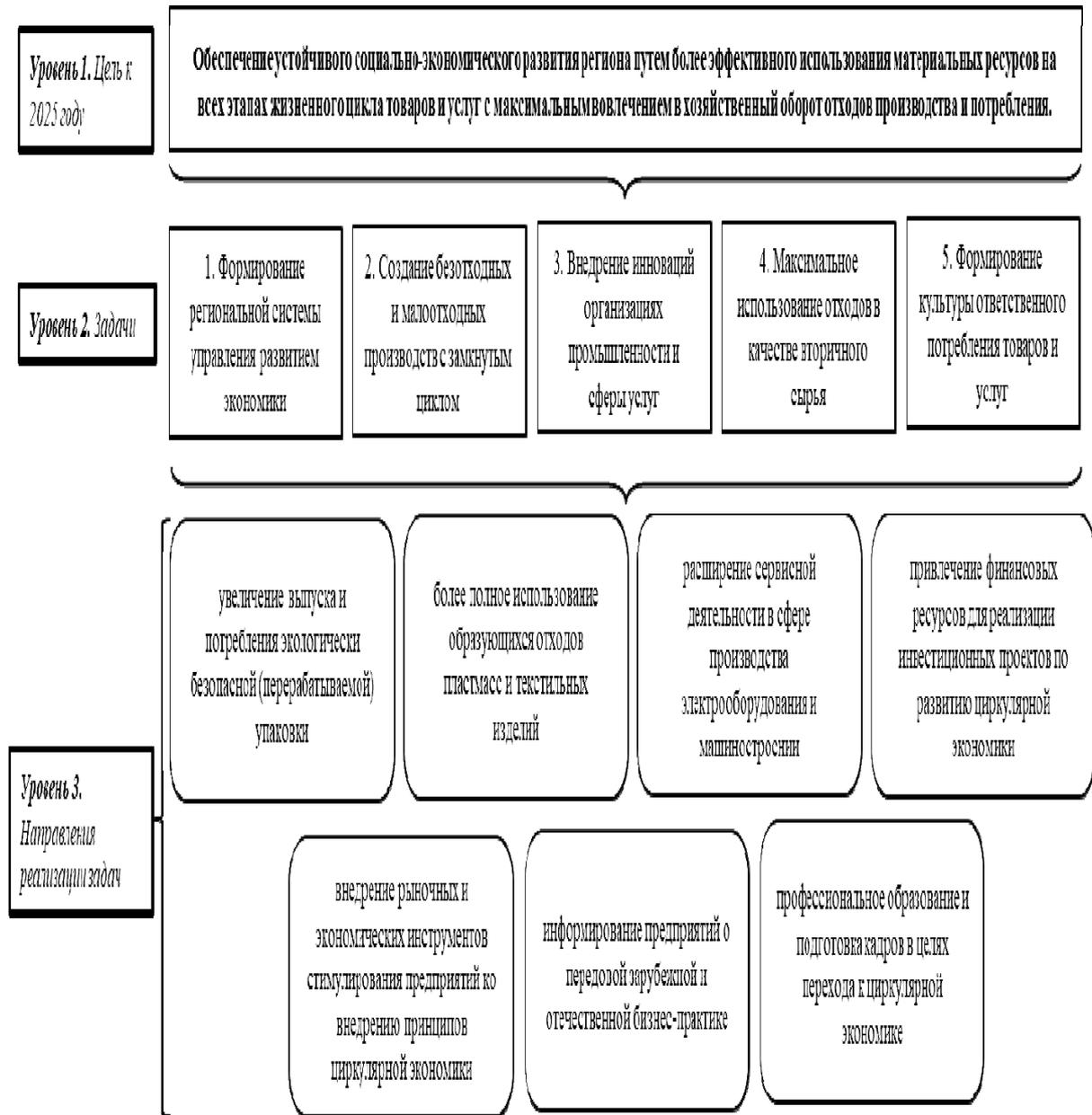


Рис. 4. Структура целеполагания Программы развития циркулярной экономики Брестской области на 2021–2025 гг. [10]

