

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

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

*Периодичность – 4 раза в год*

1(70) 2021

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>ВОЕВИДКО И. В., РИЗНЫЧУК А. И., МАРЦЫНКИВ О. Б., СТЕЦЮК Р. Б.</b> Исследование кинематики и закономерности износа рабочих органов шарошечных калибрующих устройств.....	5
<b>ЛУСТЕНКОВА Е. С.</b> Конечно-элементный анализ для оценки прочности основных деталей сферической роликовой передачи .....	13
<b>МАЛЫШКИН П. Ю., КАРТАШЕВИЧ А. Н.</b> Теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при использовании дизельно-газового топлива.....	23
<b>ПАНОВ А. Н., МРОЧЕК Ж. А., ПАШКЕВИЧ В. М.</b> Перспективное планирование качества продукции – основа для проектирования технологических процессов при риск-ориентированном подходе.....	31
<b>ПРУДНИКОВ А. П., БОДУНОВА А. Д.</b> Обоснование механизма выравнивания нагрузки по потокам в планетарной торовой винтовой передаче .....	42
<b>СВИРЕПА Д. М., КРУЧИНИНА А. С.</b> Точностные возможности технологии совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием .....	51

<b>ТАРАСИК В. П., ПУЗАНОВА О. В.</b> Методика определения основных параметров и характеристик гибридного карьерного самосвала .....	59
---	----

<b>ШЕЛЕГ В. К., ДОВГАЛЕВ А. М., ТАРАДЕЙКО И. А.</b> Влияние параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания на шероховатость поверхности .....	71
--	----

<b>ШЕМЕНКОВ В. М.</b> Влияние обработки тлеющим разрядом на структурно-фазовое состояние танталсодержащих покрытий .....	81
--	----

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>КАПУСТИН А. Г., КАРАЧУН О. Г.</b> Принципы технической диагностики сложных систем перспективных воздушных судов типа ALL ELECTRIC AIRCRAFT .....	92
---	----

<b>КОВАЛЬ А. С., КОНДРАТЕНКО А. Г.</b> Модель электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) со встроенным расположением магнитов в роторе и регулированием потока .....	102
---	-----

### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>КЛИМОВА Л. А.</b> Исследование предпринимательского потенциала студентов Белорусско-Российского университета в рамках реализации экспериментального проекта «Университет 3.0».....	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>VOEVIDKO I. V., RIZNYCHUK A. I., MARTSYNKIV O. B., STETSYUK R. B.</b> Research into kinematics and wear of working members of cone calibrating devices .....	5
<b>LUSTENKOVA E. S.</b> Finite element analysis for estimating strength of main components of the spherical roller transmission .....	13
<b>MALYSHKIN P. Y., KARTASHEVICH A. N.</b> Theoretical and experimental studies of the operating process of the 4ЧН 11.0/12.5 diesel engine using diesel gas fuel.....	23
<b>PANOV A. N., MROCHEK Z. A., PASHKEVICH V. M.</b> Long-term product quality planning is a foundation for process design using a risk-based approach.....	31
<b>PRUDNIKOV A. P., BODUNOVA A. D.</b> Justification of the mechanism for load alignment by flows in planetary torus helical transmissions .....	42
<b>SVIREPA D. M., KRUCHYNINA A. S.</b> Accuracy capabilities of the combined technology of cutting and magnetodynamic rolling.....	51
<b>TARASIK V. P., PUZANOVA O. V.</b> Procedure for determining main parameters and characteristics of a hybrid quarry dump truck.....	59
<b>SHELEG V. K., DOVGALEV A. M., TARADEIKO I. A.</b> Influence of parameters of combined magnetodynamic rolling on surface roughness .....	71
<b>SHEMENKOV V. M.</b> Influence of glow discharge processing on structural-phase state of tantalum-containing coatings .....	81

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KAPUSTIN A. G., KARACHUN O. G.</b> Principles of technical diagnostics of complex systems of future-proof airplanes of All electric aircraft type .....	92
<b>KOVAL A. S., KONDRATENKO A. G.</b> Model of electric drive based on a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with built-in arrangement of magnets in the rotor and flow regulation .....	102

**ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES**

<b>KLIMOVA L. A.</b> Study on entrepreneurial potential of Belarusian-Russian university students while implementing the University 3.0 pilot project .....	111
---	-----

---

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

УДК 622.243

*И. В. Воевидко, А. И. Ризнычук, О. Б. Марцынжив, Р. Б. Стецюк*

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНОСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ШАРОШЕЧНЫХ КАЛИБРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

---

UDC 622.243

*I. V. Voevidko, A. I. Riznychuk, O. B. Martsynkiv, R. B. Stetsyuk*

### RESEARCH INTO KINEMATICS AND WEAR OF WORKING MEMBERS OF CONE CALIBRATING DEVICES

---

#### **Аннотация**

Приведены сведения об использовании шарошечных калибраторов при бурении в породах средней твердости и твердых. Проведен анализ распределения величин скоростей скольжения по длине шарошки. Установлена зависимость направления скорости скольжения от направления наклона оси шарошки. Предложено использовать величину удельного скольжения, учитывающую размеры зубьев шарошки. Обосновано распределение величин удельных скольжений шарошек калибраторов с учетом их конструктивных параметров. Рассмотрены возможности управления величинами удельных скольжений.

#### **Ключевые слова:**

калибратор, шарошка, вооружения, горная порода, скольжения, кинематика, износ, экспериментальные исследования, скорость вращения.

#### **Abstract**

Information on the use of cone calibrators when drilling medium-hard and hard rocks is given. The analysis of the distribution of values of sliding velocities along the length of a roller cone has been carried out. The relationship between the direction of sliding velocity and the direction of inclination of the roller cone's axis has been established. It is proposed to use the value of specific sliding, which takes into account the size of the roller cone's teeth. The distribution of the values of specific sliding for the roller cones of calibrators is substantiated with regard to their design parameters. Possibilities of controlling the values of specific sliding are considered.

#### **Keywords:**

cone calibrator, roller cone, rock, sliding, kinematics, wear, experimental research, rotation speed.

---

В последнее время широкое применение получили компоновки бурильной колонны, включающие калибрующие и опорно-центрирующие устройства. В качестве калибрующего устройства при бурении в породах средней твердости и твердых целесообразно применять шарошечные калибраторы (рис. 1). Они состоят из корпуса, трех смещенных относительно оси инструмента шарошек,

а также деталей, предназначенных для крепления шарошек к корпусу калибратора [1].

Для повышения эффективности процесса калибрования, а также для увеличения площади опорной поверхности шарошки часто её устанавливают на наклонных осях, перекрещивающихся с осью калибратора. Это увеличивает скольжение элементов их вооружения.

От соотношения параметров качения и скольжения зависит не только характер разрушения приствольного массива породы, но и интенсивность износа вооружения. При опережающем износе некоторых участков шарошки происходит перераспределение удельных нагрузок

на отдельные венцы, что неизбежно приводит к их скалыванию при работе в твердых и крепких породах или к чрезмерному и неравномерному внедрению в стенки скважины, сложенные более мягкими породами.



Рис. 1. Шарошечный калибратор

Однако до настоящего времени не проводилось комплексных исследований работы такого типа инструмента, позволяющих повысить эффективность его работы.

В статье отображены результаты теоретических и экспериментальных исследований кинематики шарошечных калибраторов с целью определения закономерностей износа их рабочих органов, а также возможности достижения равностойкости устройства по его рабочей длине.

Для упрощения решения задачи шарошки калибратора принимались выполненными в виде гладких бочкообразных катков. Форма их определяется из условия вписываемости в цилиндр скважины. Силы со стороны стенок скважины равномерно распределяются по всем трем шарошкам, геометрические параметры которых идентичны. Поэтому для исследования кинематики калибраторов достаточно рассмотреть движение одной шарошки.

На рис. 2 показана схема движения калибрующей поверхности шарошки с левым наклоном оси относительно оси калибратора (принято считать, что наклон оси шарошки против часовой стрелки относительно оси калибратора левый, а по часовой стрелке – правый, если смотреть на калибратор по направлению к его оси). Движение шарошки в каждый момент времени складывается из двух движений: переносного – вращения шарошки вокруг оси калибратора и относительного – вращения вокруг собственной оси. В ее нижней калибрующей поверхности точка контакта со стенкой скважины обозначена буквой  $N$ . Точка  $N$  лежит на линии контакта со стенкой скважины.

Вектор переносной скорости  $\bar{V}_E$  точки  $N$  направлен перпендикулярно радиусу ее вращения  $R$  в этой точке и лежит в горизонтальной плоскости. Разложим вектор  $\bar{V}_E$  в системе координат  $X'Y'Z'$  с началом в точке  $N$ . Ось  $X'$  направлена по радиусу калибрующей окружности в противоположную сторону от точки  $C$ ; ось  $Y'$  – по касательной к калибрующей окружности, ось  $Z'$  – параллельно оси вращения шарошки. Результирующий вектор  $\bar{V}'_{CK}$  двух составляющих  $\bar{V}_{EZ'}$  и  $\bar{V}_{EX'}$  представляет собой вектор скорости продольного скольжения по направлению касательной к криволинейной образующей шарошки в рассматриваемой точке  $N$ .

Геометрическая сумма проекций  $\bar{V}_E$  на ось  $Y'$   $\bar{V}_{EY'}$  и вектора относительной скорости  $\bar{V}_r$  определяет скорость поперечного скольжения точки  $N$   $\bar{V}''_{CK}$  по направлению относительной скорости, т. е. перпендикулярно плоскости  $S$ . Вектор суммарной скорости скольжения  $\bar{V}_{CK}$  равен сумме векторов  $\bar{V}'_{CK}$  и  $\bar{V}''_{CK}$ .

Как показали исследования кинематики шарошечных калибраторов, продольная скорость скольжения вызвана наклоном оси шарошки и зависит от направления и величины угла  $\varphi$ . При положительном угле наклона оси шарошки (левый наклон) она направлена вверх по касательной к образующей шарошки, а при отрицательном угле  $\varphi$  (правый наклон) – вниз. Продольная скорость скольжения возрастает при увеличении угла  $\varphi$ . При  $\varphi = 90^\circ$  шарошка не вращается.

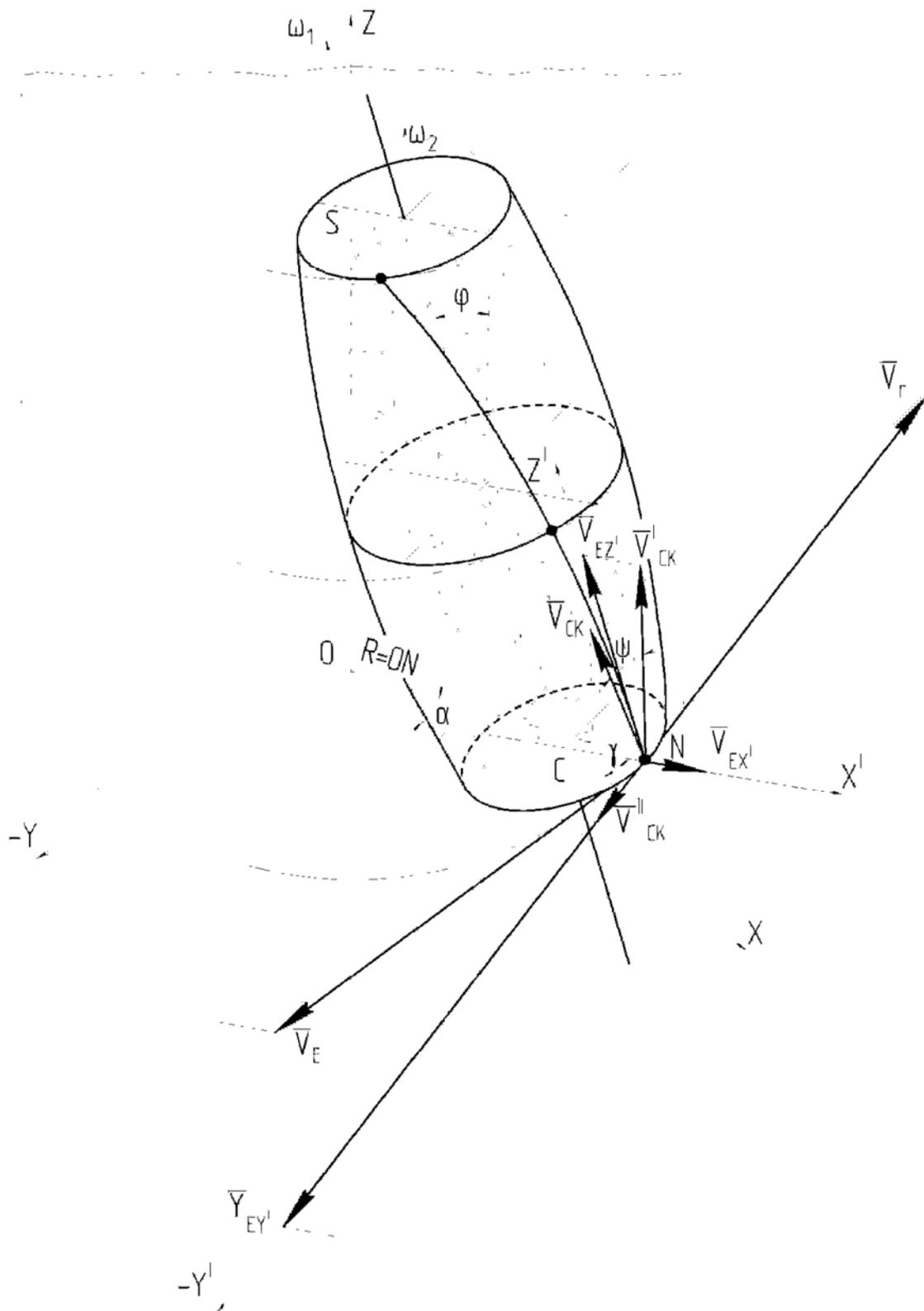


Рис. 2. Схема движения калибрующей поверхности шарочки с левым наклоном оси относительно оси калибратора

Конечная формула для определения суммарной скорости скольжения

имеет вид:

$$V_{CK} = \sqrt{(V'_{CK})^2 + (V''_{CK})^2} = \omega_1 \cdot \sqrt{(R \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi)^2 + \left( R \cdot \frac{\cos \gamma \cdot \cos \varphi}{\cos \alpha} - i \cdot r_0 \right)^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость вращения калибратора;  $\gamma$  – угол разворота рассматриваемой точки линии контакта;  $\varphi$  – угол наклона оси шарошки к оси калибратора;  $\alpha$  – параметр, являющийся угловой координатой точки  $N$  в плоскости, перпендикулярной оси скважины;

$i$  – передаточное отношение,  $i = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ ;

$\omega_2$  – угловая скорость вращения шарошки;  $r_0$  – текущий радиус венца шарошки.

Для определения поперечной скорости скольжения необходимо знать угловую скорость вращения шарошки. Определение угловой скорости вращения шарошки калибратора теоретически представляет собой весьма сложную задачу. Величину  $\omega_2$  удобнее определять экспериментальным путем для каждого типа калибратора, разных пород и различных режимов бурения и принимать в расчет её усреднённое значение.

Вектор скорости скольжения  $\vec{V}_{CK}$  лежит в плоскости, касательной к шарошке в рассматриваемой точке  $N$ . При левом наклоне оси шарошки  $\vec{V}_{CK}$  направлен к верхней части шарошки, при правом – к нижней, отклоняясь в обоих случаях в сторону вектора  $\vec{V}_E$ .

Угол между вектором суммарной

скорости скольжения и касательной к образующей шарошки в рассматриваемой точке контакта определяется по формуле

$$\psi = \arctg \frac{V''_{CK}}{V'_{CK}} = \arctg \left( \frac{R \cdot \frac{\cos \gamma \cdot \cos \varphi}{\cos \alpha} - i \cdot r_0}{R \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi} \right). \quad (2)$$

Определение  $\psi$  для различных венцов шарошки на стадии конструирования имеет важное значения, т. к. он характеризует траекторию движения зубьев шарошки относительно стенок скважины. Так, при армировании шарошки зубьями клиновидной формы наибольшая эффективность калибрования ствола скважины будет достигнута при ориентации их кромок перпендикулярно направлению скорости скольжения  $\vec{V}_{CK}$ . Еще более важное значение имеет ориентация кромок зубьев на конусной части шарошки, расширяющей ствол скважины (см. рис. 1).

Из формулы (1) путем интегрирования в пределах угла поворота калибратора получим выражение для определения пути скольжения произвольной точки  $N$  за один оборот инструмента:

$$S_X = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot R \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi)^2 + \left( 2 \cdot \pi \cdot \left( R \cdot \frac{\cos \gamma \cdot \cos \varphi}{\cos \alpha} - i \cdot r_0 \right) \right)^2}. \quad (3)$$

Значения  $r_0$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$  для конкретной калибрующей окружности шарошки можно найти с помощью программы PROG [2].

Классическим кинематическим критерием оценки степени подверженности износу отдельных участков шарошки породоразрушающего инстру-

мента служит удельное скольжение [2, 3]. Указанный показатель используют и в настоящее время при конструировании буровых долот в шарошечном исполнении.

Однако приведенные в указанных работах выражения не учитывают диаметры твердосплавных зубков на венцах шарошки, а также ширину зубьев фрезерованных шарошек. Для более полной оценки подверженности износу определенных венцов шарошки калибратора необходимо ввести величину удельного скольжения  $S'_X$ , учитывающую размеры зубьев шарошки. Для этого можно использовать отношение пути скольжения за один оборот шарошки  $\frac{S_X}{i}$  к суммарной длине контактных линий рассматриваемой калибрующей окружности:

$$S'_X = \frac{S_X}{S_{КХ} \cdot i}, \quad (4)$$

где  $S_X$  – путь скольжения за один оборот калибратора;  $S_{КХ}$  – контактирующая длина рассматриваемой окружности шарошки (армированной твердосплавными зубками  $S_{КХ} = d \cdot Z$  ( $d$  – диаметр зубков;  $Z$  – количество зубков); с фрезерованным вооружением  $S_{КХ} = S \cdot Z$  ( $S$  – ширина зубьев в плоскости окружности));  $i$  – передаточное отношение калибратора.

Для оценки степени подверженности износу отдельных участков калибрующей поверхности шарошки был изготовлен экспериментальный калибратор 724-КШЭ 93 СТК, оси которого наклонены по отношению к оси инструмента под различными углами. При этом калибратор был снабжен фрезерованными шарошками для работы в мраморных блоках и шарошками с твердосплавным вооружением для калибрования ствола скважины в блоках песчаника. Экспериментальные исследования про-

водились на установке, созданной на базе бурового станка СБА-500.

В задаче стендовых исследований, кроме определения эффективности применения шарошечных калибраторов, ставилось изучение влияния их кинематики, конструктивных параметров, а также условий работы на износостойкость вооружения исполнительных органов.

Угловая скорость вращения шарошек  $\omega_2$  определялась при калибровании ранее пробуренной скважины в блоках песчаника и мрамора калибраторами с различными величинами наклона осей при изменении режимов процесса проработки ствола скважины. При этом был принят коэффициент калибрования, который определялся по формуле

$$K_K = \frac{D_K - D_{СКВ}}{D_K}, \quad (5)$$

где  $D_K$  – диаметр калибратора;  $D_{СКВ}$  – диаметр скважины.

По истечении определённого времени проводились замеры диаметров шарошек на 6 и 7-м различных уровнях её калибрующей поверхности в зависимости от типа вооружения, а также рассчитывались усреднённые значения передаточных отношений для различных типов шарошечных калибраторов, которые использовались при построении диаграмм удельных скольжений  $S'_X$ .

На рис. 3 приведены диаграммы удельных скольжений  $S'_X$  шарошек с фрезерованным вооружением калибратора 724-КШЭ 93 СТК. Как видно из диаграмм, величины удельных скольжений шарошек возрастают с увеличением угла наклона их осей и, как результат, пути скольжения шарошки. Увеличение угла наклона осей шарошек с  $7^\circ 30'$  до  $22^\circ 30'$  приводит к росту величин удельных скольжений шарошки на уровне окружности максимального диаметра приблизительно в 3,4 раза.

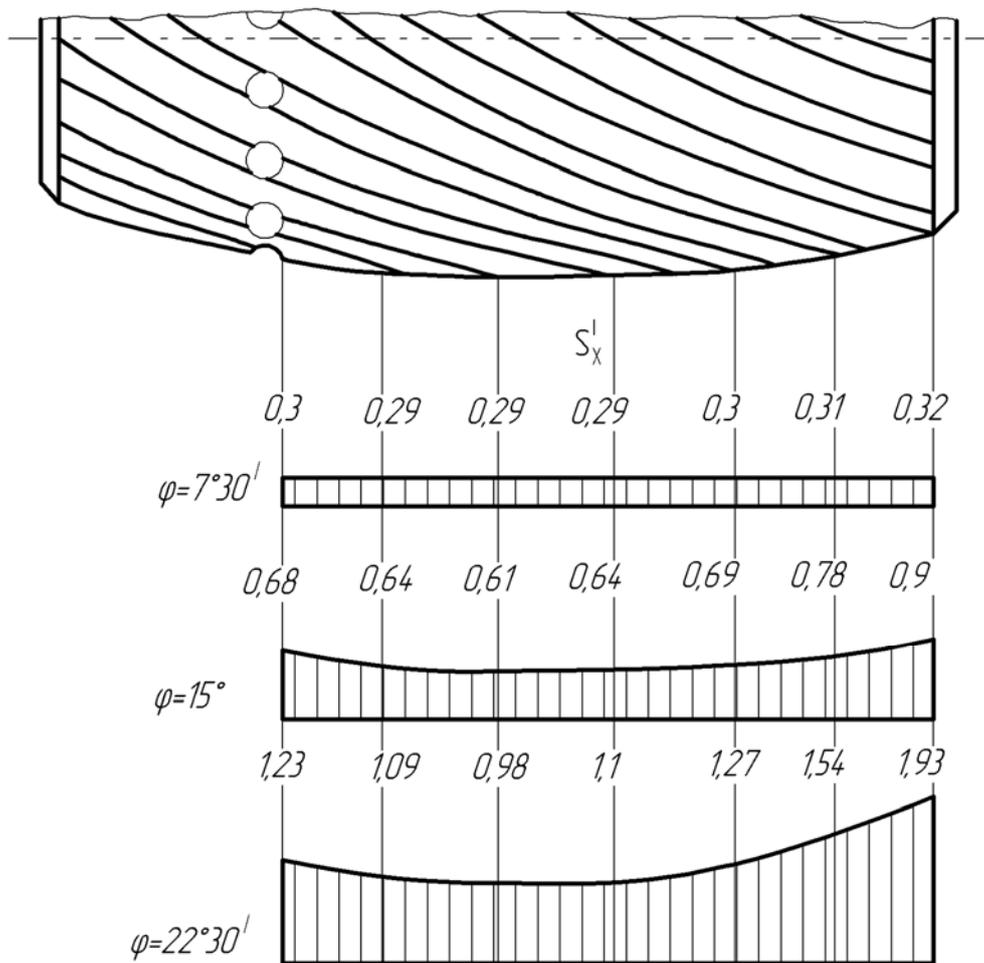


Рис. 3. Диаграммы удельных скольжений  $S'_x$  шарошек с фрезерованным вооружением калибратора 724-КШЭ 93 СТК

С увеличением угла наклона осей шарошек увеличивается также разница в величинах удельных скольжений среднего и торцевого участков калибрующей поверхности шарошки, составляющая 10...97 %. Рост величин удельных скольжений в данном случае объясняется тем, что с увеличением расстояния от середины калибрующей поверхности путь скольжения венцов шарошки также увеличивается, а их контактирующая длина уменьшается.

Диаграммы удельных скольжений  $S'_x$  шарошек с твердосплавным вооружением аналогичны соответствующим диаграммам шарошек с фрезеро-

ванными зубьями, однако разница в величинах  $S'_x$  среднего и торцевого участков составляет всего 5...18 %. Это объясняется тем, что количество твердосплавных зубков на всех венцах одинаково.

Экспериментальные исследования показали, что величины износа калибрующих поверхностей шарошек по их длине практически совпали с расчетными значениями величин удельных скольжений. Отклонение составляло не более 8 %.

### **Выводы**

1. Направление скорости скольжения зависит от направления наклона оси шарошки. При левом наклоне она направлена к верхней части шарошки, при правом – к нижней, отклоняясь в обоих случаях в сторону переносной скорости.

2. Удельные скольжения шарошек существующих конструкций калибраторов возрастают с увеличением

расстояния от среднего участка калибрующей поверхности шарошки. С увеличением угла наклона оси шарошки различие в значениях удельных скольжений среднего и торцевых участков шарошки возрастает.

3. Управлять удельными скольжениями шарошек по длине можно путем изменения наклона их осей, а также перераспределением ресурса вооружения венцов шарошек.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sowers, Steven & Dupriest, Fred & Bailey, Jeffrey & Wang, Lei. (2009). Use of Roller Reamers Improves Drilling Performance in Wells Limited by Bit and Bottomhole Assembly Vibrations. 10.2118/119375-MS.
2. **Воєвідко, І. В.** Методика дослідження ковзання та підвищення рівності кінцівок шарошок бурових доліт / І. В. Воєвідко // Нафтова і газова промисловість. – 2009. – № 3. – С. 21–23.
3. **Zheleznov, G. S.** Reamers with composite OI cutters / G. S. Zheleznov, S. A. Singeev, S. G. Andreeva // Russian Engineering Research. – 2017. – № 37 (9). – P. 809–811.

*Статья сдана в редакцию 14 января 2021 года*

**Игорь Владимирович Воєвідко**, д-р техн. наук, проф., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +0342-72-71-37.

**Андрей Иванович Ризнычук**, ассистент, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +380-678-96-69-45. E-mail: Andrijriz@gmail.com.

**Олег Богданович Марцынків**, канд. техн. наук, доц., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +380-502-99-44-60.

**Роман Богданович Стецюк**, студент, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +380-667-88-94-15.

**Igor Volodymyrovych Voevidko**, DSc (Engineering), Prof., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Tel.: +0342-72-71-37.

**Andrei Ivanovich Riznychuk**, assistant lecturer, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Tel.: +380-678-96-69-45. E-mail: Andrijriz@gmail.com.

**Oleg Bogdanovich Martsynkiv**, PhD (Engineering), Associate Prof., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Tel.: +380-502-99-44-60.

**Roman Bogdanovich Stetsyuk**, student, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Tel.: +380-667-88-94-15.

---

УДК 621.83.06

*Е. С. Лустенкова*

---

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ РОЛИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

---

UDC 621.83.06

*E. S. Lustenkova*

---

## FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR ESTIMATING STRENGTH OF MAIN COMPONENTS OF THE SPHERICAL ROLLER TRANSMISSION

---

### **Аннотация**

Приведены результаты моделирования сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом в модуле Pre\Post системы NX. Рассмотрена упрощенная трехэлементная модель передачи, включающая ведомый кулачок, ролик и сателлит. В модели предполагается передача нагрузки одним роликом из внутреннего ряда тел качения. Определены контактные давления на поверхностях ролика и ведомого кулачка, напряжения среза и смятия, действующие на ролик. Приведены характеристики разработанной конечно-элементной модели и ее ограничения. Результаты компьютерного анализа сопоставлены с теоретическими расчетами. Установлено, что основным критерием прочностной надежности исследуемой передачи является контактная прочность ведомого кулачка.

### **Ключевые слова:**

сферическая роликовая передача, компьютерная модель, ролик, прочность, контактные напряжения, конечно-элементный анализ.

### **Abstract**

The results of modeling a spherical roller transmission with a two-row pinion in the Pre\Post module of the NX system are presented. A simplified three-element transmission model is considered, including a driven cam, a roller, and a pinion. The model assumes the transfer of the load by one roller from the inner row of rolling elements. The contact pressures on the surfaces of the roller and the driven cam, as well as the shear and crumple stresses acting on the roller are determined. The characteristics of the developed finite element model and its limitations are given. The results of the computer analysis are compared with the theoretical calculations. It is established that the main criterion for the strength reliability of the transmission under study is the contact strength of the driven cam.

### **Keywords:**

spherical roller transmission, computer model, roller, strength, contact stresses, finite element analysis.

---

### ***Введение и постановка задачи***

Сферические роликовые передачи (СРП) относятся к классу сферических механизмов [1] и, благодаря особенностям кинематики, позволяют решать инженерные задачи, которые не могут быть решены с помощью передач других типов [2]. СРП с двухрядным сателлитом выступают аналогами планетарных зубчатых передач с двухвенцовым сателлитом и предназначены для

создания редукторных механизмов с большими значениями передаточных отношений при небольших габаритах и малой материалоемкости. Принцип работы разрабатываемых передач, их преимущества и оценка кинематических возможностей подробно рассмотрены в [3, 4].

Для внедрения СРП необходима разработка достоверных апробированных методик расчета. Расчет на прочность передач, схожих по принципу

действия, приведен в [5, 6]. Расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований [7]. В [8, 9] приведены основы расчета на прочность СРП с двухрядным сателлитом с радиальным расположением рядов роликов. Однако для разработанных теоретических моделей очень важно их подтверждение (валидация) соответствию реальным объектам и процессам нагружения. Альтернативным, а во многих случаях более перспективным способом определения напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций является метод конечных элементов. В [1, 9] он применялся для оценки адекватности полученных теоретических зависимостей для определения действующих напряжений. Использовалась всемирно известная система ANSYS. Однако в связи с тем, что в рассмотренных случаях использовалась достаточно грубая сетка для разбиения деталей на элементы и компьютерные модели разрабатывались в системе NX [10], было принято решение о дополнительном исследовании, уточнении модели зацепления и применении встроенного в NX модуля PrePost для решения данных задач.

Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния основных деталей СРП с двухрядным сателлитом с использованием возможностей системы NX.

### **Результаты исследования теоретической модели СРП и упрощенная компьютерная модель СРП**

Расчет прочности с помощью метода конечных элементов (МКЭ) проводился в системе NX в модуле PrePost. Целью моделирования являлась оценка действующих контактных напряжений при взаимодействии роликов и беговых дорожек, напряжений смятия и среза, действующих на ролик.

Для анализа рассматривалась мо-

дель передачи для усилителя момента с передаточным отношением 16, спроектированная по первой силовой схеме [4]. Число роликов в рядах сателлита, контактирующих с неподвижным и ведомым кулачками,  $n_{s3} = 6$  и  $n_{s2} = 9$  соответственно. Число периодов беговых дорожек неподвижного и ведомого кулачков  $Z_3 = 5$  и  $Z_2 = 8$  соответственно. Наиболее нагруженным является контакт внутреннего ряда роликов (их число равно  $n_{s2}$ ) с ведомым кулачком, поэтому рассматривался только этот контакт. Параметры передачи: радиус расположения центров сферических участков роликов  $R_2 = 19$  мм; угол наклона кривошипа ведущего вала  $\Theta = 0,257$  рад; радиус сферической поверхности ролика  $r_s = 5$  мм; радиус образующей окружности цилиндрической поверхности его стержня  $r_{so} = 4$  мм. Ведомый вал передачи нагружался моментом  $T_2 = 14$  Н·м. В теоретической модели предполагался худший случай – нагрузку воспринимает один ролик, находящийся в крайнем положении. Тогда коэффициент, определяющий долю роликов, одновременно передающих нагрузку, от их общего числа,  $K_{p2} = 1/n_{s2}$ . В качестве материала кулачков, роликов и сателлита из библиотеки материалов NX принималась сталь AISI 4340 (международное обозначение по наиболее распространенному стандарту), аналогом которой является сталь 40ХН2МА. Для расчетов использовались характеристики  $E = 1,93 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,284$ .

Результаты теоретических расчетов для передачи с вышеуказанными параметрами, полученные на основе разработанных ранее математических моделей [8], следующие: максимальные контактные напряжения  $\sigma_{Hmax} = 1196$  МПа; напряжения смятия  $\sigma_{см} = 21,7$  МПа; напряжения среза  $\tau_{ср} = 17,7$  МПа.

Компьютерная модель взаимодействия звеньев была упрощена и состояла из трех элементов – фрагментов кулачка, сателлита и ролика (рис. 1). Беговая дорожка на торце ведомого кулачка

образовывалась с помощью булевой операции вычитания объединенного массива сфер с радиусами  $r_s$ . Так как массив предполагал наличие определенного (дискретного) числа сфер, беговая дорожка имела в модели гребенчатую поверхность, имитирующую при кинематических исследованиях реальную

поверхность с определенной шероховатостью. Данная беговая дорожка изготавливается на реальной детали на вертикально-фрезерных станках с ЧПУ с помощью сферических фрез, радиус которых равен радиусу сферической поверхности ролика [11, 12].

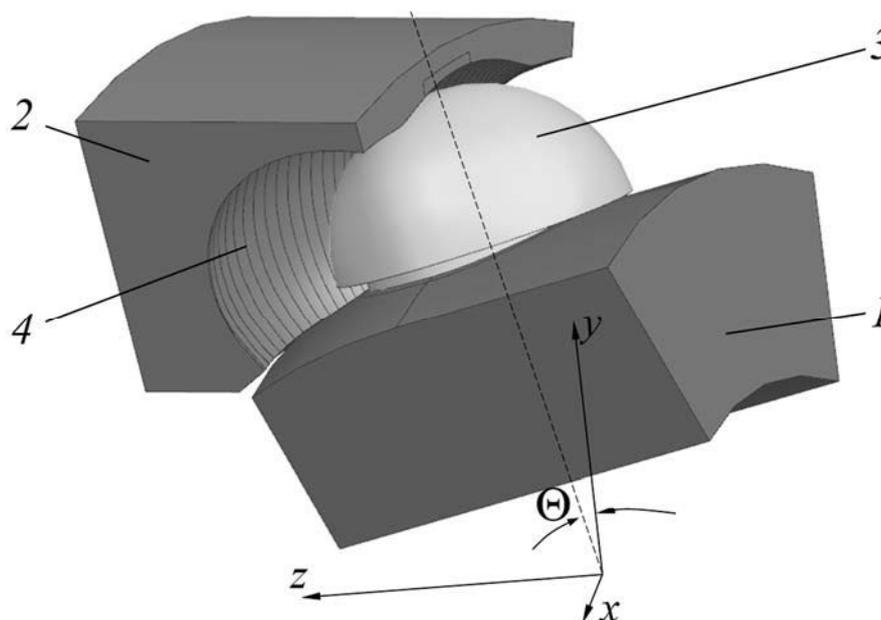


Рис. 1. Модель СПП, разработанная в модуле Modelling системы NX: 1 – спутник; 2 – ведомый кулачок; 3 – ролик; 4 – беговая дорожка

Модель СПП далее исследовалась в модуле Pre\Post системы NX, предназначенной для конечно-элементного анализа. Применялось нелинейное статическое решение SOL601,106 (лицензия MSC.NASTRAN Advanced Nonlinear).

#### **Параметры конечно-элементных сеток, контактов, ограничения модели**

На элементы модели (рис. 2) были наложены следующие ограничения. Модель ведомого кулачка 1 с помощью жестких недеформируемых стержней 5 (тип RBE2 Collector) была соединена с центром  $O_1$  таким образом, что у кулачка оставалась одна степень подвижности –

вращение относительно оси  $z$ . Относительно этой оси к ведомому кулачку прикладывался момент  $T_2$ . Модель спутника 2 с помощью жестких недеформируемых стержней 4 неподвижно соединялась с центром  $O_1$ , обеспечивая спутнику нулевую степень подвижности. Таким образом, рассматривалась обращенная схема с неподвижным спутником и вращающимся ведомым валом (кулачком). Данная схема применима также для анализа мультипликаторных механизмов, где поток мощности направлен от ведомого кулачка к спутнику. Для ролика 3 устанавливался контакт жестких стержней 6 со внутренней поверхностью отверстия и неподвижной точкой  $O_3$ , лежащей в плоскости, соединяющей

сферическую и цилиндрическую поверхности ролика. На эту связь налагались ограничения осевых перемещений и вращения относительно оси ролика  $u_3$  (фиксировались две степени свободы из шести), а радиальные перемещения узлов элементов и их повороты относительно осей  $x_3$  и  $z_3$  допускались.

Разбиение моделей деталей передачи на элементы с наложением сетки показано на рис. 3–5. На рис. 3 изображено разбиение на элементы ведомого кулачка. Гребенчатые выступы беговой дорожки были сглажены. Тип элемента – четырехузловой тетраэдр STETRA(4), размер элемента 0,7 мм. В зоне предпо-

лагаемого контакта с роликом выделен участок, где разбиение производилось на другие элементы: тип элемента – восьмиузловой гексаэдр SHEXA(8), размер элемента 0,084 мм.

На рис. 4 показана модель сателлита с разбиением на элементы. Как видно, сателлит состоит из двух участков: основного тела детали и цилиндрического фрагмента с внутренней поверхностью, непосредственно контактирующей с роликом. Тип и размеры элементов сателлита совпадают с аналогичными элементами ведомого кулачка.

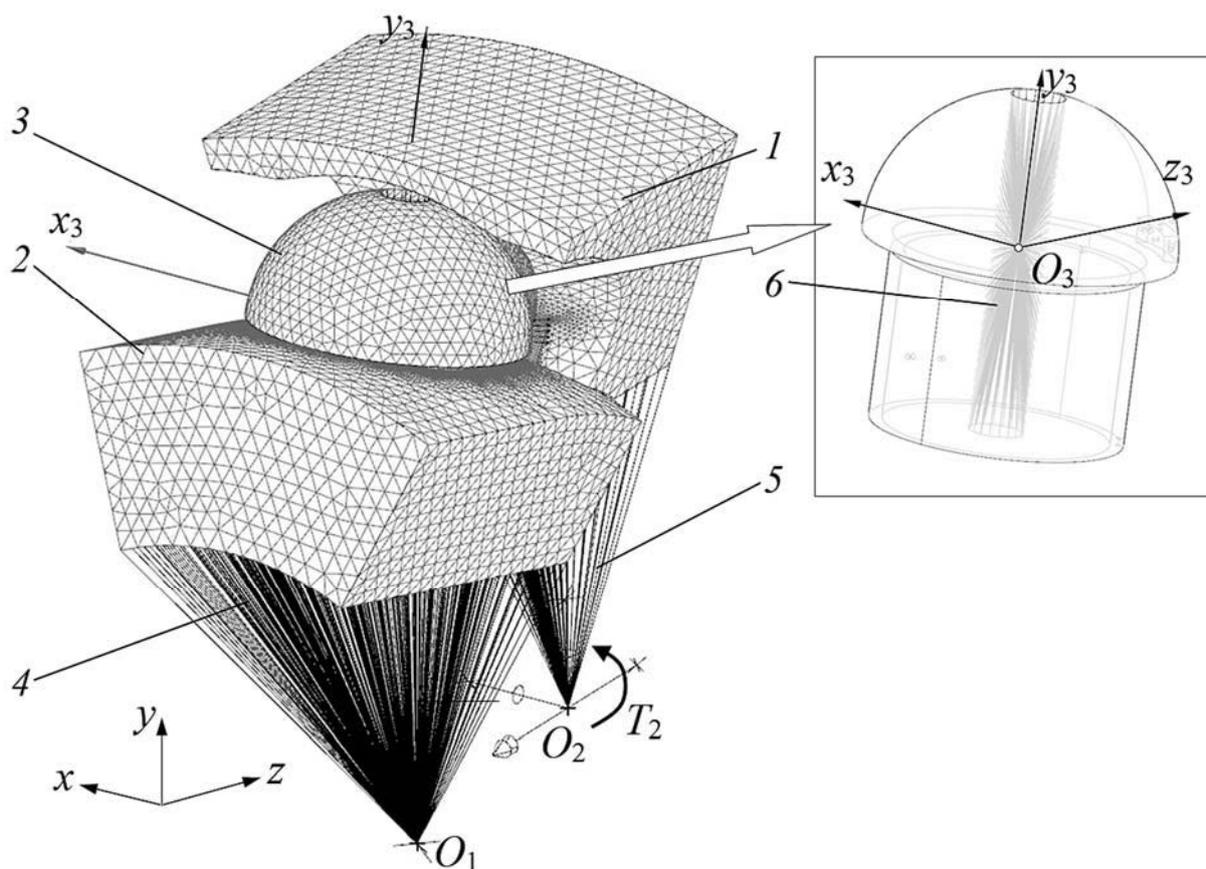


Рис. 2. Модель взаимодействия ролика с элементами СРП: 1 – ведомый кулачок; 2 – сателлит; 3 – ролик; 4–6 – жесткие стержни

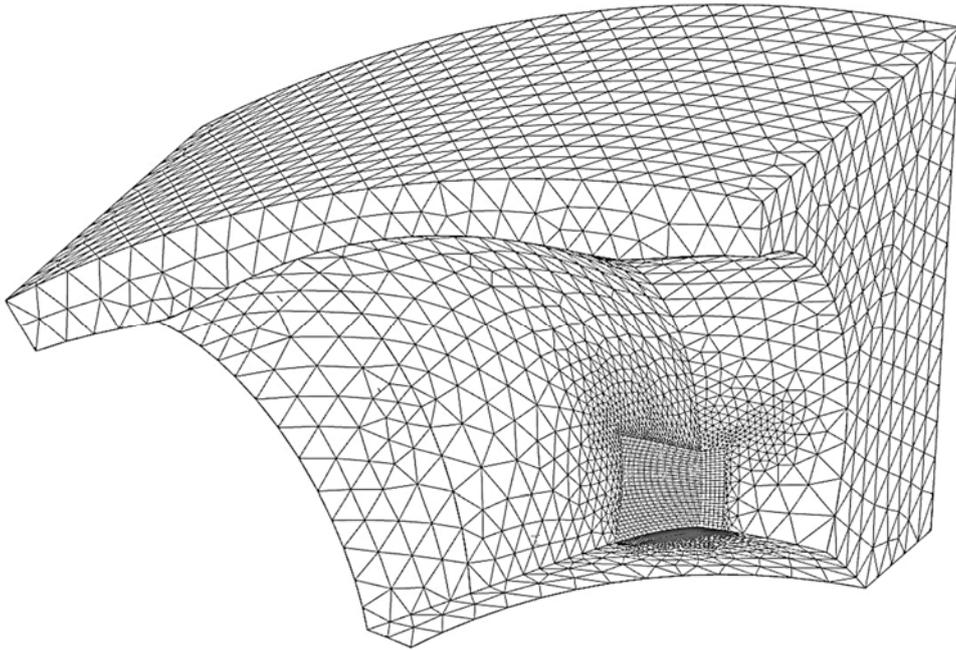


Рис. 3. Конечно-элементная модель наружного кулачка

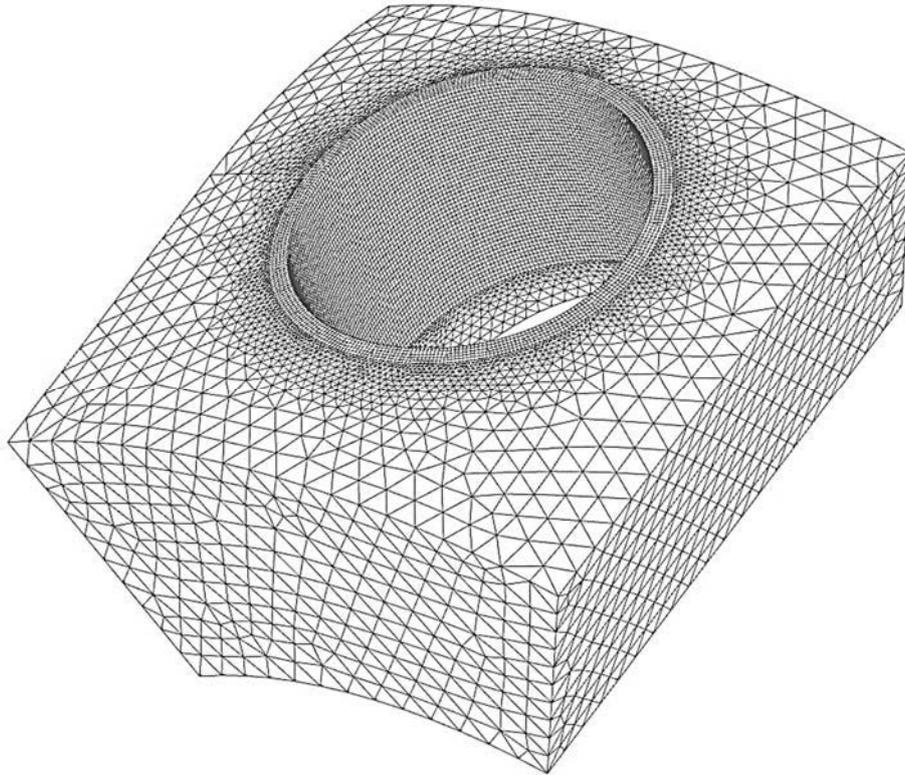


Рис.4. Конечно-элементная модель сателлита

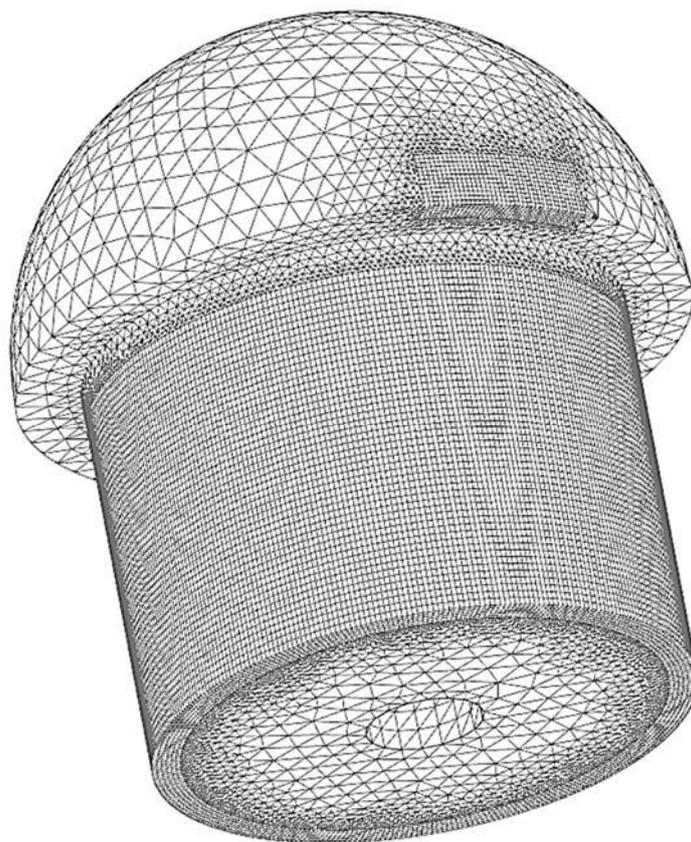


Рис. 5. Конечно-элементная модель ролика

Модель ролика содержит три участка (см. рис. 5). Два из них – целевая геометрия (Target Geometry), непосредственно контактирующая с другими телами, с размерами элементов 0,2 мм. Остальная поверхность ролика разбита на более крупные элементы тетраэдрального типа. Тип элемента – четырехузловой тетраэдр ТЕТРА(4), но размер элемента был выбран меньше, чем у сателлита и ведомого кулачка, и составляет 0,5 мм.

Задано два контакта поверхностей (Face Contact): контакт выделенных участков сферической поверхности ролика и поверхности беговой дорожки ведомого кулачка; контакт наружной поверхности стержня ролика и внутренней поверхности отверстия сателлита. В обоих случаях контактными (исходными) поверхностями (Contact Surface)

являются поверхности кулачка и сателлита, а целевыми поверхностями (Target Surface) – поверхности, принадлежащие ролику.

#### **Результаты конечно-элементного анализа**

Контактные задачи являются одними из наиболее сложных в конечно-элементном анализе, т. к. результат зависит от множества независимых параметров, включая способы и параметры построения сеток. Для получения адекватного результата иногда приходится совершать множество расчетных итераций. Результаты исследований контактных напряжений (давлений) для исследуемой передачи показаны на рис. 6. Максимальные контактные давления превышают значения  $16 \cdot 10^3$  МПа,

что в 13,76 раза больше расчетных значений. Это, предположительно, связано с наличием практически кромочного

контакта, вызывающего пластические деформации.

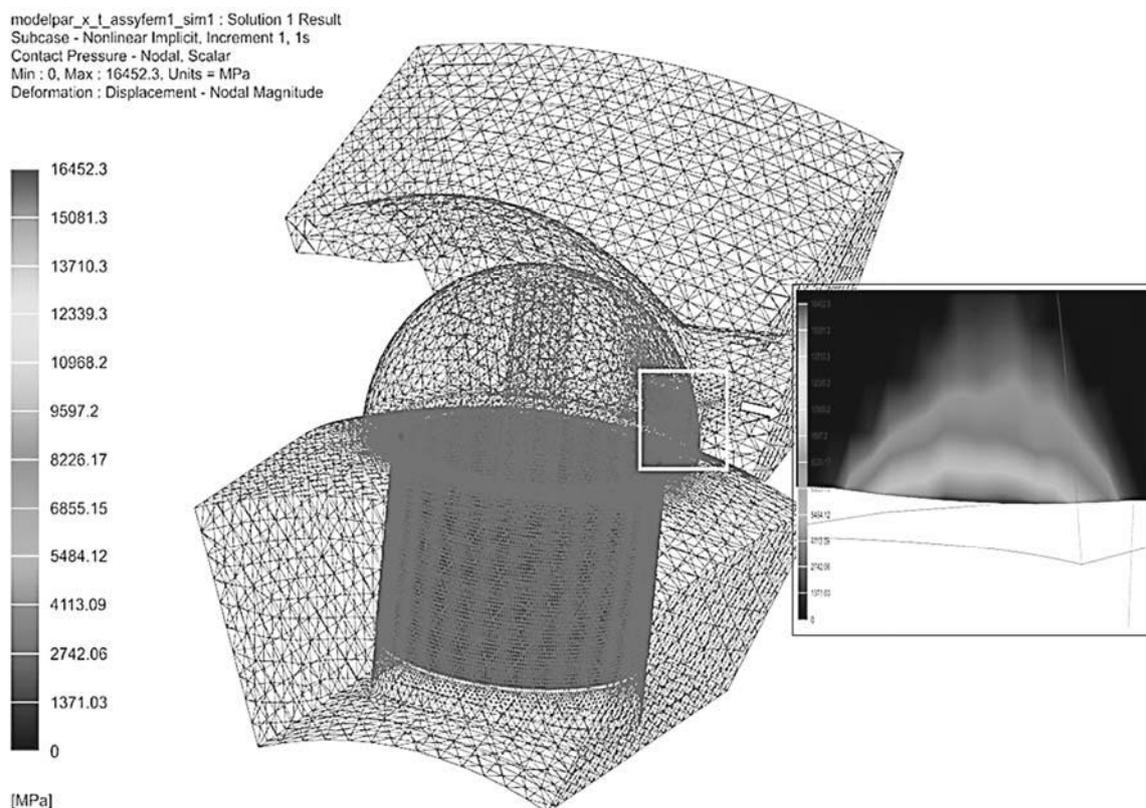


Рис. 6. Распределение контактных давлений на поверхности ролика

Напряжения смятия, распределенные на поверхности ролика, показаны на рис. 7. Их максимальные значения составляют 1187 МПа. Они действуют на стороне ролика, противоположной расположению зоны его контакта с ведомым кулачком. Также наблюдается превышение полученных значений над расчетными в 54,7 раза. Однако данные напряжения – пиковые, возникают на поверхности, граничащей с опасным сечением, местом сопряжения цилиндрической и сферической поверхностей. На большей части основной цилиндрической поверхности стержня ролика видно, что напряжения не превышают расчетные.

На противоположной (относительно показанной на рис. 7) стороне

цилиндрической поверхности стержня ролика, у его торца, также наблюдаются увеличенные контактные давления (282 МПа – максимальные значения), что свидетельствует о перекосе оси ролика под действием нормальных усилий на сферический участок.

Распределение напряжений среза (Nonlinear Stress – Max Shear) по поверхности ролика показано на рис. 8. Результаты анализа свидетельствуют о максимальных напряжениях среза, равных 441 МПа, возникающих на стороне внутренней поверхности отверстия сателлита, противоположной той, где происходит контакт сферической поверхности ролика с беговой дорожкой. Расположение полосы с максимальными значениями напряжений ниже

уровня наружной поверхности спутника подтверждает правильность выбранной методики, т. к. со стороны контакта

ролика с беговой дорожкой грань отверстия спутника как раз располагается ниже.