**Стратегическое планирование перехода к циркулярной экономике на местном уровне**

В Беларуси на местном уровне разработан ряд документов, которые в том

числе направлены на развитие «зеленой» и циркулярной экономики, а также повышение ресурсоэффективности:

– местные стратегии устойчивого развития (г. Жодино, Березовский, Чаусский районы и пр.);

- паспорта ТОП (территориально-ориентированное развитие);
- соглашение мэров по климату и энергии;
- планы местного экономического развития.

В Могилевской области в рамках реализации СУР-2035 происходит активная разработка стратегий устойчивого развития на уровне административных районов, сельских Советов, населенных пунктов, отдельных организаций. Пионерами по разработке местных СУР были Чаусский район и Ходосовский сельский Совет Мстиславского района. В 2021 г. местная стратегия была утверждена в Климовичском районе, в 2022 г. – в г. Бобруйске, Кличевском, Краснопольском и Славгородском районах. Продолжается активная разработка СУР в четырех районах Могилевской области (Дрибинский, Кировский, Кричевский, Мстиславский). Практически в каждой местной стратегии значительное внимание уделяется экологизации, энергоэффективности, ресурсосбережению, развитию «зеленой» и циркулярной экономики.

СУР г. Бобруйска до 2035 г. содержит стратегическую цель № 3, предусматривающую переход к развитию циркулярной экономики. В рамках ее реализации мероприятиями по внедрению принципов и бизнес-моделей экономики замкнутого цикла будут охвачены все виды экономической деятельности и сферы жизнедеятельности горожан, прежде всего промышленный комплекс, городская инфраструктура, сфера бытового обслуживания, строительство, система ЖКХ и пр. Потребуется повышение уровня компетенций профильных специалистов, создание информационно-образовательной платформы в области «зеленой» экономики, структур поддержки циркулярных бизнес-моделей, включая содействие в привлечении «зеленых» инвестиций.

Ключевые мероприятия в контексте достижения обозначенной стратеги-

ческой цели будут включать:

- анализ состояния и потоков ресурсов различных видов экономической деятельности для выбора и тестирования приоритетных циркулярных бизнес-моделей;
- широкое внедрение принципов устойчивого потребления и производства;
- развитие городского фермерства и производство органической продукции;
- смягчение последствий изменения климата и адаптация сфер жизнедеятельности к климатическим изменениям;
- развитие научного сопровождения перехода к циркулярной экономике;
- комплексная поддержка субъектов хозяйствования, присоединившихся к декларации по достижению ЦУР и вносящих вклад в реализацию приоритетных направлений городского развития.

Уникальным примером стратегического планирования перехода к циркулярной экономике на микроуровне является разработка и реализация учреждением образования «Могилевский государственный технологический колледж» дорожной карты по переходу к циркулярной экономике на период до 2035 г. (далее – Дорожная карта).

Дорожная карта разрабатывалась в 2022 г. ключевыми стейкхолдерами: сотрудниками и учащимися Могилевского государственного технологического колледжа во взаимодействии с комитетом природных ресурсов и охраны окружающей среды, комитетом экономики Могилевского облисполкома, а также при экспертной поддержке Представительства ООН в Республике Беларусь.

В структуре целеполагания Дорожной карты выделено три уровня: видение будущего перехода к циркулярной экономике до 2035 г, приоритеты и стратегические цели перехода к циркулярной экономике.

Приоритеты и соответствующие им стратегические цели перехода колледжа к циркулярной экономике представлены в табл. 2.