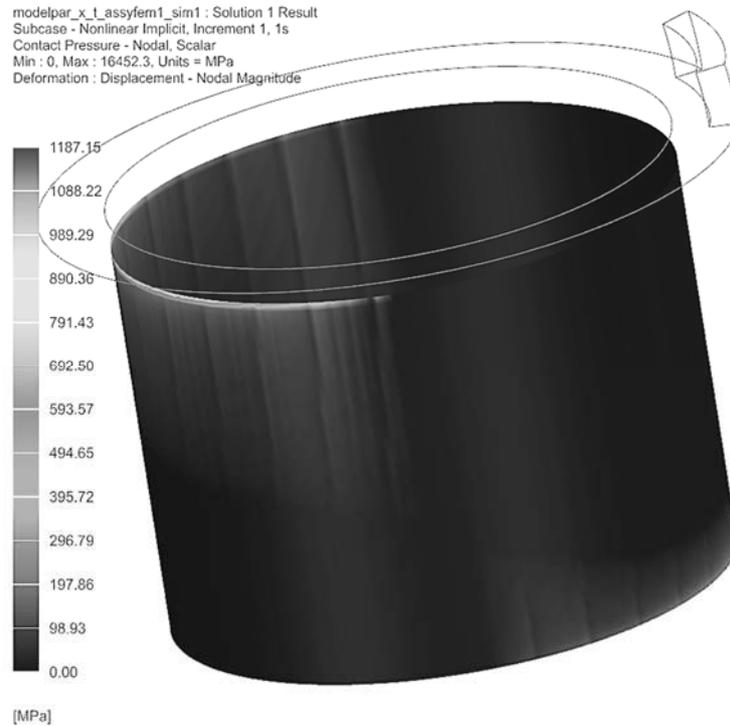


Рис. 7. Распределение напряжений смятия

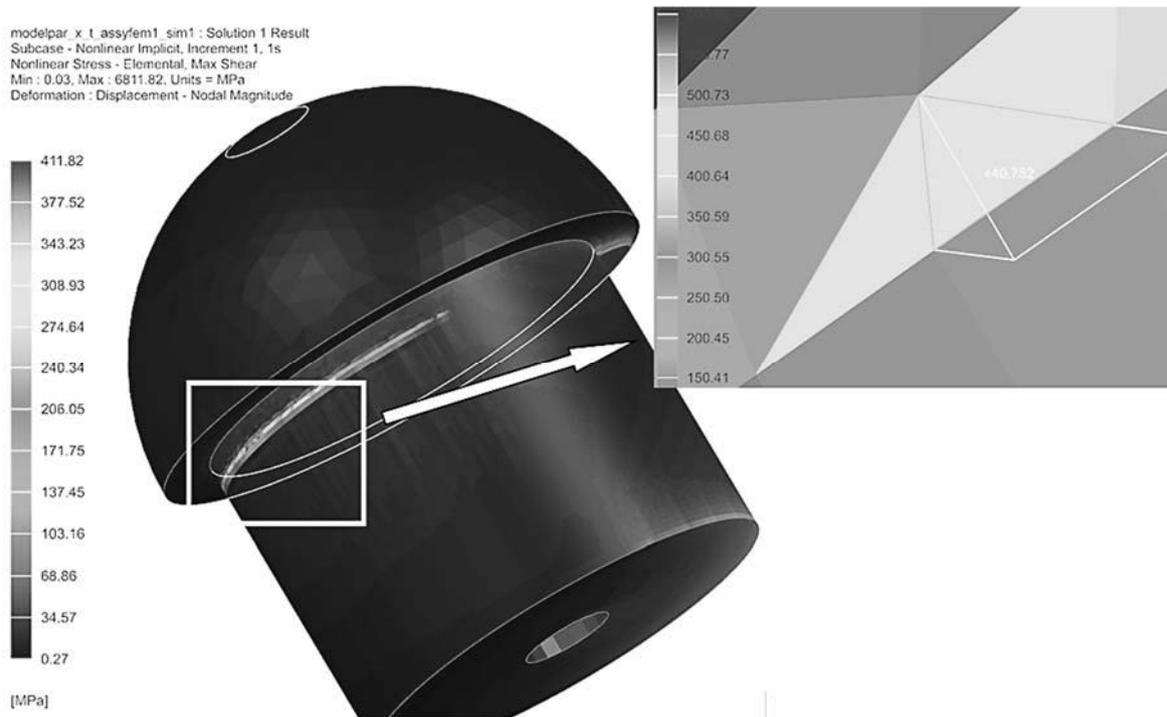


Рис. 8. Распределение напряжений среза

Сопоставив максимальные напряжения среза с максимальными контактными давлениями, полученными на основе конечно-элементного анализа, можно отметить, что первые практически в 78 раз ниже. Теоретически определенные (расчетные) напряжения среза в 25 раз меньше, чем вычисленные с помощью метода конечных элементов. Установлено также, что распределение расчетных напряжений предполагалось равномерным по поверхности опасного сечения, а согласно компьютерным вычислениям наблюдаются два локализованных пятна их активного действия.

### Выводы

Результатами компьютерного моделирования подтверждено, что основным критерием прочностной надежности СРП с двухрядным сателлитом является контактная выносливость мате-

риала ведомого кулачка, т. к. он на практике изготавливается с меньшей твердостью, чем ролики. При этом можно сделать несколько конструктивных предложений по снижению пиков контактных напряжений и недопущению кромочного контакта. Целесообразно увеличить высоту сферического участка ролика таким образом, чтобы экваториальная его часть не являлась ограничивающей, а опасное сечение с радиусом, меньше чем  $r_s$ , располагалось ниже. Рекомендовано повышать жесткость контакта стержней роликов с сателлитом во избежание перекоса их осей под нагрузкой. Конечно-элементный анализ также подтвердил последующую очередность значимости критериев прочности передачи:

- 1) прочность по напряжениям смятия стержня ролика (сателлита);
- 2) прочность по напряжениям среза стержня ролика.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: монография / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с.: ил.
2. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.
3. **Лустенков, М. Е.** Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 25–28.
4. **Лустенков, М. Е.** Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2019. – № 5. – С. 32–43.
5. **Lustenkov, M. E.** Planetary Ball Transmissions: Strength Calculations / M. E. Lustenkov // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 9. – P. 862–866.
6. **Lustenkov, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / M. E. Lustenkov // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, № 2. – P. 111–121.
7. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–27.
8. **Lustenkov, M. E.** Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion / M. E. Lustenkov, E. S. Lustenkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 795 (2020) 012020. – 6 p.
9. Сферические роликовые передачи: расчет на прочность / И. С. Сазонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 2 (55). – С. 98–107.
10. NX [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Siemens PLM Software. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>. – Дата доступа: 28.01.2021.

11. **Лустенков, М. Е.** Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.

12. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П. Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 209 с.: ил.

*Статья сдана в редакцию 1 февраля 2021 года*

**Екатерина Сергеевна Лустенкова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [fittsova@gmail.com](mailto:fittsova@gmail.com).

**Ekaterina Sergeyevna Lustenkova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: [fittsova@gmail.com](mailto:fittsova@gmail.com).

---

УДК 621.791.035

*П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИЗЕЛЬНО-ГАЗОВОГО ТОПЛИВА**

---

UDC 621.791.035

*P. Y. Malyshkin, A. N. Kartashevich*

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE OPERATING PROCESS OF THE 4CH 11,0/12,5 DIESEL ENGINE USING DIESEL GAS FUEL**

---

**Аннотация**

Приводятся теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при использовании дизельно-газового топлива, получены аналитические зависимости с эмпирическими коэффициентами по определению максимальной скорости нарастания давления в цилиндре дизеля и суммарного удельного индикаторного расхода топлива в зависимости от количества подаваемого газового топлива. Определено, что при изменении концентрации сжиженного нефтяного газа марки ПБА на 20 и 40 % в цилиндре дизеля увеличивается максимальное действительное давление цикла на 13,2 и 27,6 %, а также повышается жесткость рабочего процесса на 19,35 и 41,86 % соответственно.

**Ключевые слова:**

дизель, газовое топливо, рабочий процесс, жесткость.

**Abstract**

The article provides theoretical and experimental studies of the operating process of the 4CH 11,0/12,5 diesel engine using diesel gas fuel. Analytical dependencies with empirical coefficients have been obtained for determining a maximum pressure increase rate in the diesel cylinder and a total specific indicator fuel flow rate depending on the amount of gas fuel supplied. It was determined that when the concentration of liquefied petroleum gas of the PBA brand changes by 20 and 40% in the diesel cylinder the maximum effective pressure of the cycle increases by 13,2; 27,6 %, and the rigidity of the operating process raises by 19,35 and 41,86 %, respectively.

**Keywords:**

diesel, gas fuel, operating process, rigidity.

---

**Введение**

Потребление дизельного топлива (ДТ) транспортными средствами организаций Республики Беларусь всех видов экономической деятельности имеет тенденцию к возрастанию. Так, с 2010 по 2017 г. потребление ДТ увеличилось на 27,8 % [1]. По данным, опубликованным в ежегодном Статистическом обзоре мировой энергетики 2020 (Statistical Review of World Energy 2020), мировых запасов нефти при текущем потреблении

топливно-энергетических ресурсов хватит не более чем на 50 лет.

Таким образом, одним из актуальных вопросов современности является применение альтернативного топлива, способного заменить традиционное топливо для двигателей внутреннего сгорания. В числе таких видов возобновляемого топлива в настоящее время рассматриваются водородсодержащие, газовое топливо (ГТ), спирты, эфиры, масла и др., которые позволяют не только улучшить экологические пока-

затели двигателя, но и снизить зависимость от импортируемого топлива [2].

Существенного результата в совершенствовании рабочего процесса ДВС можно было бы добиться, если обеспечить эффективную работу ДВС на дешевых и малоэнергозатратных в производстве видах топлива. Примером такой замены в сфере нефтяного топлива может быть замещение дизельного топлива газовым [3].

Исследованием рабочего процесса дизеля при использовании альтернативного газового топлива занимались такие ученые, как В. А. Лиханов, М. А. Олейник, В. В. Горбунов, О. П. Лопатин, А. В. Шибанов, Л. В. Рудаков, Р. Р. Деветьяро, Е. Б. Лисицын, Х. Л. Гальдос Гомез и др.

Работы по созданию и исследованию опытных образцов дизелей, работающих на газодизельном топливе, проводились НЗГА, НАМИ, Саратовским ГАУ им. Н. И. Вавилова, НПЦ «Авангард», Вятской ГСХА, Robert Bosch GmbH и др.

В Республике Беларусь стендовые испытания дизелей при работе на газовом топливе были проведены на Минском моторном заводе. Результатом исследований стало создание газодизельных двигателей MMZ-3LGD, ГД-243, ГД-245.7, ГД-245.9, ГД-260, ГД-260.1, работающих по газодизельному циклу с замещением 70 % дизельного топлива природным газом.

Рассмотренные работы предполагали замещение ДТ природным газом от 70 до 90 %, при этом отмечается снижение дымности отработавших газов (ОГ) на 42...90 % и изменение содержания оксидов азота – на 11...42 %, однако происходит увеличение суммарного количества углеводородов ( $C_nH_m$ ) в ОГ примерно в 12–25 раз.

Х. Л. Гальдос Гомез и В. В. Горбунов провели моторные испытания на дизелях с подачей смеси ДТ и сжиженного нефтяного газа через единую штатную форсунку. Массовая доля сжиженного газа в смесевом топливе находилась в

пределах 7...27 %. При этом отмечено, что расход ДТ снизился на 11...21 %, дымность ОГ уменьшилась на 50...70 %, температура ОГ снизилась на 20...50 °С, минимально устойчивая частота вращения холостого хода снизилась на 130...150 мин<sup>-1</sup> по сравнению с работой дизеля на ДТ и повысилась жесткость рабочего процесса двигателя.

### Основная часть

Работа газов  $L_i$  за цикл в одном цилиндре двигателя выражается зависимостью [4]

$$L_i = p_i V_h = p_i F S, \quad (1)$$

где  $p_i$  – среднее индикаторное давление, Па;  $F$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>;  $S$  – ход поршня, м;  $V_h$  – рабочий объем одного цилиндра, м<sup>3</sup>.

Величина индикаторной мощности (работа, совершаемая газами за 1 с) в одном цилиндре выражается зависимостью

$$N_i = L_i \frac{n}{\tau \cdot 30} = \frac{p_i \cdot V_h \cdot n}{\tau \cdot 30}, \quad (2)$$

где  $\frac{n}{\tau \cdot 30}$  – число рабочих ходов в секунду;  $n$  – частота вращения коленчатого вала, с<sup>-1</sup>;  $\tau$  – коэффициент тактности цикла (для четырехтактного цикла  $\tau = 4$ ).

Основными параметрами, характеризующими экономичность действительного цикла двигателя, являются индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) и удельный индикаторный расход топлива [5, 6].

При использовании нескольких видов топлива экономичность действительного цикла оценивается суммарным удельным индикаторным расходом дизельного и газового топлива  $g_i$  и индикаторным КПД  $\eta_i$  по зависимости

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q_1} = \frac{L_i}{H_u \cdot G_{\text{ц}}} = \frac{3600 \cdot 10^3}{\sum H_u \cdot g_i} =$$

$$= \frac{3600 \cdot 10^3}{H_{\text{удТ}} \cdot g_{\text{дТ}} + H_{\text{угТ}} \cdot g_{\text{гТ}}}, \quad (3)$$

где  $Q_i$  – количество теплоты, эквивалентное индикаторной работе  $L_i$ , Дж;  $Q_1$  – количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании топлива, Дж;  $3600 \cdot 10^3$  – количество теплоты, эквивалентное выполненной работе в 1 кВт за 1 ч, Дж;  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;  $G_{\text{ц}}$  – расход топлива, кг;  $H_{\text{удТ}}$ ,  $H_{\text{угТ}}$  – низшая теплота сгорания дизельного и газового топлива, Дж/кг;  $g_{\text{дТ}}$ ,  $g_{\text{гТ}}$  – удельный индикаторный расход дизельного и газового топлива, кг/ч;  $g_i$  – суммарный удельный индикаторный расход топлива, кг/ч.

Удельный индикаторный расход топлива  $g_i$  и индикаторный КПД  $\eta_i$  двигателя тесным образом взаимосвязаны с эффективными показателями двигателя следующими соотношениями [4]:

$$g_i = g_e \cdot \eta_m; \quad \eta_i = \frac{\eta_e}{\eta_m}; \quad g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u},$$

где  $g_e$  – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч);  $\eta_e$  – эффективный КПД;  $\eta_m$  – механический КПД.

Обеспечение высокой топливной экономичности ДВС возможно осуществить за счет повышения индикаторного КПД путем совершенствования рабочего процесса двигателя, т. е. эффективности сгорания топлива.

Перспективной задачей двигателестроения является достижение удельного индикаторного расхода топлива для дизелей с наддувом 160...185 г/(кВт·ч). Достичь этого можно повышением индикаторного КПД и (или) увеличением теплоты сгорания подаваемого топлива.

Предполагается, что подача ГТ в виде сжиженного нефтяного газа с низшей теплотой сгорания  $H_{\text{угТ}} = 45,81$  МДж/кг

(против  $H_{\text{удТ}} = 42,5$  МДж/кг у ДТ) в дизель позволит повысить эффективность КПД за счет повышения теплоты сгорания топливовоздушной смеси при уменьшении коэффициента избытка воздуха и интенсификации процесса выгорания сажевых частиц в цилиндрах двигателя. При этом необходимо обосновать количество подаваемого ГТ в цилиндры дизеля и проанализировать изменения в рабочем процессе дизеля, а именно жесткости рабочего процесса.

Учитывая, что состав ГТ многообразен и обладает свойствами, отличными от ДТ, проведено моделирование рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха Д-245.5S2 при работе на ДТ и ГТ с использованием программного комплекса «ДИЗЕЛЬ – РК», разработанного в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Результаты расчета представлены на рис. 1.

Скорость нарастания давления по углу поворота коленчатого вала ( $dp/d\phi$ ) имеет максимальное значение во второй фазе сгорания, собственно, которая и характеризует жесткость процесса сгорания. Для автотракторных дизелей  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 0,4...1,0$  МПа/град ПКВ, для дизелей с наддувом  $(dp/d\phi)_{\text{max}} = 1,0...1,2$  МПа/град ПКВ [4].

Анализ рис. 1 с использованием метода интерполяции в среде MS Excel 2007 позволил получить зависимости с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9634$  для выражения (4) и  $R^2 = 0,9786$  для выражения (5).

Максимальная скорость нарастания давления во второй фазе сгорания (жесткость процесса) при работе дизеля на ДТ и подачей ГТ на номинальном режиме  $(dp/d\phi)_{\text{max ГТ}}$ , МПа/град ПКВ, достаточно точно определяется по зависимости

$$(dp/d\phi)_{\text{max ГТ}} = A_1 \cdot G_{\text{г}}^3 + A_2 \cdot G_{\text{г}}^2 -$$

$$- A_3 \cdot G_{\text{г}} + (dp/d\phi)_{\text{max ДТ}}, \quad (4)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  – эмпирические коэффициенты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха ( $A_1 = 14,7$ ;  $A_2 = 0,83$ ;  $A_3 = 0,157$ );  $G_r$  – количество подаваемого газа от расхода ДТ, доли;

$(dp/d\varphi)_{\max}$  ДТ – максимальная скорость нарастания давления (жесткость процесса) при работе дизеля на ДТ, МПа/град ПКВ.

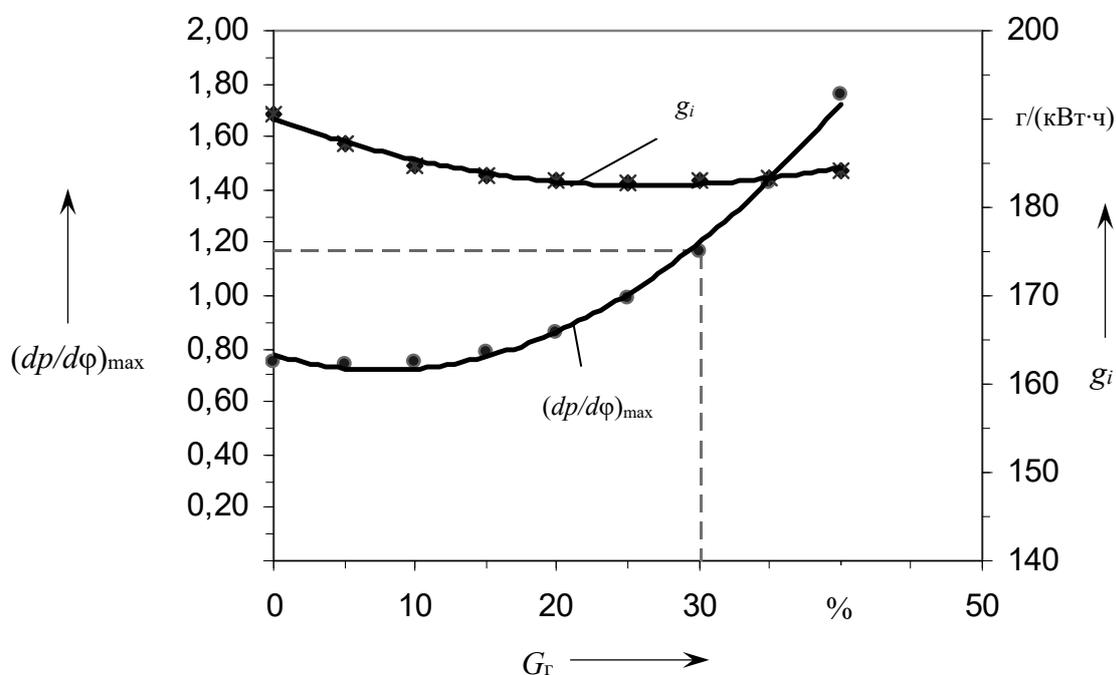


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max}$  во второй фазе сгорания дизеля с наддувом и суммарным удельным индикаторным расходом дизельного и газового топлива  $g_i$  от количества подаваемого газа  $G_r$

Суммарный удельный индикаторный расход топлива  $g_i$  при работе дизеля на ДТ и подачей ГТ на номинальном режиме  $g_i$ , кг/(кВт·ч), достаточно точно определяется по зависимости

$$g_i = A_1 \cdot G_r^2 - A_2 \cdot G_r + g_{i_{дт}}, \quad (5)$$

где  $A_1, A_2$  – эмпирические коэффициенты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха ( $A_1 = 0,11$ ;  $A_2 = 0,058$ );  $G_r$  – количество подаваемого газа от расхода ДТ, доли;  $g_{i_{дт}}$  – удельный индикаторный расход дизельного топлива, кг/(кВт·ч).

Анализ полученных результатов показал, что по мере увеличения подачи газового топлива суммарный удельный индикаторный расход его уменьшается,

что является следствием значительного влияния ГТ на процесс сгорания, происходящий в цилиндре дизеля с наддувом. Наименьшее значение суммарный удельный индикаторный расход топлива имеет при подаче ГТ 25...35 % от ДТ, а при дальнейшем увеличении концентрации ГТ в цилиндре дизеля приводит к снижению индикаторной работы, чрезмерному повышению жесткости рабочего процесса, усилению диссоциации продуктов сгорания и увеличению потери теплоты, выбрасываемой с отработавшими газами в окружающую среду.

С целью недопущения превышения максимальной скорости нарастания давления для дизеля с наддувом предлагается ограничить подачу ГТ в диапазоне 20...30 % от ДТ, при этом

$(dp/df)_{\max} \leq 1,0 \dots 1,2$  МПа/град ПКВ.

Для проверки теоретических исследований проведено индицирование рабочего процесса дизеля в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания и топлива на кафедре тракторов, автомобилей и машин для природообустройства УО «БГСХА». В качестве силовой экспериментальной установки для проведения стендовых испытаний применялся дизель 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) производства

ОАО «Минский моторный завод», оснащенный газовой системой питания [6–8] и необходимыми измерительными приборами. Нагрузку дизелю создавал электротормозной стенд SAK-N670 (Германия) с балансирной маятниковой машиной RAPIDO, предназначенный для испытания двигателей мощностью до 250 кВт. Схема силовой экспериментальной установки, размещенной на моторном стенде с системой подачи газового топлива, представлена на рис. 2.

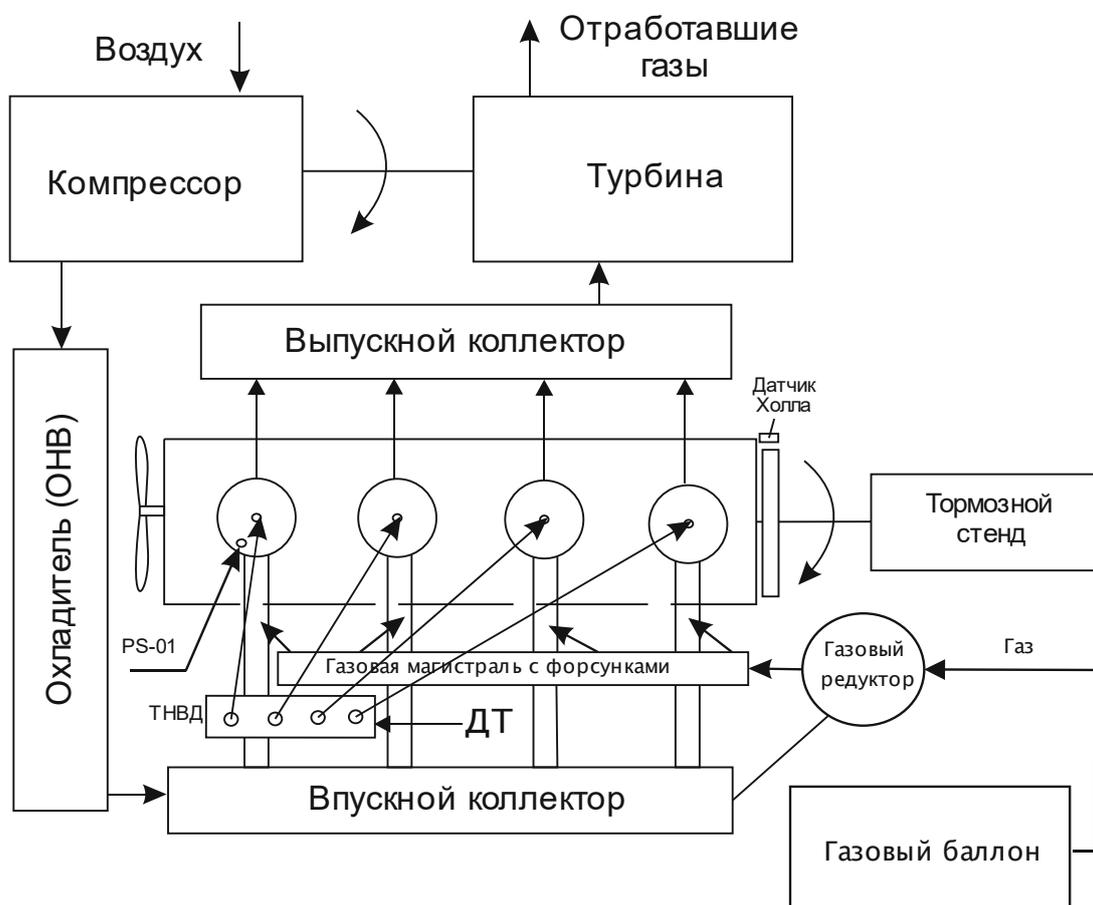


Рис. 2. Схема силовой экспериментальной установки

Для синхронизации положения поршня на маховике дизеля установлен отметчик ВМТ, а на защитном кожухе маховика размещен датчик Холла

и соединен с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) NATIONAL INSTRUMENTS cDAQ-9178 (рис. 3).

Датчик Холла, определяющий

положение коленчатого вала, позволяет точно найти положение поршня первого цилиндра в ВМТ. Пьезокварцевый датчик динамического давления PS-01 монтировался через специальный адаптер в головку блока цилиндров дизеля вместо свечи накаливания первого цилиндра [9]. Погрешность измерения давления в цилиндре дизеля в диапазоне измеряемых величин 0,1...25 МПа

составляет  $\pm 3\%$ .

Измерительные сигналы после усилителя и аналого-цифрового преобразователя поступали в персональный компьютер и записывались с помощью программы Measurement & Automation Explorer в виде диаграмм. Запись данных индицирования проводилась после стабилизации параметров работы дизеля в течение 1 мин работы.

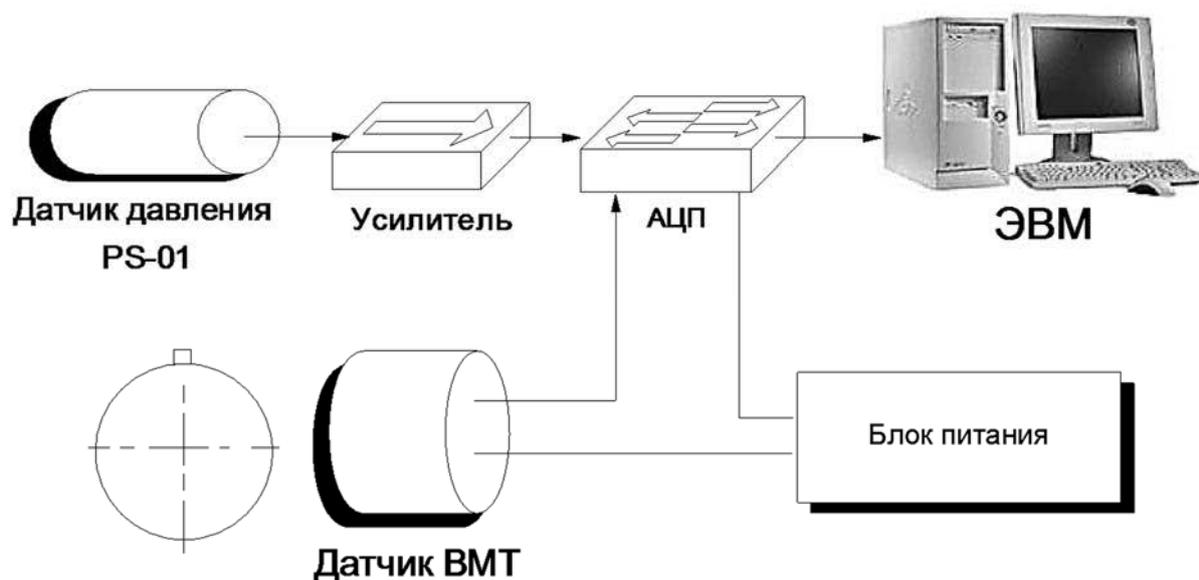


Рис. 3. Схема подключения приборов для индицирования двигателя

При анализе индикаторной диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха (рис. 4) при номинальной нагрузке, установочном угле опережения впрыска топлива  $\theta = 18^\circ$  и частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  определено максимальное действительное давление цикла при работе на ДТ –  $P_{зд} = 11,226 \text{ МПа}$  при угле поворота 7 град ПКВ; при работе на дизельно-газовом топливе (ДГТ), состоящем из 20 % ГТ и 80 % ДТ,  $P_{зд} = 12,721 \text{ МПа}$  при угле поворота 7 град ПКВ; при работе на ДГТ (40 % ГТ + 60 % ДТ)  $P'_{зд} = 14,334 \text{ МПа}$  при угле поворота 5 град ПКВ.

При использовании ДГТ уменьша-

ется угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при этом повышается максимальное действительное давление цикла при подаче 20 % ГТ на 13,2 %, а при подаче 40 % ГТ – на 27,6 %. Угол наклона кривой давления увеличивается, точка максимального давления смещается ближе к ВМТ, что свидетельствует о возрастающей жесткости процесса сгорания.

На номинальном режиме максимальная скорость нарастания давления во второй фазе процесса сгорания составляет  $0,75 \text{ МПа/град ПКВ}$  при работе на ДТ, среднем эффективном давлении  $p_e = 1,0 \text{ МПа}$  и частоте вращения коленчатого вала  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ .

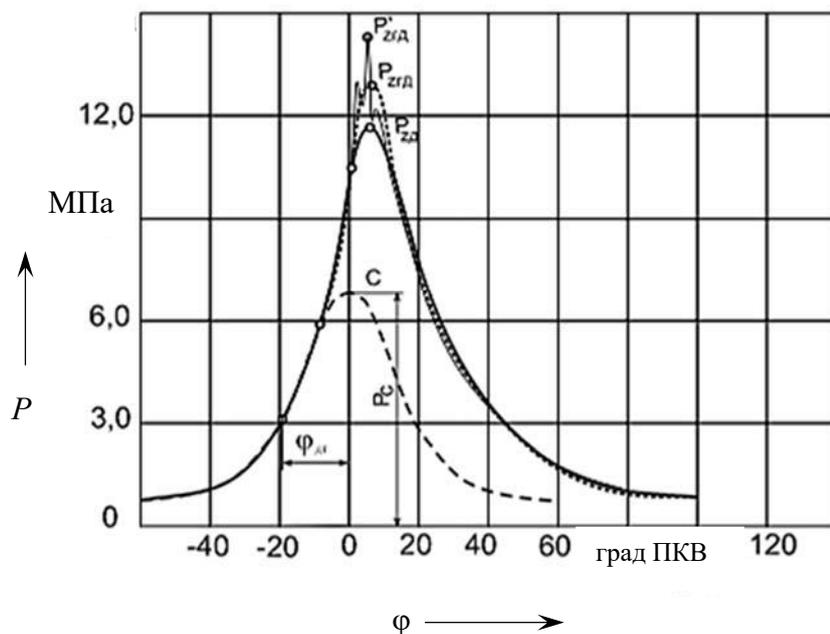


Рис. 4. Развернутая индикаторная диаграмма процесса индицирования дизельного двигателя Д-245.5S2: ——— ДТ; - - - - - ДГТ (20 % ГТ + 80 % ДТ); - · - · - ДГТ (40 % ГТ + 60 % ДТ)

Изменение количества газового топлива в цилиндре дизеля на 20 и 40 % повышает максимальную скорость нарастания давления во второй фазе процесса сгорания на 19,35 % (до 0,93 МПа/град ПКВ) и 41,86 % (до 1,29 МПа/град ПКВ) соответственно.

### Заключение

1. Теоретические исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха (Д-245.5S2) при работе на ДГТ позволили установить аналитические зависимости с эмпирическими коэффициентами по определению максимальной скорости нарастания давления в цилиндре дизеля и суммарного удельного индикаторного расхода топлива в зависимости от количества подаваемого ГТ. При подаче ГТ в размере 20...30 % от ДТ

$(dp/dφ)_{max} \leq 1,0...1,2$  МПа/град ПКВ не превышает предельного значения для дизеля с наддувом.

2. Проведены экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охладителем наддувочного воздуха при работе на ДГТ при номинальной нагрузке, установочном угле опережения впрыска топлива  $\theta = 18^\circ$  и частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Определено, что при изменении концентрации сжиженного нефтяного газа марки ПБА на 20 и 40 % в цилиндре дизеля увеличивается максимальное действительное давление цикла на 13,2 и 27,6 % соответственно.

3. Изменение количества газового топлива в цилиндре дизеля на 20 и 40 % повышает жесткость рабочего процесса на 19,35 и 41,86 % соответственно, что с достаточной точностью согласуется с полученной зависимостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистический ежегодник Республики Беларусь. – Минск: Нац. стат. ком. РБ, 2016. – 518 с.
2. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.
3. **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.
4. **Карташевич, А. Н.** ДВС. Основы теории и расчета: учебное пособие / А. Н. Карташевич, Г. М. Кухаренок. – Горки: БГСХА, 2011. – 315 с.
5. **Стечкин, Б. С.** Избранные труды. Теория тепловых двигателей / Б. С. Стечкин. – Москва: Физматлит, 2001. – 432 с.
6. **Карташевич, А. Н.** Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестн. БГСХА. – 2013. – № 3. – С. 110–115.
7. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: пат. ВУ 10060 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин. – Опубл. 30.04.2014.
8. **Малышкин, П. Ю.** Системы подачи газового топлива в дизель / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич // Вестн. БГСХА. – 2015. – № 4. – С. 128–136.
9. **Карташевич, А. Н.** Новый подход к исследованию рабочего процесса дизеля / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. – Горки: БГСХА, 2019. – Вып. 4. – С. 171–175.

*Статья сдана в редакцию 18 февраля 2021 года*

**Павел Юрьевич Малышкин**, ст. преподаватель, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. Тел.: +375-29-246-08-05. E-mail: Pavelm36@yandex.by.

**Анатолий Николаевич Карташевич**, д-р техн. наук, проф., Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. Тел.: +375-29-662-19-88. E-mail: Kartashevich@yandex.ru.

**Pavel Yuryevich Malyshkin**, senior lecturer, Belarusian State Agricultural Academy. Tel.: +375-29-246-08-05. E-mail: Pavelm36@yandex.by.

**Anatoly Nikolaevich Kartashevich**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian State Agricultural Academy. Tel.: +375-29-662-19-88. E-mail: Kartashevich@yandex.ru.

---

УДК 629.113.001

*А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич*

**ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ –  
ОСНОВА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ**

---

UDC 629.113.001

*A. N. Panov, Z. A. Mrochek, V. M. Pashkevich*

**LONG-TERM PRODUCT QUALITY PLANNING IS A FOUNDATION  
FOR PROCESS DESIGN USING A RISK-BASED APPROACH**

---

**Аннотация**

Рассматривается проблема необходимости переосмысления процесса технологического проектирования в связи с изменившейся парадигмой – переходом с детерминированно-вероятностного постулата проектирования на риск-ориентированный. Предлагаются некоторые основополагающие элементы методологии и модели перспективного планирования качества, необходимые для использования при разработке технологических процессов изготовления для достижения приемлемых вероятностей несоответствия продукции при ее тиражировании и обеспечения конкурентоспособной эффективности.

**Ключевые слова:**

продукция, качество, технология, проектирование, перспективное планирование, риски.

**Abstract**

The paper discusses the need to reconsider technological process design in connection with a changed paradigm, i.e. the transition from a deterministic and probabilistic design postulate to a risk-oriented one. Some fundamental elements of the methodology and models of long-term quality planning are proposed, which are necessary for the development of technological processes in order to achieve acceptable probabilities of product non-conformity during reproduction and to ensure competitive efficiency.

**Keywords:**

output, quality, technology, design, long-term planning, risks.

---

**Введение**

Требования потребителей продукции при ее тиражировании по вероятности соответствия (функционирование, надежность, безопасность) значительно, на 2...4 порядка, выросли за последние годы. Показатель ppm/ppb (вместо процента брака) при использовании детерминированно-вероятностного постулата проектирования недостижим. Значительное усложнение продукции, в том числе за счет встраивания программного обеспечения и даже появления «безлюдных» технологий, с одной стороны,

планетарная конкуренция и необходимость снижать себестоимость производства и одновременно увеличивать оплату труда – с другой, являются основой появления постулата риск-ориентированного мышления. Указанное определяет актуальнейшую задачу современности – совершенствование процессов технологического проектирования.

Традиционно критерием достижения качества продукции при проектировании и апробации технологических процессов являлся приемлемый процент брака [1–7]. Следует отметить, что традиционно критерием одобрения (вали-

дации) технологического процесса выступает проверка (верификация) достижения вероятности соответствия 99,7 % при изготовлении опытной партии продукции в ходе постановки продукции на производство [1–9].

Требования потребителей изменились [10–13] – критерием качества продукции уже не является, хотя еще часто используется особенно для бухгалтерского учета, процент брака / дефектность (рис. 1).

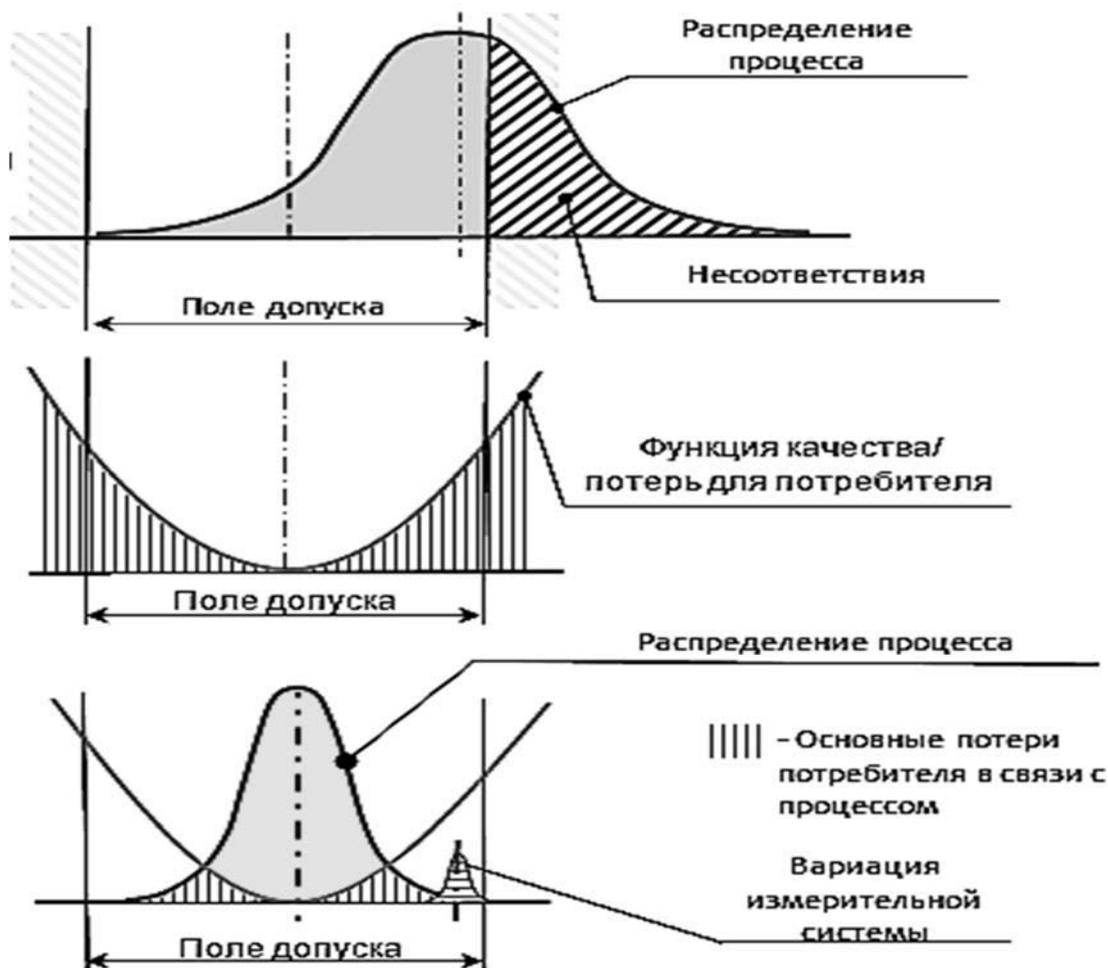


Рис. 1. Вероятностный подход к достижению соответствия процесса на основе оптимизации вариаций процесса тиражирования и измерительной системы

При тиражировании целью по качеству становится, например, достижение требуемой вероятности несоответствия продукции в показателях, таких как  $ppm$  или даже  $ppb$ , например,  $50 ppm$ . То есть требуемая вероятность соответствия должна быть на 3...5 порядков меньше по сравнению с традиционным подходом. Достичь указанной вероятности классическими методами проек-

тирования технологии не представляется возможным. Традиционное проектирование основывается на детерминированном подходе и **вероятностной оценке**, т. е. на предположении, что технологические и производственные процессы и объекты, в них участвующие (оборудование, инфраструктура, персонал и т. д.), например, система СПИД (станок–приспособление–инструмент–деталь), почти

неизменны в течение времени, и это позволяет стабильно достигать соответствия продукции, которое было оценено в момент ее постановки на производство. Фактически указанным процессам, например, системе СПИД, также присущи вариации и бифуркации [10–15]. В свою очередь, процессы обеспечения соответствия производства, например, процессы проведения обслуживания оборудования, оснастки, подготовки инструмента, средств измерения, помещений, в течение длительного времени также изменчивы [10–13]. Соответственно, первоначальная (по окончании подготовки производства) оценка надежности/точности (ГОСТ 27.202) технологического процесса становится недостоверной во времени. Достижение малых вероятностей (ppm/ppb) существенно удорожает производство. Следует отметить, что традиционно используемый критерий «цена – качество», характеризующий потери для потребителя (см. рис. 1), в условиях планетарных сокращения ресурсов и конкуренции уже не позволяет управлять повышением эффективности производства и потребления. Методы риск-ориентированного подхода, например, по СТБ 16949 [16, 17], позволяют управлять достижением малых вероятностей в зависимости от значимости последствий для заинтересованных сторон, прежде всего конечного потребителя, эффективным образом. Новой методологией для достижения соответствия продукции и процессов изготовления является перспективное планирование качества продукции на основе управления рисками (ППКПОУР). ППКПОУР основано на концепции возможности достижения максимальной эффективности деятельности при приемлемом риске для заинтересованных сторон. ППКПОУР реализуется [10–17]: динамичным и актуализируемым планированием качества, опережающим проектирование и разработку продукции и процессов изготовления/диагностики/обслуживания/ремонта/утилизации, вклю-

чая планирование вероятностей возникновения и обнаружения несоответствий в зависимости от значимости последствий как критерия приемлемости риска (рис. 2); системным анализом, идентификацией, диагностикой коренных причин несоответствий, управлением рисками, оптимизацией вариаций характеристик продукции и процессов (см. рис. 1) изготовления/диагностики/обслуживания/ремонта/утилизации (с акцентом на приоритетных характеристиках продукции), всех объектов управления (персонал, оборудование, материалы, методы, процессы, производственная среда, менеджмент), используемых на всех этапах создания продукции; целенаправленным доведением вероятности появления каждой из причин каждого из идентифицированных рисков до приемлемого уровня (см. рис. 2); применением методов последовательного снятия неопределенностей для достижения целей; математически обоснованной верификацией и валидацией достижения соответствия установленным требованиям типа концепта проекта (фаза «концепция»), типа продукции (фаза «опытный образец» / «прототип»), типа процессов апробации – изготовления/диагностики/обслуживания/ремонта утилизации (фаза «предзапуск», «подготовка к изготовлению» / «опытная партия»), типа процессов тиражирования продукции и процессов (фаза «производство»/«изготовление»/«серия»), типа процессов применения продукции и процессов (фаза «эксплуатация»/«диагностика/обслуживание/ремонт»), типа процессов утилизации продукции и процессов (фаза «утилизация»); реализацией планов качества в ходе реализации плана проекта (например, проект по созданию производства); устранением обнаруженных и предотвращением потенциальных причин несоответствий, идентифицированных на основе актуальных достижений науки и техники и выявленных в аналогичных продукции и процессах изготовления; менеджментом знаний, адекватном использовании дости-

жений науки и техники; многодисциплинарным подходом; оптимизацией затрат на контроль, предупреждением несоответствий и потерь на фазах создания продукции от концепта проекта до окончания утилизации во всей цепи поставок

(цепь поставщиков – от материалов до узлов и агрегатов) [11–13]. Повышение результативности и эффективности для потребителя возможно путем снижения вариации или повышения робастности процессов тиражирования (см. рис. 1).

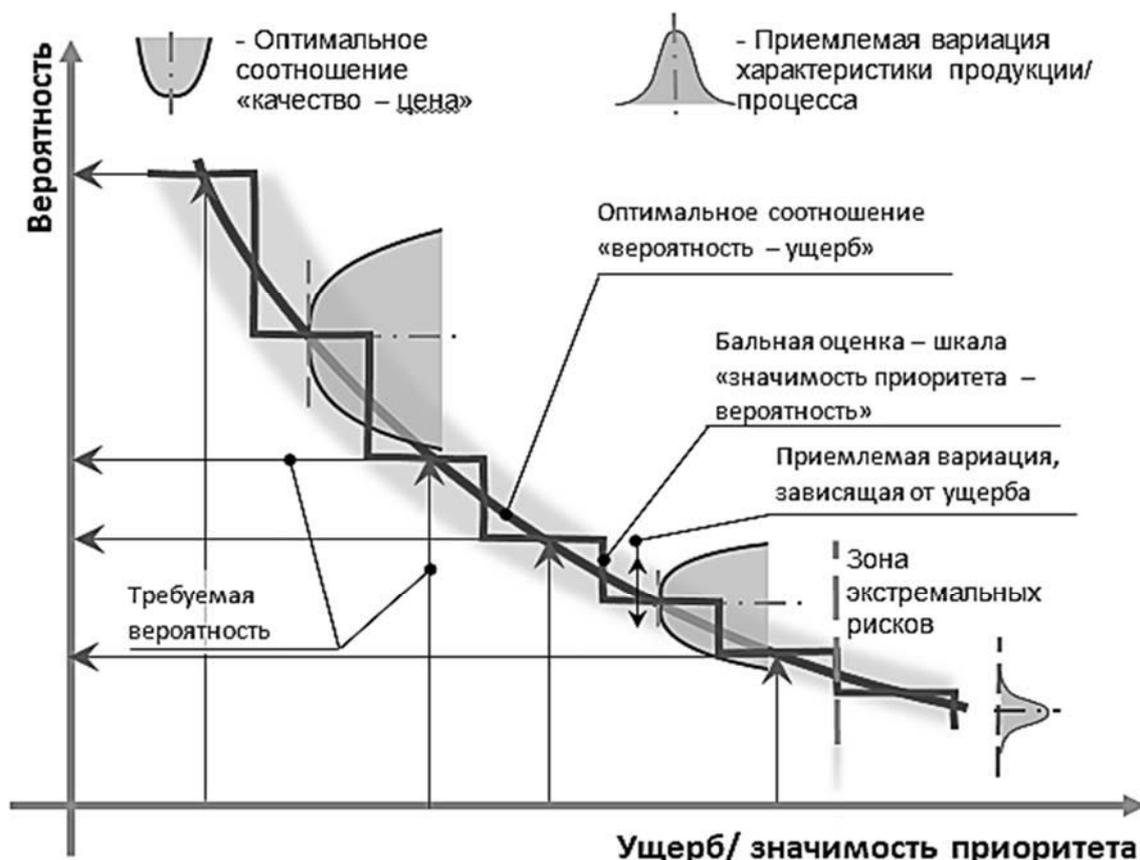


Рис. 2. Модель оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб» при риск-ориентированном мышлении и шкала «значимость приоритета – вероятность» для продукции/процесса

В настоящее время для оптимизации технологических процессов используется параболическая модель как функция качества / потерь для потребителя (см. рис. 1). Свойством процессов тиражирования является наличие рисков вариаций как для самого процесса, так и для измерительных систем (см. рис. 1) [6].

Предложена модель оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб»

при риск-ориентированном мышлении при создании продукции и процесса (см. рис. 2) [13–16].

Гиперболическая связь между потенциальным ущербом и приемлемой вероятностью несоответствия определяет, что значимый ущерб от несоответствия продукции / процесса тиражирования должен быть получен с меньшей вероятностью, чем менее значимый. Таким образом, достигается требуемая вероятность идентифицированного ущерба.

Для удобства анализа рисков зависимость (см. рис. 2) представляется в виде ступенчатой функции (значимость приоритета – вероятность) [16–21]. Если целью является создание продукции, то гиперболлическая функция определяет значимость приоритетов для характеристик продукции, а вариация гиперболлической функции характеризует изменчивость создаваемой продукции процесса тиражирования. Если целью является создание процесса тиражирования, то гиперболлическая функция определяет значимость приоритетов для характеристик процесса, а вариация функции характеризует изменчивость участвующих в процессе объектов (станки, оснастки, инструменты и т. д.). Приемлемость вариации в зависимости от ущерба определяется оптимальным соотношением «качество – цена» (см. рис. 2). Параболлическая зависимость «качество – цена» зависит от ущерба, и ее крутизна возрастает с повышением величины ущерба [15–21].

Предложены (рис. 3) модели функций качества для поставщика на основе критерия потерь, возникающих из-за несоответствия продукции/процесса требованиям потребителя, критерия потерь из-за увеличения требуемых инвестиций для снижения вариаций процессов тиражирования.

Повышение результативности и эффективности для поставщика возможно путем снижения вариации или повышения робастности процессов тиражирования.

Рассмотрим первый путь – снижение вариации. Затраты организации-поставщика на достижение соответствия являются суммой существенно нелинейных функций инвестиций и потерь. Параболлическая зависимость описывает оптимальное соотношение «инвестиции – потери» и наличие минимального значения «качество – цена» (рис. 3, а).

Фактическое распределение процесса является источником и определяет количество несоответствий по крите-

риям технических требований – целевому значению и полю допуска (см. рис. 1). Предлагается модель функции качества / потерь для поставщика в виде двух несимметричных парабол (рис. 3, б). Свойством процессов тиражирования является наличие вариации как для самого процесса, так и для измерительных систем, с одной стороны, с другой – существенно нелинейно возрастают как инвестиции при достижении целевого номинального значения, так и потери для поставщика при выходе процесса за поле допуска. При риск-ориентированном мышлении для снижения затрат на достижение соответствия необходимо обеспечить распределение процесса в зонах приемлемого ущерба. Совместные области оптимального компромисса распределения процесса и функции качества / потерь для поставщика на основе снижения вариации как процесса, так и измерительной системы представлены на рис. 3, в.

Вторым путем повышения результативности и эффективности для поставщика является увеличение робастности процесса тиражирования (рис. 3, г). Указанное достигается соответствующими конструкторско-технологическими решениями [10–13].

Планирование управления рисками достижения соответствия продукции и процессов ее тиражирования основывается на введении систем описания шкалы значимости (рис. 2 и 4) последствий несоответствия технической характеристики для конечного потребителя, а также идентификации значимости приоритетов в конструкторско-технологической и другой документации (рис. 5) [12, 13, 16–21]. Результаты определения значимости приоритетов на основе системного анализа характеристик [12, 13, 19] документируется в соответствующих перечнях [12, 13, 16–21]. Обеспечение вероятности процесса тиражирования продукции в зависимости от ущерба / значимости приоритета [12, 13] возможно на основе применения

системы адекватных статистических методов, например, с помощью матрицы Панова–Менделеева [12, 13, 18–21]. Указанное позволяет в зависимости от значимости показателя приоритета

(см. рис. 5) выбирать соответствующие по точности математические методы управления технологическим процессом [18].