Табл. 2. Приоритеты и стратегические цели перехода Могилевского государственного технологического колледжа к циркулярной экономике

Приоритет	Стратегическая цель
1. Совершенствование учебного процесса в интересах развития циркулярной экономики	СЦ 1. Повышение компетентности сотрудников колледжа в вопросах циркулярной экономики
	СЦ 2. Совершенствование методики преподавания учебных дисциплин с учетом потребностей циркулярной экономики
2. Развитие экспериментально-практического направления перехода к циркулярной экономике	СЦ 3. Развитие инфраструктуры по переходу к циркулярной экономике
	СЦ 4. Изучение и тестирование циркулярных бизнес-моделей
3. Совершенствование управления переходом к развитию циркулярной экономики	СЦ 5. Внедрение концепции «Циркулярный колледж»
	СЦ 6. Внедрение принципов циркулярной экономики в хозяйственной деятельности колледжа
4. Развитие молодежной инициативы проектного менеджмента	СЦ 7. Внедрение концепции «Молодежная циркулярная инициатива»
	СЦ 8. Развитие системы управления проектами
5. Развитие сетевого взаимодействия, кооперации и кластеризации	СЦ 9. Расширение сетевого взаимодействия и партнерства
	СЦ 10. Развитие кооперации и кластеризации в интересах циркулярной экономики

В Дорожной карте выделено три этапа перехода к циркулярной экономике.

Этап 1. Закладка основ перехода к циркулярной экономике (2023–2024 гг.).

Этап 2. Переход к циркулярной экономике (2025–2030 гг.).

Этап 3. Устойчивое развитие циркулярной экономики (2031–2035 гг.).

Организационное управление реализацией Дорожной карты осуществляется на принципах проектного менеджмента, который предполагает создание межотраслевых тематических групп, соответствующих стратегическим целям. Тематические группы осуществляют инициирование, разработку, мониторинг реализации и оценку проектов для достижения целей Дорожной карты.

В состав тематических групп входят сотрудники колледжа, а также наиболее активные учащиеся.

Для обеспечения межсекторного взаимодействия в ходе оперативного управления реализацией Дорожной карты действует рабочая группа по циркулярной экономике, состоящая из представителей тематических групп.

## Заключение

1. Переход к стратегическому планированию на уровне областей, районов (городов), видов экономической деятельности и отдельных организаций является важнейшим механизмом, способствующим развитию «зеленой» и циркулярной экономики.

2. В Могилевской области создается архитектура перехода к развитию циркулярной экономики, включающая три иерархических уровня: областной; городов областного подчинения и административных районов; отдельных организаций.

3. СУР-2035 является главным документом долгосрочного планирования процессов стратегического развития Могилевской области в контексте современных глобальных, региональных и местных вызовов, служит основой для разработки областных и районных прогнозных и программных документов. В рамках достижения регионального акселератора Могилевской области «Экологизация регионального развития»

в СУР-2035 предусмотрено выполнение стратегической цели № 2 «Переход к развитию циркулярной экономики».

4. В структуре программы перехода Могилевской области к развитию циркулярной экономики до 2035 г. предусмотрено выделение шести блоков: анализ запасов и потоков ресурсов и материалов, задействованных в экономике области; картирование существующих инициатив, связанных с безотходной экономикой; определение четких и достижимых целей, ожиданий и результатов перехода к экономике замкнутого цикла; распределение бюджета и ресурсов на каждое из действий; широкое общественное обсуждение; регулярный мониторинг и оценка реализации.

5. В структуре среднесрочной программы развития циркулярной экономики Брестской области на 2021–2025 гг. выделены: риски, вызовы и возможности развития циркулярной экономики Республики Беларусь; цель, задачи, основные направления, приоритеты и принци-

пы развития циркулярной экономики Брестской области; трансформация традиционных секторов экономики на базе принципов циркулярной экономики; финансовое обеспечение программы.