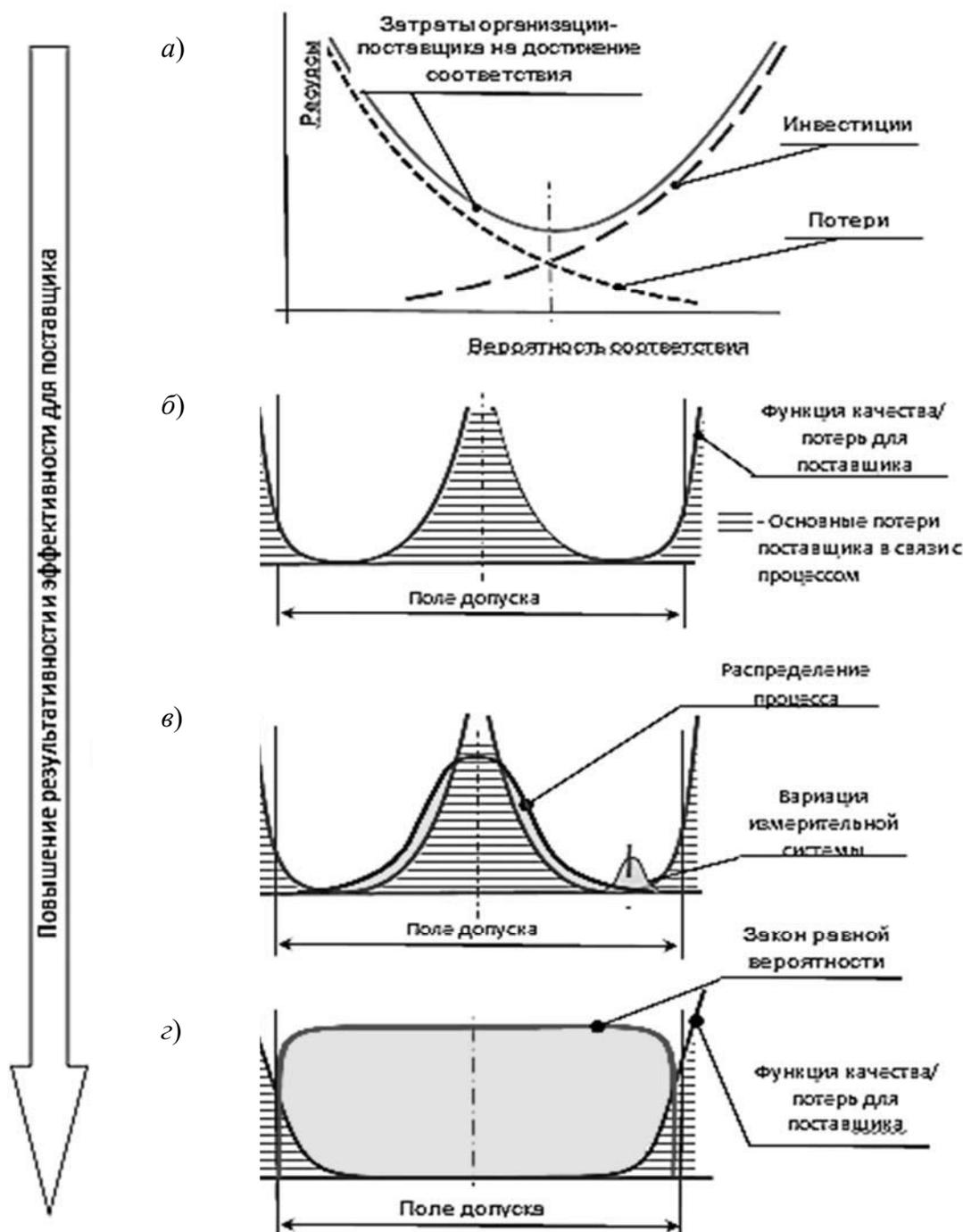


Рис. 3. Риск-ориентированный подход к достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процесса и измерительной системы или увеличения робастности процесса: а – оптимизация ресурсов для достижения цели; б – достижение цели для поставщиков; в – достижение цели на основе снижения вариации; г – достижение цели на основе увеличения робастности

Значимость последствий	
Балл	Описание
10	Внезапный отказ связан с угрозой безопасности человека, окружающей среды, нарушением законодательных требований и требований потребителя
9	Постепенный отказ связан с угрозой безопасности человека, окружающей среды, нарушением законодательных требований и требований потребителя
8	Отказ не связан с безопасностью человека, полная потеря функции продукции
7	Функционирование продукции на очень низком уровне, потребитель крайне не удовлетворен
6	Продукция функционирует, но ее эксплуатационные характеристики снижены, что вызывает раздражение у потребителя
5	Продукция функционирует, но удобство использования на низком уровне. Потребитель частично не удовлетворен
4	Несоответствие внешнего вида продукции. Отклонение замечают большинство потребителей
3	Несоответствие внешнего вида продукции. Отклонение замечают половина потребителей
2	Несоответствие внешнего вида продукции. Отклонение замечают только отдельные потребители
1	Отсутствуют отклонения

Рис. 4. Фрагмент примера описания системы значимости последствий несоответствия технической характеристики для конечного потребителя

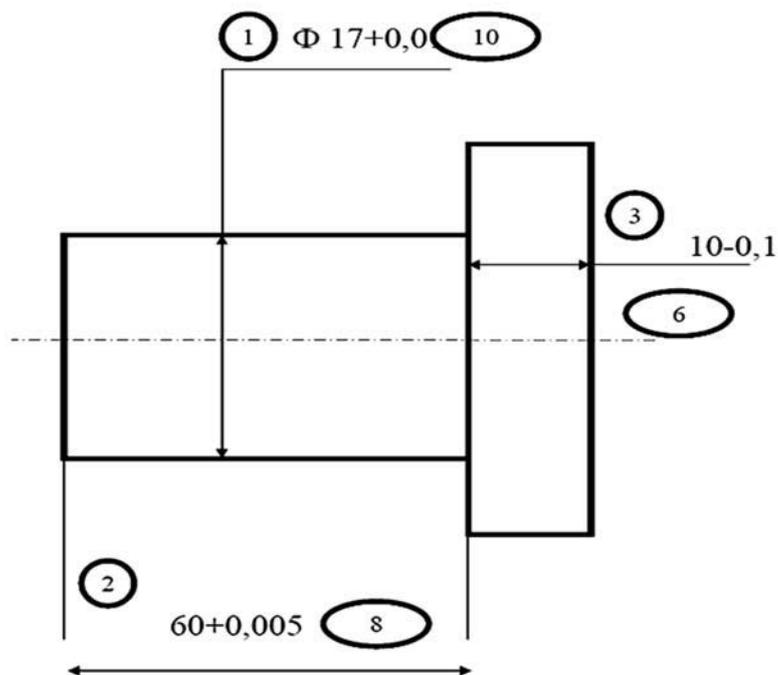


Рис. 5. Пример идентификации значимости приоритета в конструкторско-технологической документации [12]:  $\odot$  – порядковый номер параметра;  $\circ$  – степень важности параметра

Для реализации системного анализа, идентификации коренных причин несоответствий и управления рисками по приоритетам на следующих этапах необходимо осуществить декомпозицию от несоответствия конечной продукции до ее элемента [19] и разработать перечень идентифицированных характеристик значимости приоритета для продукции [18–21]. Следующим этапом является проведение анализа причинно-следственных связей на основе построения «деревьев конструкции / процессов», «деревьев функций» – «деревьев отказов» и «деревьев причин».

Указанное позволяет определить коренные причины отказов / несоответствий продукции и процессов для их управления [11–15]. Последующие этапы планирования управления рисками и их оптимизации включают разработку планов управления рисками, карты потока, идентификации и применения описания единой системы классификации значимости последствий, ве-

роятностей возникновения и вероятности необнаружения несоответствия, проведения анализа значимых факторов на достижение соответствия продукции и синтеза дополнительных действий для оптимизации затрат при управлении рисками соответствующими методами, например FMEA [12, 13, 19]. Указанное позволяет оценивать вероятность несоответствия по статистическим характеристикам процесса изготовления [18].

На рис. 6 представлена разработанная модель оптимальной эффективности для потребителя и поставщика на основе риск-ориентированного подхода. Изложенное достигается путем оптимизации вариации и путем увеличения робастности процесса тиражирования. Совместное рассмотрение функций качества поставщика и потребителя определяет зоны оптимальности. Указанные зоны являются результатом компромисса «качество – цена» при использовании риск-ориентированного мышления.

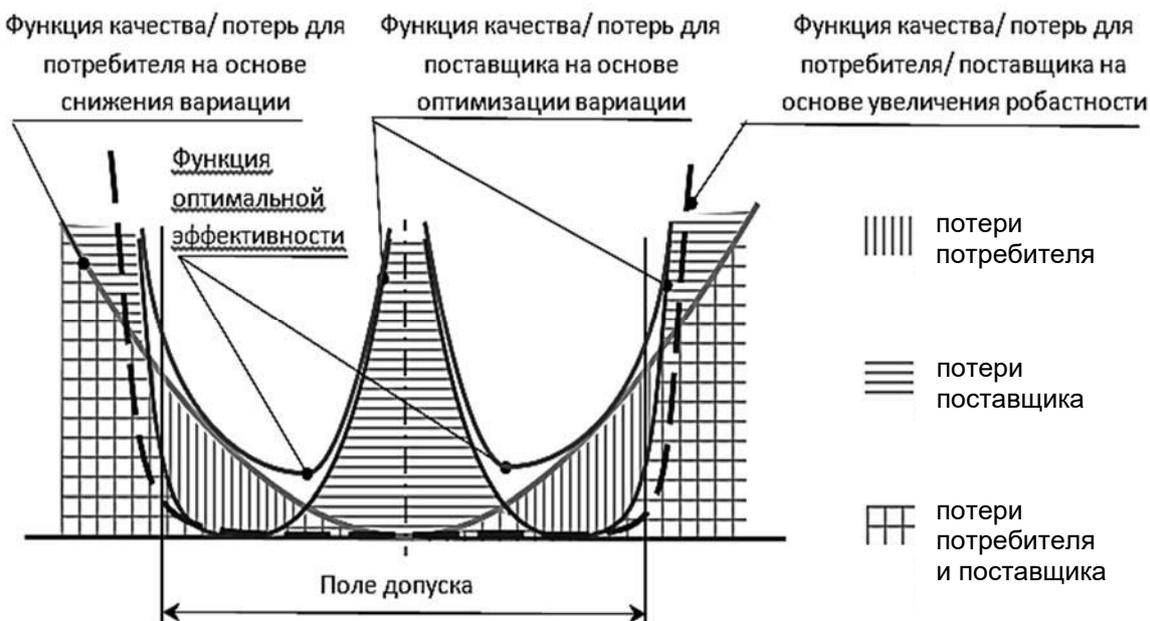


Рис. 6. Модель оптимизации эффективности для потребителя и поставщика на основе риск-ориентированного подхода к достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариации процесса

Для риск-ориентированного подхода рекомендована (рис. 7) [11–13, 18–21] трехпараметрическая гиперболическая модель оптимального соотношения затрат для достижения приемлемых рисков: инвестиции в мониторинг несоответствий – ущерб из-за несоот-

ветствий – инвестиции в предупреждение несоответствий. Данная модель позволяет организации достигать минимальной суммарной величины при условии равенства таких параметров, как инвестиции и ущерб (см. рис. 7) [18].

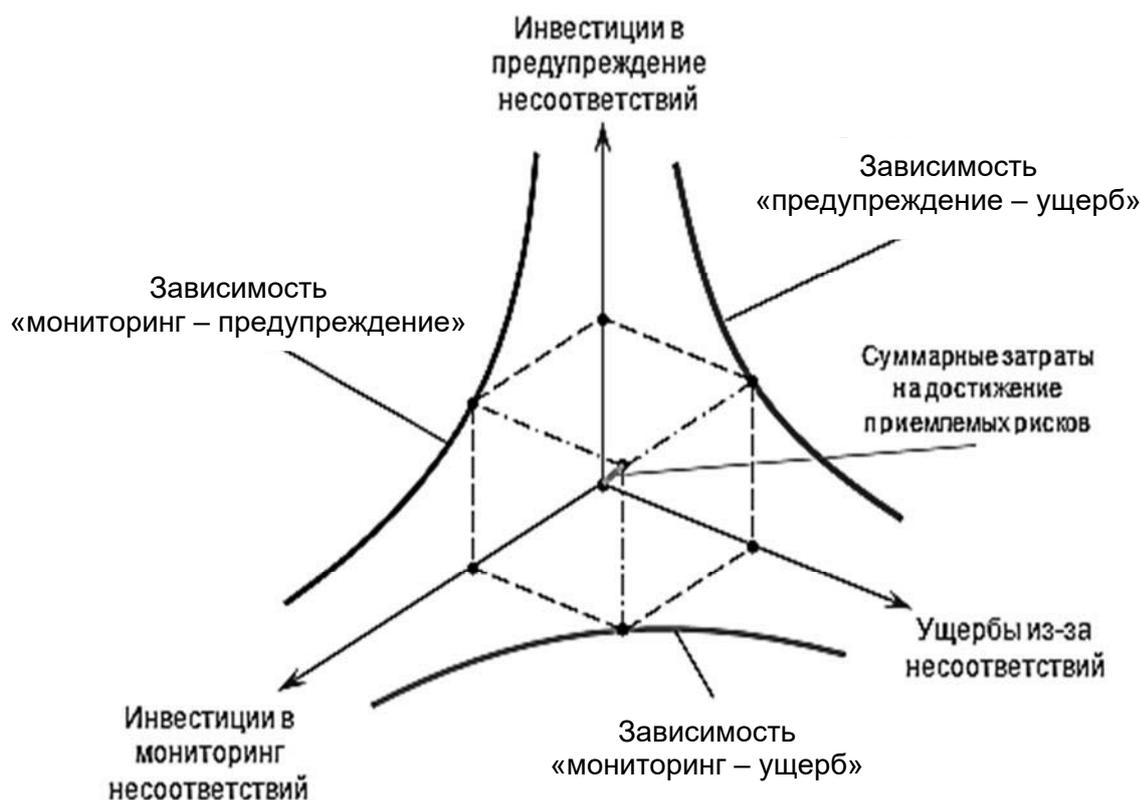


Рис. 7. Модель оптимального соотношения затрат для обеспечения соответствия продукции и процессов на основе достижения приемлемых рисков

Для законодательного, системного применения в организациях, проектирующих и производящих сложные технические системы, предложенные модели использованы при разработке стандартов на системы управления проектированием и производством мобильных машин различных типов (дорожная, карьерная, автотракторная и прочая техника) [16] и специальной техники двойного назначения [17].

Создано методическое обеспече-

ние анализа, управления и оптимизации рисков, в том числе на основе разработанных риск-ориентированных моделей, для широкого использования на практике при создании технических систем адекватных анализов рисков [19], статистических методов [18], процессов измерений [20], верификации и валидации в цепи поставок от первичных поставщиков материалов до поставщиков процессов обслуживания в эксплуатации и утилизации технических изделий [21].

### Заключение

Перспективное планирование качества продукции в настоящее время является основой для проектирования технологических процессов при риск-ориентированном подходе.

В результате можно сделать следующие выводы:

– существующая парадигма разработки технологических процессов на основе детерминированного и вероятностного подхода не соответствует требуемым потребителями вероятностям несоответствия процессов тиражирования продукции;

– развиты элементы методологии и модели для достижения соответствия продукции и процессов изготовления при проектировании технологических процессов как составной части перспективного планирования качества продукции на основе управления рисками;

– предложено при проектировании технологических процессов использовать модель оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб» при риск-ориентированном мышлении и шкалу «значимость приоритета – вероятность» для продукции/процесса;

– предложен риск-ориентированный подход к достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процесса и измерительной системы или увеличения робастности процесса;

– предложены методы и способы идентификации характеристик значимости последствий несоответствий в конструкторско-технологической документации;

– разработана модель оптимального соотношения затрат для обеспечения соответствия продукции и процессов на основе достижения приемлемых рисков;

– для законодательного, системного применения в организациях, проектирующих и производящих сложные технические системы, предложенные модели использованы при разработке стандартов на системы управления проектированием и производством мобильных машин различных типов (дорожная, карьерная, автотракторная и прочая техника) и специальной техники двойного назначения, а также для методического обеспечения управления рисками при проектировании в цепи поставок.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Под ред. В. С. Корсакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1975. – 328 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 912 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 944 с.
4. Технология машиностроения: в 2 т. Т. 1: Основы технологии машиностроения / В. М. Бурцев [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 564 с.
5. Технология машиностроения: в 2 т. Т. 2: Производство машин / В. М. Бурцев [и др.]; под ред. Г. М. Мельникова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 640 с.
6. **Якушев, А. И.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учебник для вузов / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – 6-е изд., доп. и перераб. – Москва: Машиностроение, 1986. – 352 с.
7. **Мрочек, Ж. А.** Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учебное пособие для машиностроит. спец. вузов / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 263 с.
8. Основы технологии автоматизированного производства в машиностроении: учебное пособие / Ж. А. Мрочек [и др.]. – Минск: Технопринт, 2003. – 303 с.

9. Технологическое обеспечение машиностроительного производства: учебное пособие / Ж. А. Мрочек [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочека. – Москва: ИКТИ РАН, 2013. – 462 с.
10. Основы системы менеджмента качества машиностроительного предприятия / В. И. Арбузов [и др.]. – Минск: Технопринт, 2000. – 280 с.
11. **Панов, А. Н.** Как победить в конкурентной борьбе. Гармоничная система качества – основа эффективного менеджмента организации / А. Н. Панов. – Москва: Стандарты и качество, 2003. – 272 с.
12. **Горбацевич, М. И.** Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / М. И. Горбацевич, А. Н. Панов, С. М. Минюкович; под общ. ред. А. Н. Панова. – Минск: Технопринт, 2005. – 264 с.: ил.
13. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А. Н. Панов [и др.]; под общ. ред. А. Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.
14. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности / Под общ. ред. Н. А. Махутова. – Москва: Знание, 2015. – 936 с.: ил.
15. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. – Москва: ЛЕНАНД, 2018. – 720 с.
16. **СТБ 16949–2018.** Системы менеджмента качества. Особые требования по применению СТБ ISO 9001–2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения. – Введ. 01.01.2019. – Минск: Госстандарт, 2018. – 93 с.
17. **СТБ В 15.004–2009.** Система разработки и постановки на производство оборонной продукции. Военная техника. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 01.01.2011. – Минск: Госстандарт, 2009. – 52 с.
18. **СТБ 1505–2015.** Системы менеджмента. Менеджмент процессов. Методы статистического управления процессами. – Введ. 01.06.2016. – Минск: Госстандарт, 2016. – 179 с.
19. **СТБ 1506–2015.** Системы менеджмента. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов. – Введ. 01.04.2016. – Минск: Госстандарт, 2016. – 109 с.
20. **СТБ 2450–2016.** Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем. – Введ. 01.03.2017. – Минск: Госстандарт, 2017. – 250 с.
21. **СТБ 2484–2016.** Системы менеджмента. Менеджмент верификации и валидации в цепи поставок. – Введ. 01.09.2017. – Минск: Госстандарт, 2017. – 137 с.

*Статья сдана в редакцию 3 ноября 2020 года*

**Александр Николаевич Панов**, канд. техн. наук, ООО «Юрс-Русь». E-mail: a.panov@tut.by.

**Жорж Адамович Мрочек**, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: vikt-ipf@rambler.ru.

**Виктор Михайлович Пашкевич**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

**Aleksandr Nikolayevich Panov**, PhD (Engineering), URS-Rus, Ltd. E-mail: a.panov@tut.by.

**Zhorzh Adamovich Mrochek**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: vikt-ipf@rambler.ru.

**Viktor Mikhailovich Pashkevich**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

---

УДК 621.83.06

*А. П. Прудников, А. Д. Бодунова*

## ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ ПО ПОТОКАМ В ПЛАНЕТАРНОЙ ТОРОВОЙ ВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ

---

UDC 621.83.06

*A. P. Prudnikov, A. D. Bodunova*

## JUSTIFICATION OF THE MECHANISM FOR LOAD ALIGNMENT BY FLOWS IN PLANETARY TORUS HELICAL TRANSMISSIONS

---

### **Аннотация**

Предложена конструкция механизма выравнивания нагрузки по потокам для планетарной торовой винтовой передачи. Разработана математическая модель планетарной торовой винтовой передачи для оптимизации конструкции механизма выравнивания нагрузки по потокам. На базе проведенного динамического анализа и компьютерного моделирования обоснован выбор упругих компенсирующих элементов для механизма выравнивания нагрузки.

### **Ключевые слова:**

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, полный факторный эксперимент, экспериментальные исследования, шероховатость поверхности.

### **Abstract**

The paper presents the design of a mechanism for load alignment by flows in planetary torus helical transmissions. A mathematical model for the planetary torus helical transmission has been developed to optimize the process of designing the discussed mechanism for load alignment by flows. On the basis of the performed dynamic analysis and computer modeling, the choice of elastic compensating elements for the load alignment mechanism has been justified.

### **Keywords:**

mechanical transmission, composite roller, mathematical model, dynamic analysis.

---

### **Введение**

В планетарной торовой винтовой передаче [1] нагрузка от ведущего звена к ведомому передается через составные ролики. Вследствие неточности изготовления и сборки передачи нагрузка между составными роликами распределяется неравномерно. Соответственно, чтобы уменьшить усилия, действующие на элементы передачи, необходимо снизить степень неравномерности нагрузки между составными роликами. Для этого следует разработать механизм выравнивания нагрузки по потокам.

Выполнение одного из звеньев самоустанавливающимся в радиальном направлении, как в планетарной зубчатой передаче [2, с. 185], вследствие наличия на сферических поверхностях ведущего и заторможенного звеньев планетарной торовой винтовой передачи беговых дорожек может привести к заклиниванию составных роликов и поэтому не применимо.

С целью выравнивания нагрузки между составными роликами предлагается выполнять их пальцы [1], контактирующие с беговыми дорожками передачи, самоустанавливающимися. Для

этого в отверстиях цилиндрического диска, являющегося базовым элементом составного ролика, под пальцы (рис. 1) устанавливаются упругие элементы. Предотвращение повышения трения

скольжения вследствие взаимодействия пальцев с упругими элементами обеспечивается установкой на пальцы сферических втулок, которые контактируют с беговыми дорожками.

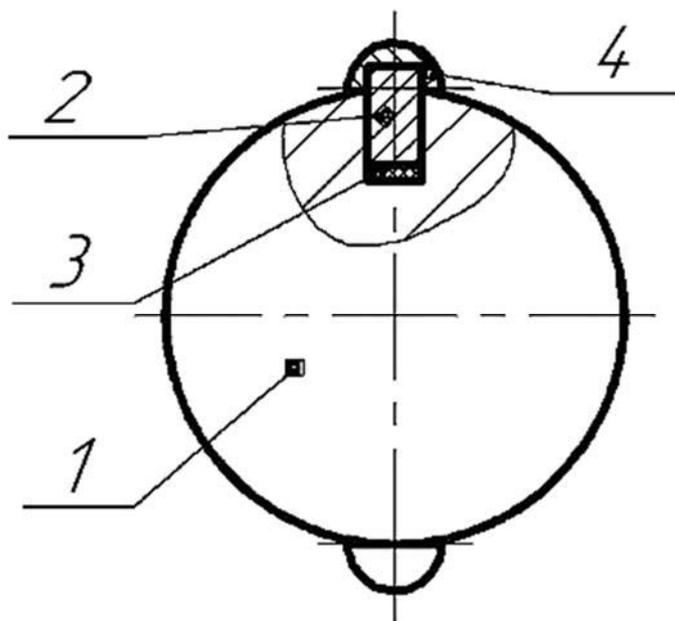


Рис. 1. Составной ролик: 1 – цилиндрический диск; 2 – палец; 3 – упругий элемент; 4 – сферическая втулка

Для описания функционирования планетарной торовой винтовой передачи и обоснования выбора материала упругих компенсирующих элементов для механизма выравнивания нагрузки по потокам разработаем математическую модель передачи и проведем на ее базе вычислительный эксперимент.

### **Разработка математической модели**

Для составления математической модели торовой винтовой передачи применен структурно-матричный метод [3, с. 145]. При составлении математической модели, представленной на рис. 2, рассматривалась система, состоящая из следующих сосредоточенных масс: 1 – ведущее звено с беговой дорожкой, представленной винтовой линией с

количеством витков  $Z_1$ ; 2 – ведомое звено с беговыми дорожками, выполненными в виде канавок количеством  $Z_3$ , представляющими собой часть винтовой линии.

Для упрощения математической модели в качестве заторможенного звена принят вал, на котором установлены составные ролики. Соответственно, вращение ведущего звена вызывает поворот составных роликов, которые, в свою очередь, вынуждают вращаться ведомое звено (см. рис. 2).

Орграф к математической модели планетарной торовой винтовой передачи представлен на рис. 3.

Упругость и податливость установленных посредством упругих компенсирующих элементов в составном ролике пальцев учитывается с помощью упругих и диссипативных элементов.

Трансформаторные элементы ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub>, добавленные в разработанную математическую модель, позволяют учесть безынерционное преобразование харак-

теристик потока энергии. Полученная на базе модели матрица инцидентий приведена в табл. 1.

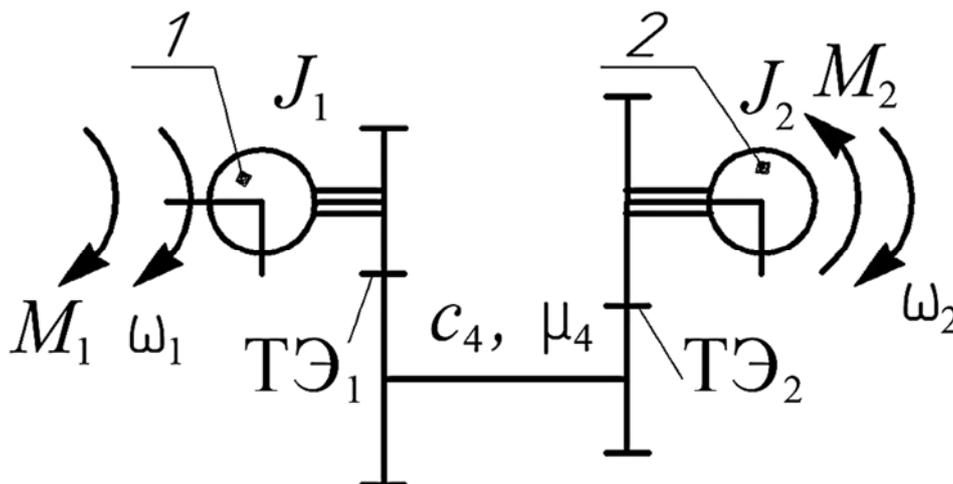


Рис. 2. Схема математической модели торовой винтовой передачи

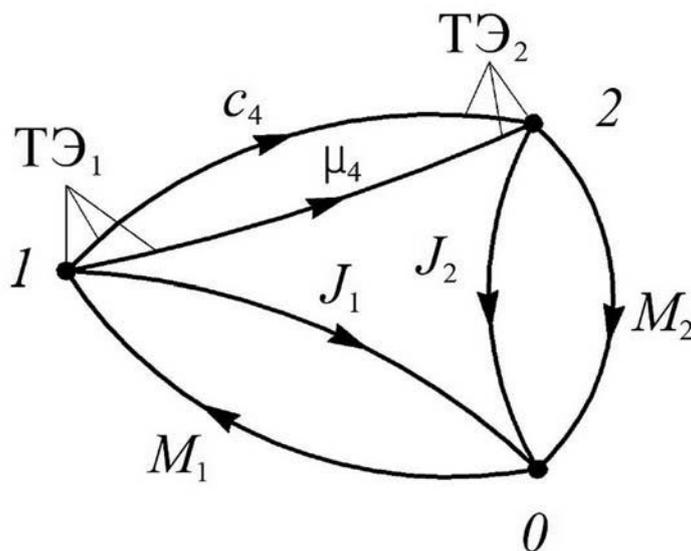


Рис. 3. Орграф к математической модели

Табл. 1. Матрица инцидентий

Узел	Ветвь					
	Инерционная		Диссипативная	Упругая	Источник потенциала	
	$J_1$	$J_2$	$\mu_4$	$c_4$	$M_1$	$M_2$
1	-1	0	-1	-1	1	0
2	0	-1	1	1	0	-1

Учитывая введенные трансформаторные элементы и матрицу инцидентий в соответствии с [3, с. 161], вывели уравнения, описывающие модель торовой винтовой передачи для проведения ее динамического анализа.

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M_1 \cdot (u_1 \cdot \eta_1) - M_{v4} - M_{д4}}{J_1}; \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{-M_2 / (u_2 \cdot \eta_2) + M_{v4} + M_{д4}}{J_2}; \quad (2)$$

$$\frac{dM_{v4}}{dt} = c_4 \cdot \left( \frac{\omega_1}{u_1} - \omega_2 \cdot u_2 \right); \quad (3)$$

$$M_{д4} = \mu_4 \cdot \left( \frac{\omega_1}{u_1} - \omega_2 \cdot u_2 \right), \quad (4)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости вращения звеньев, составляющих математическую модель, рад/с;  $M_{v4}$  – крутящий момент, приложенный к упругим элементам, Н·м;  $M_{д4}$  – крутящий момент, приложенный к диссипативным элементам, Н·м;  $J_1, J_2$  – моменты инерции звеньев, составляющих математическую модель, кг·м<sup>2</sup>;  $u_1, u_2$  – передаточные отношения между ведущим звеном и составным роликом, составным роликом и ведомым звеном соответственно;  $\eta_1, \eta_2$  – КПД в передачах мощности между ведущим звеном и составным роликом, составным роликом и ведомым звеном соответственно;  $c_4$  – угловая жесткость упругих элементов, Н·м/рад;  $\mu_4$  – коэффициент сопротивления диссипативных элементов, Н·м·с/рад.

Передаточное отношение и КПД при передаче энергии между ведущим звеном и составным роликом определяется как для клинового механизма в соответствии с [4, с. 57] по формулам

$$u_1 = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_1}; \quad (5)$$

$$\eta_1 = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}(\alpha_1 + \varphi_{np})}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1$  – угол подъема кривой, образующей беговую дорожку с количеством витков  $Z_1$ , рад;  $\varphi_{np}$  – приведенный угол трения, рад.

Передаточное отношение и КПД при передаче энергии между составным роликом и ведомым звеном определяются через передаточное отношение и КПД торовой винтовой передачи в целом [1].

При расчете угловой жесткости звена передачи, представляющего собой совокупность всех составных роликов с установленными в них упругими компенсирующими элементами, оно рассматривается как параллельное соединение упругих элементов. Соответственно, угловая жесткость упругих компенсирующих элементов определяется по формуле

$$c_4 = n_p \cdot n_{п} \cdot c_y \cdot R_c^2, \quad (7)$$

где  $n_p$  – количество пальцев в составном ролике;  $n_{п}$  – количество составных роликов;  $c_y$  – линейная жесткость упругих компенсирующих элементов, Н/м;  $R_c$  – радиус наружной поверхности цилиндрического диска, являющегося элементом составного ролика, м.

Коэффициенты сопротивления диссипативных элементов определяются посредством парциальных систем, выделяемых из динамической модели (коэффициент сопротивления  $\mu_4$  находят в соответствии с [3, формула (3.53)]).

Момент инерции для парциальной системы с упругим базовым элементом рассчитывается с учетом равенства кинетических энергий исходного и приведенного инерционных элементов аналогично найденному в [5] по формуле

$$J^* = \frac{1}{\frac{1}{J_1 \cdot u_1^2} + \frac{u_2^2}{J_2}}. \quad (8)$$

### Вычислительный эксперимент

Для обоснования материала используемых упругих компенсирующих элементов в механизме выравнивания нагрузки по потокам проанализирована разработанная математическая модель с учетом следующих исходных параметров для планетарной торовой винтовой передачи: передаточное число  $u = 20$ ; количеством составных роликов 7 (с двумя пальцами на каждом);  $Z_1 = 2$ ;  $Z_3 = 10$ ; геометрические параметры торовой поверхности, на которой образованы беговые дорожки,  $R = 33,5$  мм,  $r = 16$  мм;  $M_2 = 400$  Н·м;  $\eta = 0,86$ .

Значения угловой жесткости и коэффициентов сопротивления определены теоретически на базе усредненных величин линейной жесткости и коэффициентов аperiodичности для случаев выполнения упругих компенсирующих элементов из резины и пластмассы:

– упругие компенсирующие элементы, выполненные из резины ( $c_4 = 1,68 \cdot 10^4$  Н·м/рад,  $\mu_4 = 3,11$  Н·м·с/рад);

– упругие компенсирующие элементы, выполненные из пластмассы ( $c_4 = 2,24 \cdot 10^4$  Н·м/рад,  $\mu_4 = 3,59$  Н·м·с/рад).

Результаты получены на основе разработанной математической модели решением численными методами системы уравнений (1)–(4). На рис. 4 представлены графики изменения угловых скоростей и крутящего момента звеньев исследуемой передачи для случая применения упругих компенсирующих элементов из резины.

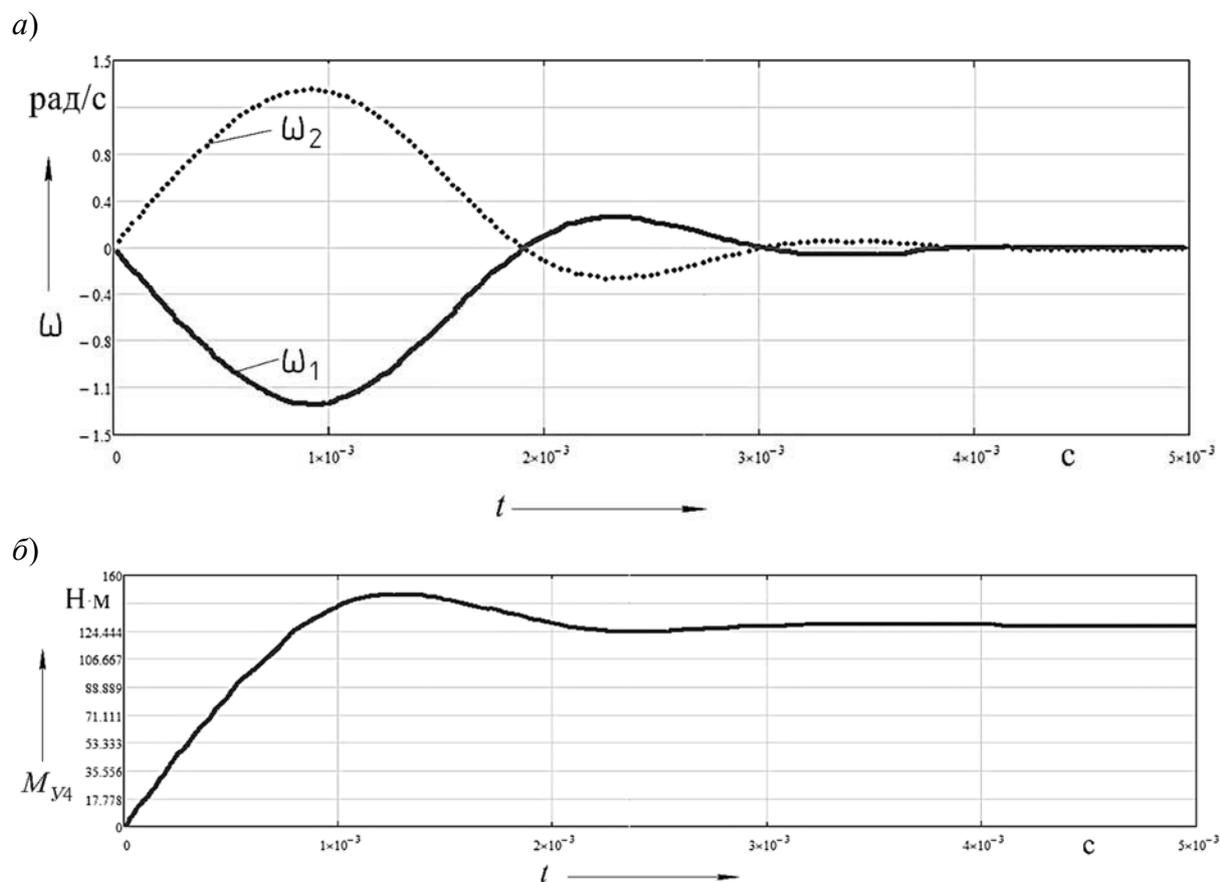


Рис. 4. Графики изменения угловых скоростей (а) и крутящего момента (б) звеньев передачи

На рис. 5 представлены графики изменения угловых скоростей и крутящего момента звеньев исследуемой

передачи для случая применения упругих компенсирующих элементов из пластмассы.

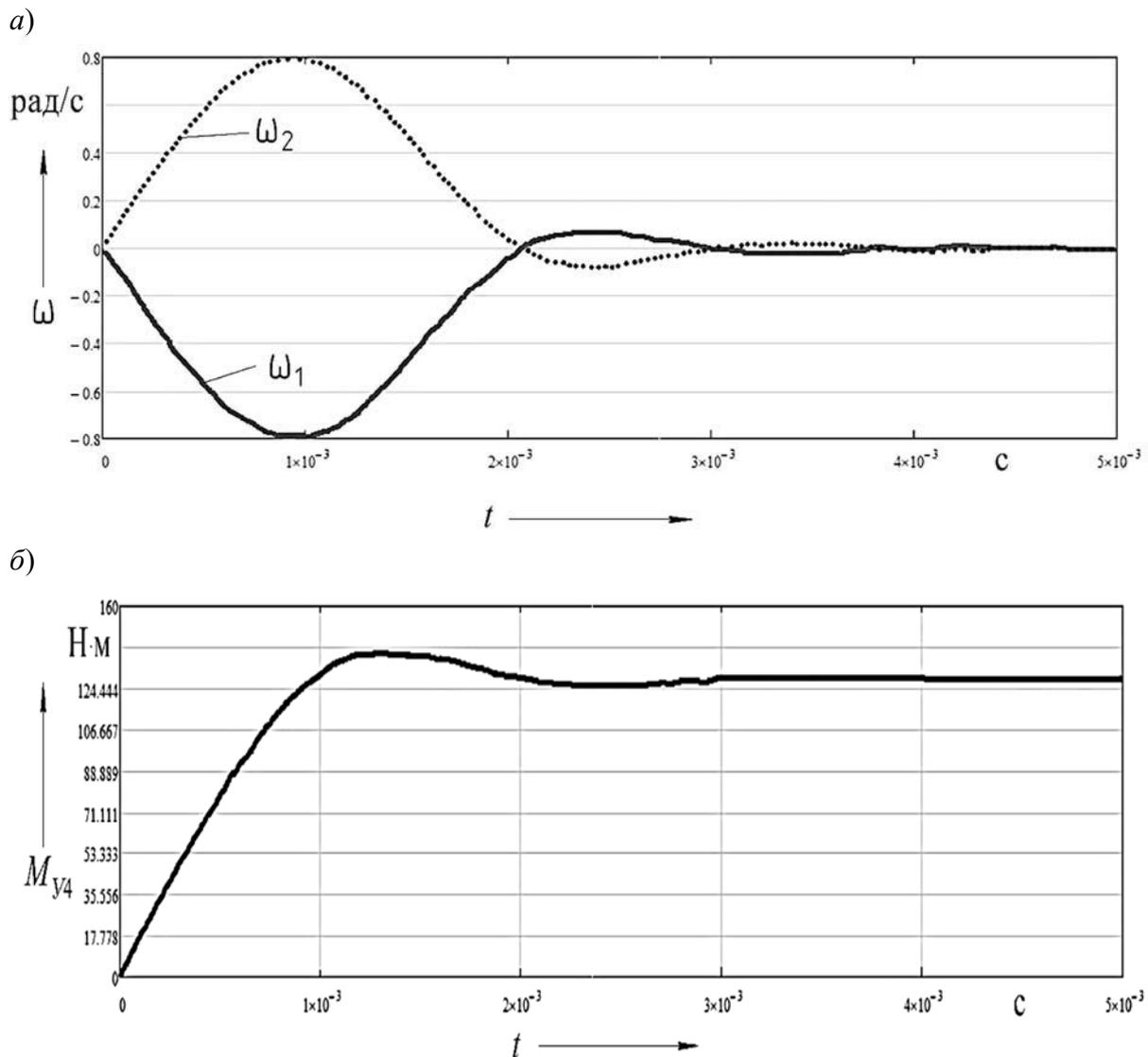


Рис. 5. Графики изменения угловых скоростей (а) и крутящего момента (б) звеньев передачи

Анализ приведенных графиков показывает, что при применении упругих компенсирующих элементов, выполненных из пластмассы, по сравнению с выполненными из резины максимальное отклонение угловых скоростей от их значений в установившемся режиме работы передачи снижается в 1,6 раза, а отклонение крутящего момента меньше на 6,7%. При этом для обоих вариантов

упругих компенсирующих элементов время перехода системы в устойчивое положение одинаково.

Механизм выравнивания нагрузки с резиновыми и пластмассовыми упругими компенсирующими элементами был исследован в САЕ-системе NX [6]. В качестве измеряемого параметра выступал крутящий момент на составном ролике. Остальные параметры принимались

аналогичными тем, что брались при анализе математической модели планетарной торовой винтовой передачи.

Для упрощения расчетной модели и сокращения затрат времени на эксперимент, как и для динамической модели, в качестве ведущего звена задавалось звено с беговой дорожкой с количеством витков  $Z_1$ , а ведомого – звено с канавками (представляющими собой часть винтовой линии) количеством  $Z_3$ . Вал с

установленными составными роликами был зафиксирован. На рис. 6 приведена разработанная 3D-модель исследуемой передачи с механизмом выравнивания нагрузки между составными роликами.

На рис. 7 представлены графики изменения крутящего момента на одном из составных роликов для случаев использования упругих компенсирующих элементов из резины (см. рис. 7, а) и пластмассы (см. рис. 7, б).

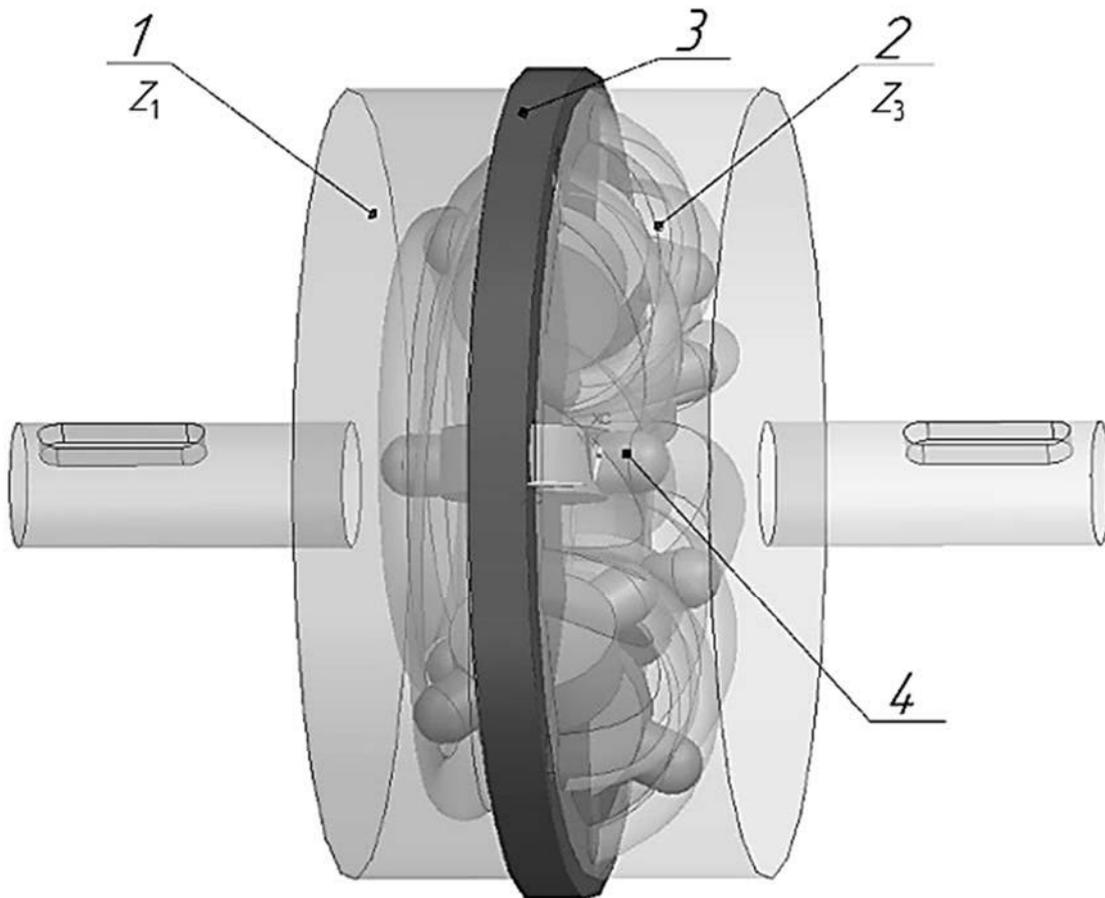


Рис. 6. 3D-модель планетарной торовой винтовой передачи: 1 – ведущее звено с беговой дорожкой, представленной винтовой линией с количеством витков  $Z_1$ ; 2 – ведомое звено с беговыми дорожками, выполненными в виде канавок количеством  $Z_3$ , представляющих собой часть винтовой линии; 3 – зафиксированное звено; 4 – составной ролик

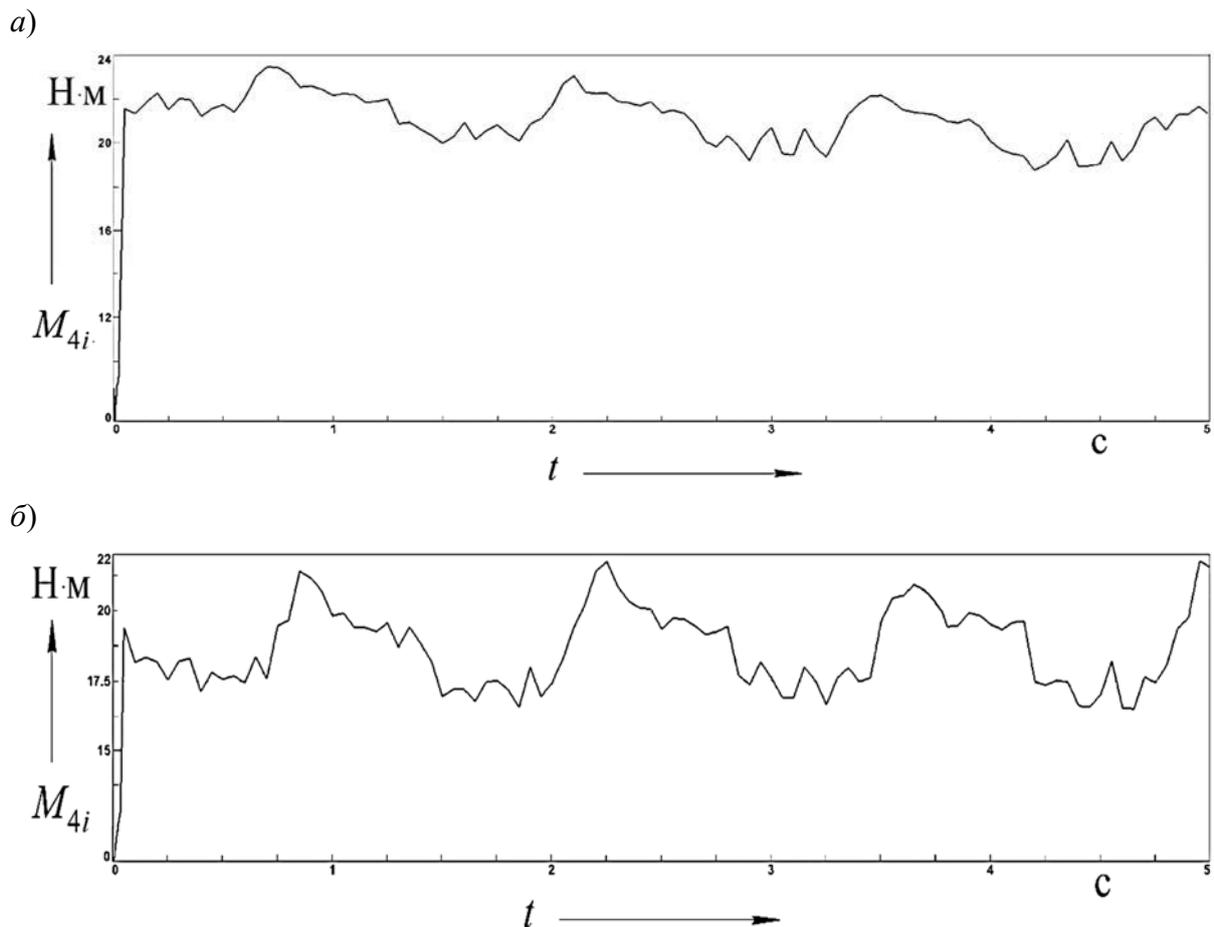


Рис. 7. Графики изменения крутящего момента на составном ролике

Анализ полученных графиков показывает, что при применении упругих компенсирующих элементов, выполненных из пластмассы, крутящий момент на составном ролике меньше на 10,3 %, чем в случае использования упругих компенсирующих элементов, выполненных из резины.

### Заключение

В рамках работы были разработаны математическая модель и алгоритм ее реализации для динамического анализа планетарной торовой винтовой передачи с целью выбора вида упругих компенсирующих элементов в механизме выравнивания нагрузки по пото-

кам. Посредством моделирования в САЕ-системе NX были проанализированы крутящие моменты, приходящиеся на один составной ролик передачи, при различном материале упругих компенсирующих элементов в механизме выравнивания нагрузки по потокам.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в механизме выравнивания нагрузки по потокам для торовой винтовой передачи наиболее целесообразно использование пластмассовых упругих компенсирующих элементов, что позволяет обеспечить большую степень выравнивания нагрузки между составными роликами и снизить ударные нагрузки при переходных процессах.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Prudnikov, A. P.** Planetary torus helical transmission / A. P. Prudnikov // International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies. – 2020. – Vol. 795. – P. 1–6.
2. **Иванов, М. Н.** Детали машин: учебник / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 16-е изд., испр. – Москва: Юрайт, 2018. – 409 с.
3. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
4. **Ансеров, М. А.** Приспособления для металлорежущих станков / М. А. Ансеров. – 4-е изд., испр. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1975. – 656 с.
5. **Прудников, А. П.** Анализ динамической модели роликовой планетарной передачи с составными сателлитами / А. П. Прудников // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4 (33). – С. 70–80.
6. **Бодунова, А. Д.** Механизм выравнивания распределения нагрузки между составными роликами в планетарной торовой винтовой передаче / А. Д. Бодунова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 56.

*Статья сдана в редакцию 6 января 2021 года*

**Александр Петрович Прудников**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: prudnikov\_a@tut.by.  
**Анастасия Дмитриевна Бодунова**, магистрант, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: bodunok.98@mail.ru.

**Aleksandr Petrovich Prudnikov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: prudnikov\_a@tut.by.  
**Anastasiya Dmitrievna Bodunova**, MSc student, Belarusian-Russian University. E-mail: bodunok.98@mail.ru.

---

---

УДК 621.31

*Д. М. Свирепа, А. С. Кручинина*

**ТОЧНОСТНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕЩЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ  
НАКАТЫВАНИЕМ**

---

---

UDC 621.31

*D. M. Svirepa, A. S. Kruchynina*

**ACCURACY CAPABILITIES OF THE COMBINED TECHNOLOGY OF CUTTING  
AND MAGNETODYNAMIC ROLLING**

---

---

**Аннотация**

Технологии обработки внутренней цилиндрической поверхности деталей с использованием совмещенных инструментов имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Совмещение двух технологических операций в одной (резания и магнитно-динамического накатывания) повышает производительность обработки, снижает себестоимость изготовления деталей, а также повышает качественные характеристики обработанной поверхности. Проведенные исследования позволяют дать рекомендации технологом при проектировании технологического процесса по расчету припуска на совмещенную обработку.

**Ключевые слова:**

совмещенная обработка, точность, припуск, накатывание.

**Abstract**

Techniques for processing an inner cylindrical surface of parts using combined tools have a number of advantages over traditional technologies. The combination of two technological operations in one (cutting and magnetodynamic rolling) increases machining efficiency, reduces manufacturing costs, and improves quality characteristics of the surface machined. The research carried out provides process engineers, who design a technological process, with the recommendations for calculating a machining allowance for combined treatment.

**Keywords:**

combined treatment, accuracy, machining allowance, rolling.

---

***Введение***

Технологии совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием позволяют достичь высоких показателей обрабатываемой поверхности, а также сократить сроки производства деталей, что обеспечивает повышение производительности и рост конкурентоспособности продукции [1–3].