6. Первым примером стратегического планирования перехода к циркулярной экономике на микроуровне в Республике Беларусь является разработка и реализация Могилевским государственным технологическим колледжем Дорожной карты по переходу к циркулярной экономике на период до 2035 г. Основными этапами процесса ее разработки стали: создание организационной структуры осуществления стратегического планирования; анализ исходной ситуации; разработка видения будущего, приоритетов, акселераторов, стратегических целей стратегии; выработка механизмов реализации стратегических приоритетов перехода к развитию циркулярной экономики.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О Национальном плане действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] // М-во экономики Респ. Беларусь. – Режим доступа: [https://economy.gov.by/ru/nac\\_plan-ru/](https://economy.gov.by/ru/nac_plan-ru/). – Дата доступа: 20.09.2023.
2. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года [Электронный ресурс] // М-во экономики Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf>. – Дата доступа: 20.09.2023.
3. Казаков, С. В. Методологические подходы к стратегическому планированию развития индустрии региона / С. В. Казаков // Вестн. Академии. – 2015. – № 3. – С. 95–102.
4. Печкина, Е. В. Методы и инструменты стратегического планирования регионального развития / Е. В. Печкина // Вопросы экономики и управления. – 2016. – № 4 (06). – С. 76–80.
5. Лапыгин, Д. Ю. Методическое обеспечение процесса разработки плана стратегического развития региона / Д. Ю. Лапыгин // Менеджмент в России и за рубежом. – 2005. – № 6. – С. 40–52.
6. Рекомендации по разработке региональных стратегий устойчивого развития в Республике Беларусь [Электронный ресурс] // М-во экономики Респ. Беларусь. – Режим доступа: [https://economy.gov.by/uploads/files/002835\\_209254\\_6.pdf](https://economy.gov.by/uploads/files/002835_209254_6.pdf). – Дата доступа: 20.09.2023.
7. Стратегия устойчивого развития Могилевской области на период до 2035 года [Электронный ресурс] // Могилевский городской исполнительный комитет. – Режим доступа: <http://mogilev.gov.by/v-gorispolkome/39629-strategiya-ustojchivogo-razvitiya-mogilevskoj-oblasti-na-period-do-2035-goda.html>. – Дата доступа: 20.09.2023.
8. Шадрakov, А. В. Роль географического образования в формировании механизмов перехода к развитию циркулярной экономики на региональном уровне / А. В. Шадрakov, С. В. Тарасюк, Н. Н. Батова // Тренды современной географии и географического образования : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Курск, 21–22 апр. 2022 г. – Курск: КГУ, 2022. – С. 281–287.
9. Шадрakov, А. В. Инновационные механизмы перехода к устойчивому развитию субнационального региона: опыт Могилевской области / А. В. Шадрakov // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – 2023. – № 1 (72). – С. 67–76.

10. **Иванов, М. Б.** Стратегические направления развития промышленности Брестской области на принципах циркулярной экономики / М. Б. Иванов // Проблемы устойчивого развития регионов Республики Беларусь и сопредельных стран: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 13–14 мая 2021 г. – Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова, 2021. – С. 57–61.

*Статья сдана в редакцию 1 ноября 2023 года*

Контакты:

alshadrakov@yandex.ru (Шадраков Алексей Васильевич).

***A. V. SHADRAKOU***

## **MECHANISMS OF TRANSITION TO CIRCULAR ECONOMY AT REGIONAL AND LOCAL LEVELS**

### **Abstract**

The article substantiates the possibility of applying strategic and medium-term planning as the most important mechanisms for developing circular economy in the regions of the Republic of Belarus at different levels of administrative hierarchy: regional, cities of regional subordination and administrative districts. The experience of vertical integration of strategic and medium-term planning documents at national, regional and local levels, that have a direct impact on the development of circular economy, is presented. The main stages of elaborating regional and local strategies, as well as programs (plans) of circular economy development are systematized on the example of the Brest and Mogilev regions. The algorithm for developing a strategy of transition to the circular economy at the micro-level is given.

### **Keywords:**

circular economy, region, sustainable development, strategic planning, implementation mechanisms.

### **For citation:**

Shadrakou, A. V. Mechanisms of transition to circular economy at regional and local levels / A. V. Shadrakou // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 111–121.