Технологии отделочно-упрочняющей обработки отверстий с использова-

нием магнитно-динамических систем для разгона деформирующих элементов, наряду с классическими способами обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей, имеют ряд преимуществ, таких как достижение высоких качественных характеристик поверхностного слоя обрабатываемых заготовок за счет увеличения долговечности, износостойкости, коррозионной стойкости изделия при минимальных временных затратах [4–12]. Целью данных исследований является определение

точностных возможностей технологии совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием.

**Технология совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы**

Технология обработки обеспечивает совмещение двух технологических операций чистового растачивания и магнитно-динамического накатывания в одну, что повышает производительность и эффективность обработки,

а также сокращает технологическое время на обработку, позволяет производить обработку отверстий деталей от 40 мм и выше [12–21].

Процесс обработки объединяет расточную и отделочно-упрочняющую операции, выполняемые за счет расточного и магнитно-динамического модулей, соосно установленных на оправку *1* друг за другом.

На рис. 1 представлена схема обработки детали инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием.

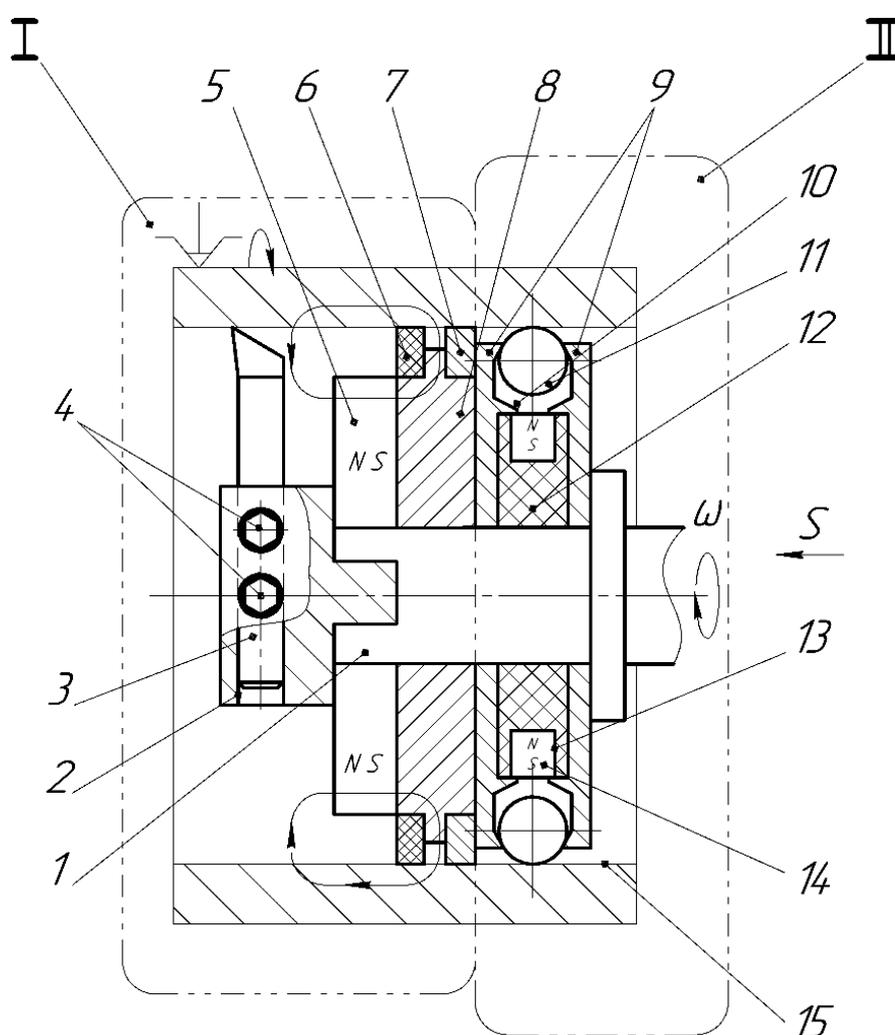


Рис. 1. Схема совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы: I – расточной модуль; II – магнитно-динамический модуль; 1 – оправка; 2 – радиальное цилиндрическое отверстие; 3 – резец; 4 – поджимные винты; 5 – кольцевой постоянный магнит; 6 – металлическая щетка; 7 – фетровая втулка; 8 – втулка; 9 – диски; 10 – кольцевая камера; 11 – деформирующие шары; 12 – обойма; 13 – радиальные отверстия; 14 – цилиндрические магниты; 15 – обрабатываемая поверхность

Расточной модуль I, в свою очередь, имеет радиальное цилиндрическое отверстие 2 под установку резца для чистовой обработки 3, фиксация которого происходит за счет поджимных винтов 4, служащих для предотвращения поворота резца 3 во время растачивания. Удаление частиц образуемой после расточной операции стружки происходит с помощью кольцевого постоянного магнита 5, металлической щетки 6, а фетровая втулка также способствует нанесению смазки. Для размещения элементов очистки от стружки (металлической щетки 6 и фетровой втулки 7) используется втулка 8.

Магнитно-динамический модуль II состоит из двух немагнитопроводных дисков 9, образующих кольцевую камеру 10, со свободно размещающимися в ней деформирующими шарами 11, обоймы 12, выполненной из немагнитопроводного материала, в радиальных отверстиях 13 которой размещают основные источники постоянного магнитного поля – цилиндрические магниты 14. Радиальное расположение постоянных цилиндрических магнитов 14 в обойме 12 магнитной системы повышает динамику деформирующих шаров и способствует аксиальному колебательному движению, что позволяет осуществлять высокочастотное ударное воздействие на обрабатываемую поверхность 15, повышая ее эксплуатационные свойства. В патроне станка токарной группы фиксируется оправка 1, на которой соосно установлены оба модуля.

Для более эффективного процесса модифицирования поверхностного слоя магнитно-динамическим модулем II рекомендуется сообщить дополнительную скорость вращения обрабатываемой детали, совпадающей со скоростью вращения совмещенного инструмента, что позволит значительно снизить скорость вращения расточного модуля I и увеличить его стойкость.

Оправка инструмента для совмещенной обработки устанавливается в револьверную головку. Расточной модуль

подводится к обрабатываемой поверхности. Настройка инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием производится исходя из припуска на чистовую обработку  $t$ . Оправка получает вращение со скоростью от 251 до 703 м/мин. Заготовка, установленная в патроне станка, получает вращение в попутном направлении со скоростью от 0 до 450 м/мин, тем самым обеспечивая увеличение стойкости резца. Осевая подача находится в диапазоне 0,02...0,16 мм/об; 22,4...256 мм/мин.

Расточной модуль I снимает припуск на чистовую обработку  $t$ , при этом кольцевой постоянный магнит предотвращает попадание стружки в зону деформирования, металлическая щетка дополнительно очищает обработанную поверхность, а фетровая втулка создает лучшие условия для осуществления магнитно-динамической обработки.

Магнитно-динамический модуль II, в свою очередь, благодаря конструкции магнитной системы осуществляет магнитно-динамическую обработку за счет воздействия магнитных сил постоянных цилиндрических магнитов (индукция магнитного поля на торцевой поверхности источников магнитного поля 0,45 Тл) на деформирующие шары, свободно располагающиеся в кольцевой камере и тем самым создающие на обработанной поверхности детали модифицированный поверхностный слой.

***Исследование точностных  
возможностей совмещенной  
обработки резанием  
и магнитно-динамическим  
накатыванием***

Обеспечение заданной чертежом точности является главным требованием при изготовлении ответственных деталей машин. При определении точностных возможностей технологии совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием ис-

пользовался расчетно-статистический метод с учетом достоинств вероятностно-статистического и расчетно-аналитического методов расчета точности механической обработки.

Для проведения экспериментальных исследований партия заготовок (штуков) составила 80 шт.

Характеристики заготовок:

- размеры ( $D \times d \times l$ ) –  $120 \times 99,6 \times 50$  мм;
- материал обрабатываемых заготовок – сталь 20 (180...200 НВ);
- шероховатость поверхности отверстия – Ra 10,4...11,7 мкм.

Для последующей обработки партию заготовок разделили на две части по 40 шт.

Обе партии заготовок обрабатывались на станке HAAS ST-20Y.

Первая партия заготовок растачивалась инструментом, оснащенным только резцовым модулем, магнитно-динамический модуль инструмента снимался.

Вторая партия заготовок обрабатывалась инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием (оснащенным расточным и магнитно-динамическим модулями).

Режимы обработки двух партий одинаковы:

- суммарная скорость резания – 252,4 м/мин (скорость вращения шпинделя – 250 м/мин, скорость вращения привода револьверной головки – 502,4 м/мин);

- осевая подача инструмента  $S = 20$  мм/мин;

- глубина резания  $t_{рез} = 0,2$  мм;

- количество рабочих ходов инструмента – 1;

- смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Измерения полученного диаметрального размера обработанных деталей проводились с использованием индикаторного нутромера с ценой деления 0,001 мм (ГОСТ 9244–75).

Предварительно настройка станка осуществлялась на настроечный размер заготовок (средний размер поля допуска). Партии заготовок последовательно обрабатывались на станке, затем проводилась группировка с учетом полученных диаметральных размеров, рассчитывались средний размер  $X_{i,cp}$  каждого соответствующего интервала и частота повторения размеров. Данные результатов эксперимента сведены в табл. 1.

Результаты экспериментов после совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием второй партии заготовок представлены в табл. 2.

Табл. 1. Сводная таблица полученных результатов после обработки первой партии заготовок

Интервал	Верхняя граница $X_{min}$	Нижняя граница $X_{min} + C$	Средний размер интервала $X_{i,cp}$	Количество деталей $n_i$	Частота $n_i/N$ ( $\omega$ )
1	100	100,01	100,005	1	0,025
2	100,01	100,02	100,015	2	0,05
3	100,02	100,03	100,025	4	0,1
4	100,03	100,04	100,035	7	0,175
5	100,04	100,05	100,045	11	0,275
6	100,05	100,06	100,055	6	0,15
7	100,06	100,07	100,065	5	0,125
8	100,07	100,08	100,075	3	0,075
9	100,08	100,09	100,085	1	0,025
				40	1

Табл. 2. Сводная таблица полученных результатов после обработки второй партии заготовок

Интервал	Верхняя граница $X_{\min}$	Нижняя граница $X_{\min}+C$	Средний размер интервала $X_{i\text{cp}}$	Количество деталей $n_i$	Частота $n_i/N (\omega)$
1	100,016	100,026	100,021	1	0,025
2	100,026	100,036	100,031	3	0,075
3	100,036	100,046	100,041	6	0,15
4	100,046	100,056	100,051	8	0,2
5	100,056	100,066	100,061	11	0,275
6	100,066	100,076	100,071	6	0,15
7	100,076	100,086	100,081	4	0,1
8	100,086	100,096	100,091	1	0,025
9	100,096	100,106	100,101	0	0
				40	1

По результатам исследований был построен график зависимости частоты

повторения  $\omega$  от плотности распределения диаметральных размеров  $X$  (рис. 2).

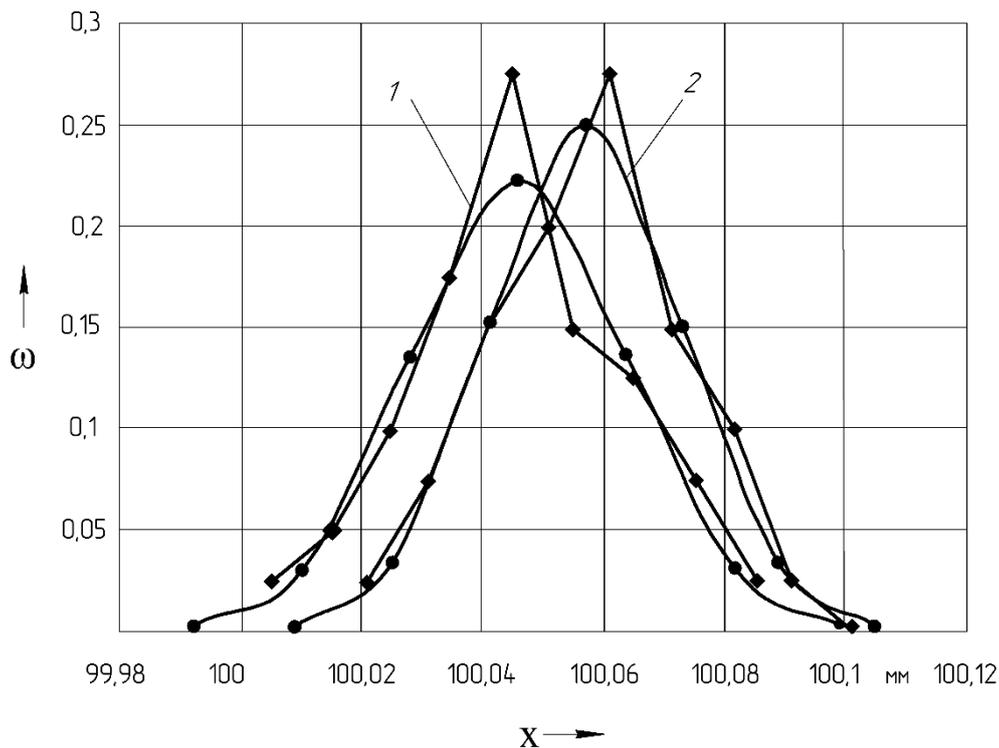


Рис. 2. Зависимость частоты повторения  $\omega$  от плотности распределения диаметральных размеров  $X$ : 1 – кривые распределения диаметрального размера после растачивания; 2 – кривые распределения диаметрального размера после совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием; • – теоретические кривые; ♦ – эмпирические кривые

Для проверки адекватности гипотезы о нормальности распределения использовали критерии Пирсона и Колмогорова, которые составили  $\chi^2_{\text{набл}} = 1,27$ ;  $\lambda_{\text{набл}} = 0,317$ . Критерии согласия Пирсона и Колмогорова для обработки второй партии деталей составили  $\chi^2_{\text{набл}} = 0,7$ ;  $\lambda_{\text{набл}} = 0,17$ . Так как наблюдаемые критерии  $\chi^2_{\text{набл}}$  и  $\lambda_{\text{набл}}$  меньше критических значений, нет оснований отвергать гипотезу о нормальном распределении.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что после обработки деталей полученные диаметральные размеры подчиняются закону нормального распределения Гаусса, а также после обработки совмещенным инструментом обрабо-

танные детали находятся в пределах поля допуска. Наблюдается незначительное сужение суммарного поля допуска в пределах 12...15 %.

### **Изменение исходного размера детали при совмещенной обработке резанием и магнитно-динамическим накатыванием**

После проведения экспериментальных исследований был построен график изменения шероховатости после чистового растачивания и совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением источников магнитного поля (рис. 3).

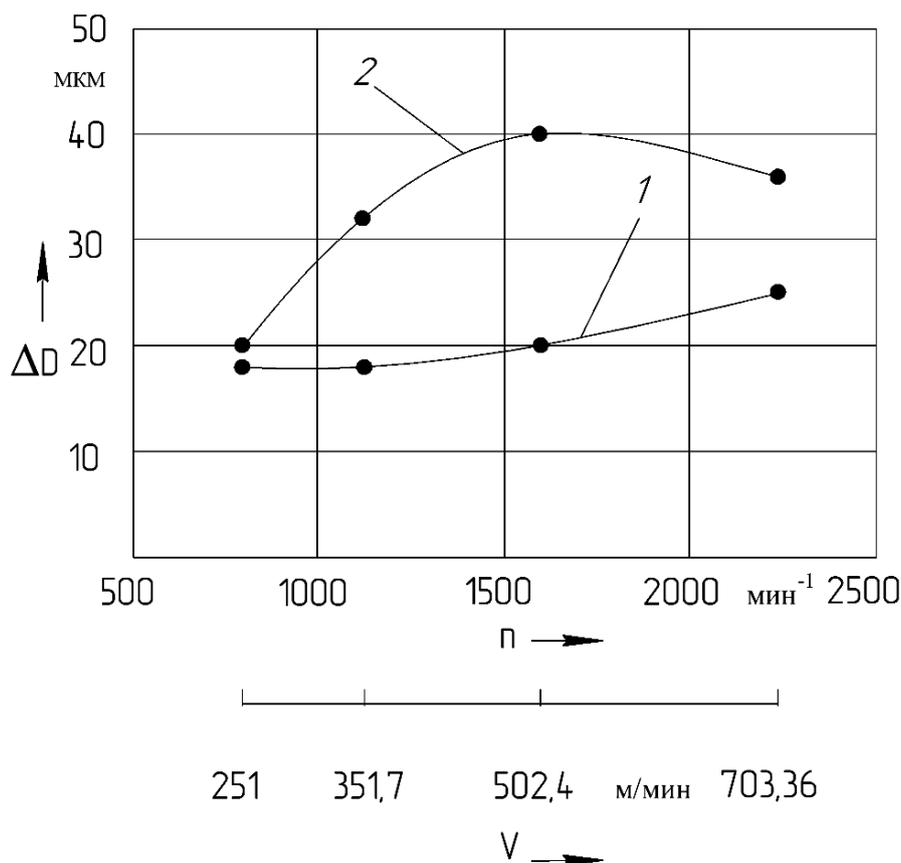


Рис. 3. Зависимость изменения исходного размера детали от скорости вращения инструмента: 1 – чистовое растачивание стали 20 (180...200 НВ); 2 – обработка инструментом для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием с радиальным расположением магнитной системы стали 20 (180...200 НВ)

Согласно графику, изменение исходного размера детали при совмещенной обработке резанием и магнитно-динамическим накатыванием составляет 18...20 мкм относительно графика обработки при чистовом растачивании. На основании построенного графика можно дать рекомендации по выбору припуска на обработку.

### **Заключение**

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что после совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием

наблюдается незначительное сужение суммарного поля допуска диаметрального размера в пределах 12...15 %.

Проведенные исследования показывают, что изменение исходного размера детали при совмещенной обработке резанием и магнитно-динамическим накатыванием равняется сумме двух величин: величине удаляемого припуска резцовым модулем и величине припуска под магнитно-динамическое накатывание – 18...20 мкм, что позволяет дать рекомендации технологам при проектировании технологического процесса по расчету припуска на совмещенную обработку.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Чистосердов, П. С.** Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск: Беларусь, 1977. – 124 с.
2. **Чистосердов, П. С.** Комбинированные инструменты для совмещения процессов резания и поверхностно-пластического деформирования / П. С. Чистосердов. – Москва: НИИМаш, 1975. – 45 с.
3. **Алексеев, П. Г.** Технология упрочнения деталей машин поверхностной пластической деформацией: учебное пособие / П. Г. Алексеев. – Брянск: Брянский ин-т транспортного машиностроения, 1978. – 80 с.
4. **Довгалец, А. М.** Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.
5. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. ВУ 17976 / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 28.02.2014.
6. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. ВУ 11536 / А. М. Довгалец, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 28.02.2009.
7. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалец [и др.] // Вест. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.
8. Упрочняющий инструмент: пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 28.02.2012.
9. **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.
10. Высокопроизводительное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности цилиндров / Д. М. Свирепа [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 51.
11. **Довгалец, А. М.** Влияние технологических и конструктивных параметров процесса магнитно-динамического раскатывания на шероховатость поверхности / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 21–25.
12. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали: пат. ВУ 19139 / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 30.04.2015.
13. **Свирепа, Д. М.** Конструкции инструментов для совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием магнитно-динамическими раскатниками / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова, С. А. Сухоцкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 38–47.
14. **Свирепа, Д. М.** Влияние способов совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием на шероховатость поверхности / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 34–43.

15. **Сви́репа, Д. М.** Совмещенная обработка резанием и магнитно-динамическим накатыванием / Д. М. Сви́репа, А. С. Семёнова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 48–49.
16. **Сви́репа, Д. М.** Особенности конструирования комбинированного магнитно-динамического раскатника / Д. М. Сви́репа, А. С. Семёнова // *Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития: материалы Юбилейной междунар. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 132.
17. **Сви́репа, Д. М.** Конструктивные особенности инструментов для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием / Д. М. Сви́репа, А. С. Кручинина // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 62.
18. **Сви́репа, Д. М.** Моделирование взаимодействия деформирующего элемента с деталью в процессе магнитно-динамического раскатывания / Д. М. Сви́репа, Ю. С. Романович, А. С. Кручинина // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 63.
19. **Сви́репа, Д. М.** Технология совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим накатыванием / Д. М. Сви́репа, А. С. Кручинина // *Современные проблемы машиностроения: материалы науч.-техн. конф.* – Томск: Томский политехн. ун-т, 2020. – С. 136–137.
20. **Сви́репа, Д. М.** 3D-моделирование магнитно-динамических инструментов в образовательном процессе / Д. М. Сви́репа, А. С. Семёнова // *Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* – Новосибирск: Новосибирский гос. архитектурно-строительный ун-т (Сибстрин); Брестский гос. техн. ун-т, 2019. – С. 233–237.
21. **Сви́репа, Д. М.** Применение магнитно-динамических инструментов в производственной и образовательной деятельности / Д. М. Сви́репа, С. А. Сухоцкий, А. С. Семёнова // *Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 58–59.

*Статья сдана в редакцию 5 февраля 2021 года*

**Дмитрий Михайлович Сви́репа**, канд. техн. наук, доц. Белорусско-Российский университет. E-mail: svdima@tut.by.

**Анна Сергеевна Кручинина**, ассистент, Белорусско-Российский университет. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

**Dzmitry Mikhailovich Svirepa**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: svdima@tut.by.

**Hanna Sergeevna Kruchynina**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

---

УДК 629.3

*В. П. Тарасик, О. В. Пузанова*

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА**

---

UDC 629.3

*V. P. Tarasik, O. V. Puzanova*

**PROCEDURE FOR DETERMINING MAIN PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF A HYBRID QUARRY DUMP TRUCK**

---

**Аннотация**

Предложена методика определения энергетических параметров гибридного карьерного самосвала и оценки эффективности его работы в карьерных условиях. Приведены результаты моделирования процесса движения самосвала в двух карьерах, существенно различающихся параметрами дорожных условий – глубиной и крутизной уклонов. Представлены графики изменения вращающего момента электродвигателя, тягового усилия ведущих колес, скорости и ускорения движения груженого самосвала на различных участках маршрута при подъеме из карьера, а также графики нарастания затрачиваемой тяговыми электродвигателями энергии по пути перемещения. Исследован режим спуска снаряженного самосвала в карьер, его потенциальной энергии и энергии электродинамического торможения самосвала, оценена возможность ее накопления и последующего использования на подъеме из карьера.

**Ключевые слова:**

гибридный автомобиль, карьерный самосвал, дизельный двигатель, электрогенератор, тяговый электродвигатель, электромеханическая трансмиссия, электромотор-колесо, электродинамическое торможение, накопитель электрической энергии.

**Abstract**

A procedure is proposed for determining energy parameters of a hybrid quarry dump truck and evaluating the efficiency of its operation in quarries. The results of modeling the process of dump truck motion in the two open pits are presented, the quarries having significantly different parameters of road conditions, such as the depth and steepness of their slopes. The graphs are given which show the changes in electric motor torque, tractive force of the driving wheels, speed and acceleration during a loaded dump truck's motion along different sections of its travel route when driving upwards in the open pit, as well as the graphs showing the increase in energy spent by the electric traction motors along the path of travel. The mode of a dump truck's driving down into the quarry has been investigated, as well as its potential energy and the energy of its electrodynamic braking, and the possibility of accumulation of energy and its subsequent use while driving upwards from the quarry has been evaluated.

**Keywords:**

hybrid vehicle, quarry dump truck, diesel engine, electric generator, electric traction motor, electromechanical transmission, electric motor wheel, electrodynamic braking, electric energy storage system.

---

Карьерные самосвалы работают в сложных дорожных условиях. При вывозе груза из карьера самосвал преодолевает крутые затяжные подъемы. Устойчивость движения и производительность самосвала в значительной ме-

ре зависят от выбора источника энергии и механизмов преобразования потока энергии при передаче ее к движителям.

На большинстве существующих карьерных самосвалов большой и особо большой грузоподъемности в качестве

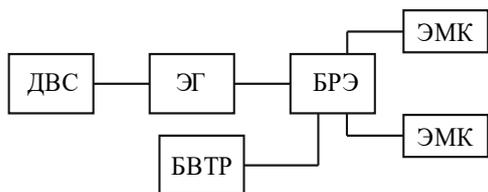
источника энергии используют дизельный двигатель в блоке с электрическим генератором. Преобразование параметров потока электрической энергии генератора при передаче ее к двигателям осуществляется посредством электромотор-колес. Последние представляют собой сочетание тяговых электродвигателей с механическими зубчатыми планетарными редукторами, расположенными непосредственно в ведущих колесах. В результате достигается высокая компактность конструкции автомобиля.

Дизель-электрический источник энергии характеризуется стабильным установившимся режимом работы дизеля с высокой топливной экономичностью. При этом снижается токсичность отработавших газов и повышается ресурс дизеля.

Электромеханическая трансмиссия позволяет осуществлять непрерывный подвод энергии к ведущим колесам на тяговом режиме в процессе преодоления подъемов при выезде из карьера и плавное электродинамическое торможение самосвала на спуске в карьер, что способствует стабилизации сцепления колес с опорной поверхностью, обеспечивает устойчивое управляемое движение на виражах и сохранение работоспособности фрикционных тормозных механизмов, которые в данном случае используются в качестве запасных.

Структурная схема рассмотренной комбинации объектов источника энергии и преобразователей потока энергии представлена на рис. 1, а.

а)



б)

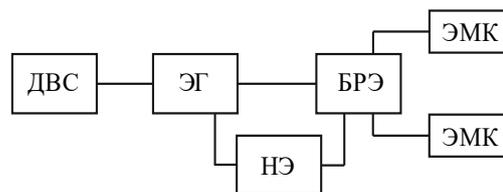


Рис. 1. Структурные схемы карьерного самосвала

Основные компоненты этой схемы: дизельный двигатель ДВС; электрогенератор ЭГ; блок распределения и управления потоком электрической энергии БРЭ, поступающей к электромотор-колесам ЭМК. Блок БРЭ также выполняет функции дифференциала, обеспечивая получение одинаковых вращающих моментов на левом и правом ведущих колесах.

Важным положительным свойством рассматриваемой схемы является обеспечение электродинамического торможения автомобиля. На спуске самосвала в карьер его потенциальная энергия положения преобразуется в электрическую энергию торможения,

генерируемую тяговыми электродвигателями и направляемую через БРЭ в блок вентилируемых терморезисторов БВТР, обдуваемых направленным потоком атмосферного воздуха, создаваемого вентиляторной установкой во время торможения. Энергия торможения проходит по цепочке ЭМК – БРЭ – БВТР – воздушная среда. В результате энергия торможения не используется для выполнения полезной работы, а рассеивается в окружающей воздушной среде. Это, безусловно, недостаток данной схемы. Для обеспечения возможности использования энергии электродинамического торможения необходим накопитель энергии. Структурная схема само-

свала с накопителем электроэнергии приведена на рис. 1, б.

Автомобили, в которых в качестве источника энергии используют сочетание ДВС и накопителя электрической энергии, называют автомобилями с *комбинированным источником энергии* (КИЭ) или *гибридными автомобилями*.

### Цель исследования

Разработка методики определения энергетических параметров и характеристик движения гибридного карьерного самосвала, оценка эффективности его работы в карьерных условиях.

### Методика исследования

Рассмотрим вначале определение энергетических параметров автомобиля с источником энергии в составе ДВС–ЭГ согласно структурной схеме на рис. 1, а. Максимальная расчетная мощность ДВС  $P_{ev}$  определяется из условия обеспечения движения автомобиля с заданной максимальной скоростью  $v_{max}$  на горизонтальном участке дороги с твердым покрытием:

$$P_{ev} = \frac{m_a g f_v + k_w A_d v_{max}^2}{(1 - k_{в.о}) \eta_{\text{ЭГ}} \eta_{\text{ЭД}} \eta_{\text{ред}}} v_{max}, \quad (1)$$

где  $m_a$  – полная масса автомобиля, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $f_v$  – коэффициент сопротивления качению при  $v_{max}$  [1];  $k_w$  – коэффициент сопротивления воздуха,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$ ;  $A_d$  – лобовая площадь автомобиля,  $\text{м}^2$ ;  $v_{max}$  – максимальная

скорость, м/с;  $k_{в.о}$  – коэффициент отбора энергии на привод вспомогательного оборудования ДВС и механизмов управления автомобилем;  $\eta_{\text{ЭГ}}$  – КПД генератора электрической энергии;  $\eta_{\text{ЭД}}$  – КПД тягового электродвигателя;  $\eta_{\text{ред}}$  – КПД редуктора ЭМК.

Мощность тягового электродвигателя находится по формуле

$$P_{\text{ЭДв}} = \frac{P_{ev}(1 - k_{в.о})\eta_{\text{ЭГ}}}{N_{\text{ЭД}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{ЭДв}}$  – мощность тягового электродвигателя, Вт;  $N_{\text{ЭД}}$  – количество тяговых электродвигателей, устанавливаемых на проектируемый автомобиль.

Количество тяговых электродвигателей  $N_{\text{ЭД}}$  соответствует количеству ведущих колес.

В соответствии с полученным значением  $P_{\text{ЭДв}}$  подбирается подходящий тяговый электродвигатель из каталога выпускаемых электротехнической промышленностью либо на основе анализа аналогов проектируемого самосвала и выписываются его основные параметры: номинальные значения мощности  $P_{\text{ЭД,ном}}$  и частоты вращения  $n_{\text{ЭД,ном}}$ ; максимальный допускаемый вращающий момент электродвигателя  $M_{\text{ЭД,мах}}$  и соответствующая ему частота вращения  $n_{\text{ЭД,мин}}$ .

Характеристики вращающего момента  $M_{\text{ЭД}} = f(n_{\text{ЭД}})$  и мощности  $P_{\text{ЭД}} = f(n_{\text{ЭД}})$  тягового электродвигателя вычисляются на основе выражений

$$M_{\text{ЭД}} = \begin{cases} M_{\text{ЭД,мах}} & \text{при } 0 \leq n_{\text{ЭД}} \leq n_{\text{ЭД,мин}}; \\ \frac{30P_{\text{ЭД,ном}}}{\pi n_{\text{ЭД}}} & \text{при } n_{\text{ЭД,мин}} < n_{\text{ЭД}} \leq n_{\text{ЭД,мах}}; \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{\text{эд}} = M_{\text{эд}} \pi n_{\text{эд}} / 30, \quad (4)$$

где  $n_{\text{эд}}$  – частота вращения вала тягового электродвигателя, рад/с.

Мощность  $P_{\text{эд}}$  по формуле (4) получается в ваттах.

Передаточное число редуктора электромотор-колес  $u_{\text{ред}}$  найдем из условия движения самосвала со скоростью  $v_{\text{max}}$  при  $n_{\text{эд.ном}}$ :

$$u_{\text{ред}} = \frac{\pi n_{\text{эд.ном}} r_{\text{к0}}}{30 v_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где  $r_{\text{к0}}$  – радиус качения колес, м.

Характеристики суммарной силы тяги  $F_{\text{T}} = f(v)$ , развиваемой на осях ведущих колес, динамического фактора  $D = f(v)$  и ускорения самосвала  $a = f(v)$  определим по формулам

$$F_{\text{T}} = M_{\text{эд}} N_{\text{эд}} \eta_{\text{эд}} u_{\text{ред}} \eta_{\text{ред}} / r_{\text{к0}}; \quad (6)$$

$$D = \frac{F_{\text{T}} - k_w A_{\text{л}} v^2}{m_a g}; \quad (7)$$

$$a = (D - f_v) g / \delta_{\text{п.м}}, \quad (8)$$

где  $\delta_{\text{п.м}}$  – коэффициент приведенной массы, учитывающий влияние вращающихся масс – ведущих колес, редукторов и тяговых электродвигателей электромотор-колес – на величину кинетической энергии автомобиля [1].

Для моделирования движения самосвала в карьере используем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{F_{\text{T}} - m_a g \psi - k_w A_{\text{л}} v^2}{\delta_{\text{п.м}} m_a}; \\ \frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dW_{\text{эд}}}{dt} &= \frac{M_{\text{эд}} N_{\text{эд}} u_{\text{ред}} v}{r_{\text{к0}}}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\psi$  – коэффициент суммарного дорожного сопротивления,  $\psi = f_a + h$ ;  $f_a$  – коэффициент сопротивления качению, вычисляемый с учетом зависимости его от скорости [1];  $h$  – продольный уклон дороги;  $W_{\text{эд}}$  – изменение во времени затраты энергии тяговыми электродвигателями в процессе движения самосвала в карьере на подъеме, Дж.

При моделировании используется информация о параметрах характеристики маршрута движения самосвала в карьере – длины участков  $L_{yчi}$  и уклоны  $h_i$  на каждом  $i$ -м участке.

### Результаты исследования

Используем предлагаемую методику для определения энергетических параметров и моделирования движения самосвала в карьерных условиях. Определим величину энергии электродинамического торможения на спуске и оценим эффективность использования ее при движении на подъеме.

Примем при исследовании следующие параметры характеристик карьерного самосвала: грузоподъемность  $m_{\text{гр}} = 90$  т; полная масса  $m_a = 164000$  кг; снаряженная масса  $m_0 = 74000$  кг; максимальная скорость  $v_{\text{max}} = 60$  км/ч; радиус качения колес  $r_{\text{к0}} = 1,231$  м; лобовая площадь  $A_{\text{л}} = 26,4$  м<sup>2</sup>; коэффициент сопротивления воздуха  $k_w = 0,7$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>; коэффициент сопротивления качению при малой скорости  $f_0 = 0,02$ . Самосвал двухосный с задним ведущим мостом. Следовательно, будут использованы два электромотор-колеса  $N_{\text{эд}} = 2$ .

Необходимую мощность ДВС определим по формуле (1), принимая  $k_{\text{во}} = 0,1$ ;  $\eta_{\text{эг}} = 0,95$ ;  $\eta_{\text{эд}} = 0,96$ ;  $\eta_{\text{ред}} = 0,95$ . При заданном  $v_{\text{max}} = 0,0226$ . В результате получаем

$P_{ev} = 905,5$  кВт. Затем по формуле (2) находим  $P_{эдв} = 387,1$  кВт.

Выбираем асинхронный тяговый электродвигатель переменного тока с параметрами:  $P_{эд.ном} = 380$  кВт;  $M_{эд.ном} = 907,2$  Н·м при частоте вращения  $n_{эд.ном} = 4000$  об/мин;  $M_{эд max} = 9071,8$  Н·м при  $n_{эд min} = 400$  об/мин.

Принимая  $P_{эдв} = P_{эд.ном}$ , по формуле (2) скорректируем величину расчетной мощности дизеля  $P_{ev} = 889$  кВт.

На рис. 2, а приведены характеристики тягового электродвигателя  $P_{эд} = f(n_{эд})$ ,  $M_{эд} = f(n_{эд})$ , а на рис. 2, б – тяговая характеристика самосвала  $F_T = f(v)$ .

Динамическая характеристика самосвала  $D = f(v)$  представлена на рис. 3, а, а на рис. 3, б – потенциальная характеристика ускорения  $a = f(v)$ . Характеристика  $D = f(v)$  отвечает требованиям ГОСТ Р 52280–2004, согласно которому  $D_{max} = \psi_{max} \geq 0,25$ .

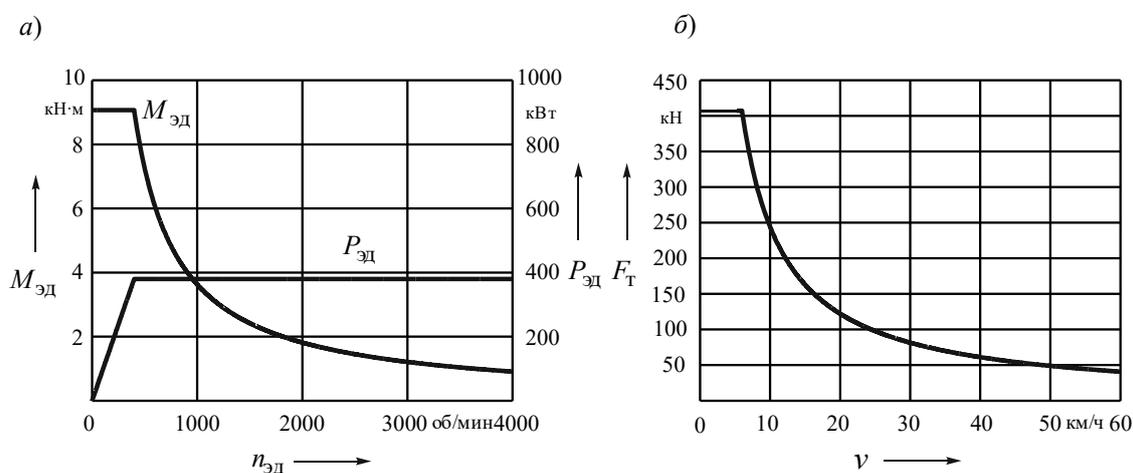


Рис. 2. Характеристики электродвигателя (а) и тяговая характеристика самосвала (б)

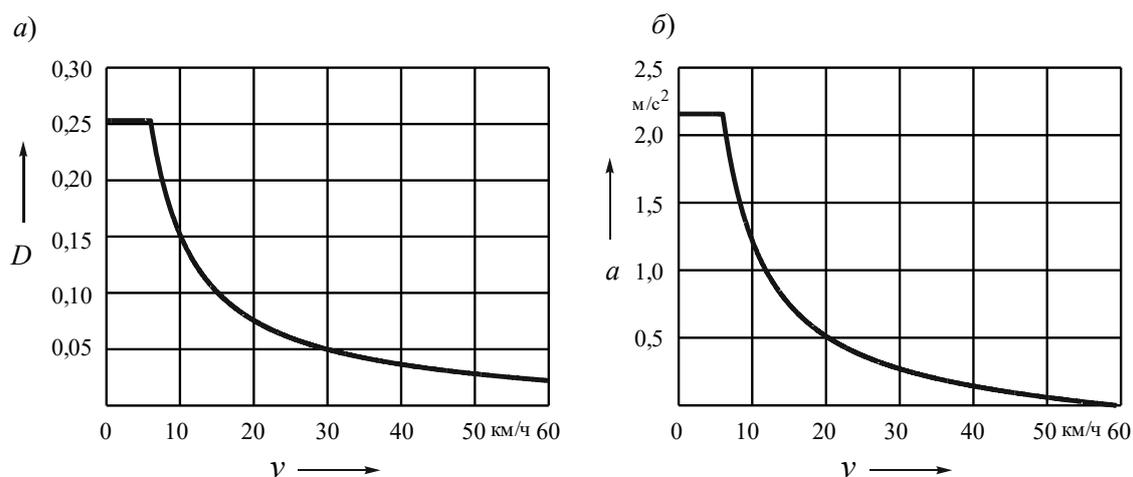


Рис. 3. Динамическая характеристика самосвала (а) и потенциальная характеристика ускорения (б)

Моделировали движение самосвала в двух карьерах, существенно различающихся между собой характеристиками дорожных условий. В табл. 1 приведены параметры характеристики

ки маршрута движения в карьере «Ерунаковский» (г. Новокузнецк, Кемеровская обл., РФ), а в табл. 2 – в карьере «Гранит» (г. п. Микашевичи, Брестская обл., РБ).

Табл. 1. Параметры характеристик карьера «Ерунаковский»

Длина участка, м	57,1	100,9	24,5	84,9	88,6	28,1	110,2	21,6	89,5	33,2	91,4	144,2	31,7	44,1
Уклон, %	0,2	7,9	10,0	10,5	11,6	6,8	3,6	5,0	3,1	6,6	7,3	3,6	7,8	3,0

Табл. 2. Параметры характеристик карьера «Гранит»

Длина участка, м	50	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50
Уклон, %	4,5	4,9	3,2	0,9	0,1	0,2	5,7	5,2	0,1	0,2	6,5	6,7	3,2	2,8

На рис. 4, а представлены графики изменения скорости движения самосвала на подъеме во времени  $v = f(t)$ , а на рис. 4, б – по перемещению  $v = f(s)$ , полученные в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений (9). Сплошными линиями здесь и на всех последующих графиках показаны характеристики, полученные при моделировании для карьера «Ерунаковский», а штриховыми – для карьера «Гранит». Длины маршрутов этих карьеров немного различаются, поэтому

для однозначности сравниваемых результатов использовалась длина пути в обоих случаях  $L_{\text{ПУТ}} = 940$  м. Время проезда маршрута в первом варианте карьера составило 187 с, а во втором – 121 с. Как видно из полученных графиков, скорость движения самосвала существенно зависит от уклонов участков маршрута  $h_i$ , что отражается на затратах энергии двигателей при преодолении подъемов.

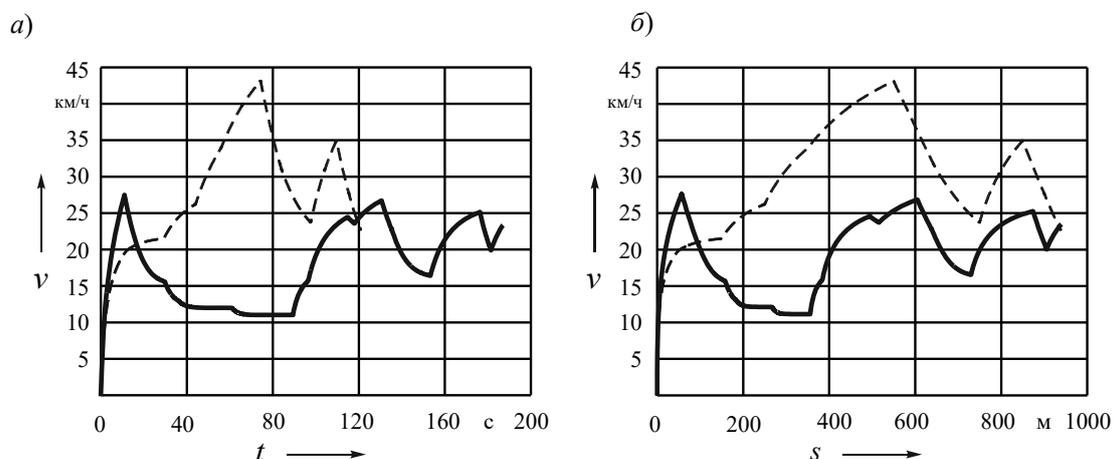


Рис. 4. Изменение скорости движения самосвала на подъеме во времени (а) и по перемещению (б)

Графики продольных уклонов участков маршрутов моделируемых карьеров приведены на рис. 5. Они дают наглядное представление об условиях работы самосвала в этих карьерах.

На рис. 6 представлены графики изменения вращающих моментов тяго-

вых электродвигателей при движении на подъеме  $M_{эд} = f(s)$ , на рис. 7 – изменения суммарной силы тяги ведущих колес  $F_T = f(s)$ , а на рис. 8 – ускорения самосвала  $a = f(s)$  в зависимости от перемещения  $s$  на маршруте.

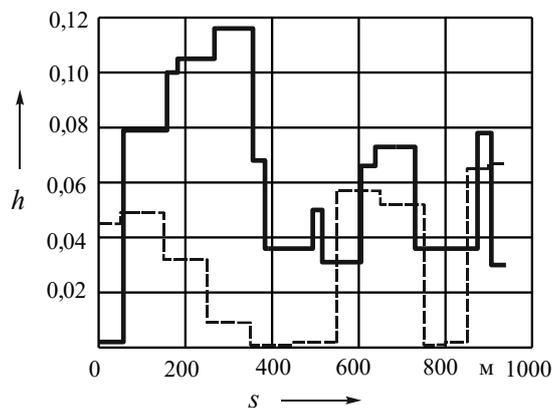


Рис. 5. Графики уклонов дороги в карьерах «Ерунаковский» и «Гранит»

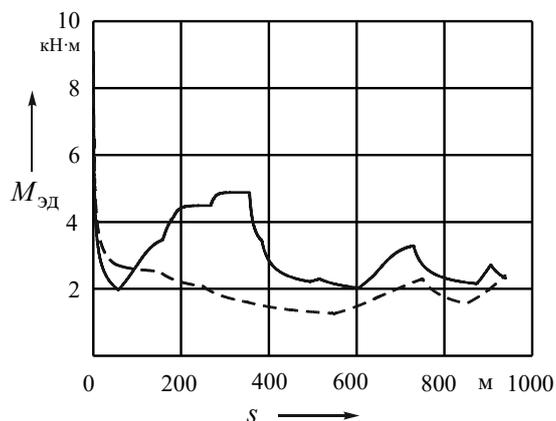


Рис. 6. Вращающие моменты тяговых электродвигателей при движении на подъеме

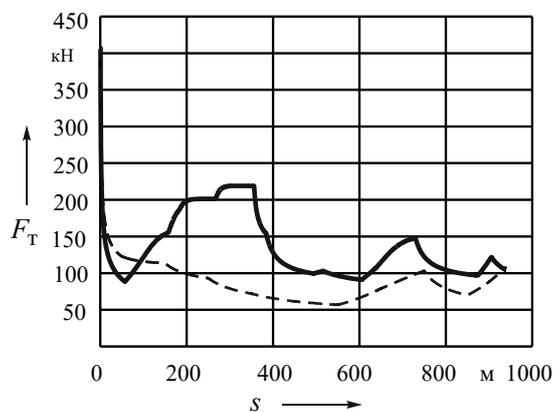


Рис. 7. Сила тяги ведущих колес самосвала при движении на подъеме

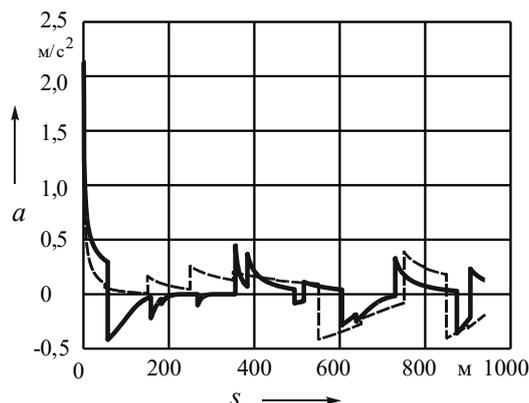


Рис. 8. Ускорение самосвала при движении на подъеме

Графики, отображающие нарастание затраты энергии тяговых электродвигателей при движении самосвала на подъеме  $W_{эд} = f(s)$ , представлены на рис. 9. Из этих графиков следует, что при использовании самосвала в глубоком карьере с крутыми затяжными подъемами (сплошная линия) затраты энергии на выезд его с грузом из

карьера может быть существенно больше, чем в неглубоких карьерах со сравнительно небольшими уклонами (штриховая линия). Так, в сравниваемых примерах соотношение затрат энергии на подъем из карьера при одинаковой длине маршрута составило величину 1,55.

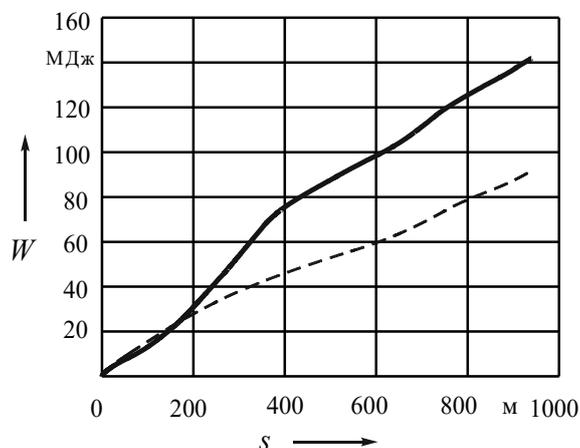


Рис. 9. Нарастание затраты энергии тяговых электродвигателей при движении самосвала на подъеме

Рассмотрим движение самосвала на спуске в карьер. Это движение выполняется с примерно постоянной скоростью, обеспечивающей безопасные условия, устойчивость и управляемость. Для этого осуществляется управляемое

электродинамическое торможение самосвала посредством перевода тяговых электродвигателей в генераторный режим. Вырабатываемая ими электроэнергия может быть использована в дальнейшем на режиме подъема из карьера.

Для этого самосвал должен быть оборудован накопителем энергии, как показано на рис. 1, б. При движении на спуске ДВС выключают, что дает возможность снизить загрязнение воздушной среды карьера отработавшими газами и уменьшить расход топлива дизельного двигателя. Спуск снаряженного самосвала в карьер обычно совершают с постоянной скоростью  $v_{\text{спуск}} = 40$  км/ч.

Оценим величину генерируемой энергии электродинамического торможения и эффективность ее использования при движении самосвала на подъеме из карьера. При этом необходимо определить полную потенциальную энергию  $E_{\text{п}}$ , обусловленную изменением высоты положения на всем протяжении спуска снаряженного самосвала в карьер. На каждом участке маршрута движения величина снижения высоты положения самосвала  $H_i$  (м) вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} H_i &= L_{\text{уч}i} \sin \alpha_i \approx \\ &\approx L_{\text{уч}i} \operatorname{tg} \alpha_i = L_{\text{уч}i} h_i, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $f_a^*$  – коэффициент сопротивления качению при скорости спуска самосвала  $v_a^*$ , м/с.

При реальных значениях уклонов карьерных дорог можно принять  $\cos \alpha_i = 1$ . Тогда суммарная затрата энергии на преодоление сопротивления качению и сопротивления воздуха

$$W_{\text{сопр}} = (m_0 g f_a^* + k_w A_{\text{л}} (v_a^*)^2) L_{\text{пут}}, \quad (14)$$

где  $L_{\text{пут}}$  – полная длина пути спуска в карьере, м.

Величину накопленной энергии на спуске  $W_{\text{нак}}$ , которая поступит в нако-

где  $L_{\text{уч}i}$  – длина  $i$ -го участка маршрута движения в карьере, м;  $\alpha_i$  – угол продольного уклона  $i$ -го участка, град;  $h_i$  – продольный уклон,  $h_i = \operatorname{tg} \alpha_i$ .

Изменение потенциальной энергии  $E_{\text{п}i}$  снаряженной массы самосвала  $m_0$  на  $i$ -м участке маршрута

$$E_{\text{п}i} = m_0 g H_i. \quad (11)$$

Полная величина потенциальной энергии на спуске в карьер  $E_{\text{п}}$ , Дж:

$$E_{\text{п}} = m_0 g \sum_{i=1}^N H_i, \quad (12)$$

где  $N$  – количество участков маршрута с отличающимися продольными уклонами  $h_i$ .

Часть потенциальной энергии  $E_{\text{п}i}$  на каждом участке спуска будет затрачена на преодоление сопротивления качению и сопротивления воздуха. Ее величину  $W_{\text{сопр}i}$  вычислим по формуле

$$W_{\text{сопр}i} = (m_0 g f_a^* \cos \alpha_i + k_w A_{\text{л}} (v_a^*)^2) L_{\text{уч}i}, \quad (13)$$

питель и может быть использована в дальнейшем при преодолении подъема, найдем по формуле

$$W_{\text{нак}} = (E_{\text{п}} - W_{\text{сопр}}) \eta_{\text{эдт}} \eta_{\text{ред}}, \quad (15)$$

где  $\eta_{\text{эдт}}$  – КПД тягового электродвигателя на режиме генерирования энергии торможения и передачи ее в накопитель (принят равным 0,95).

В результате моделирования получены следующие значения исследуемых параметров потоков энергии:

– для карьера «Ерунаковский»:  $E_{\text{п}} = 41604$  кДж;  $W_{\text{сопр}} = 16755$  кДж;  $W_{\text{нак}} = 22190$  кДж; затрата энергии тя-

говыми электродвигателями на преодоление подъема составила  $W_{эд} = 141800$  кДж;

– для карьера «Гранит»:  $E_{п} = 23375$  кДж;  $W_{сопр} = 18519$  кДж;  $W_{нак} = 4336,7$  кДж;  $W_{эд} = 91600$  кДж.

Эффективность использования накопленной энергии спуска оценим посредством соответствующего коэффициента

$$k_{эф} = \frac{W_{нак}}{W_{эд}}. \quad (16)$$

Для карьера «Ерунаковский» коэффициент эффективности накопления энергии спуска  $k_{эф} = 0,156 = 15,6$  %, а для карьера «Гранит»  $k_{эф} = 0,047 = 4,7$  %. Очевидно, что существенную величину энергии на спуске можно накопить только в глубоких карьерах с крутыми и протяженными уклонами дороги. В карьерах с максимальными уклонами, не превышающими 4...5 %, эффективность накопления энергии на спуске весьма незначительна.

В [2] отмечено, что для самосвалов БелАЗ масса накопителя электроэнергии НЭ не превышает массы блока вентилируемых тормозных терморезисторов БВТР (см. рис. 1). Следовательно, при использовании накопителя энергии снаряженная масса самосвала не изменится и коэффициент удельной грузоподъемности его останется прежний.

На самосвалах с накопителями электроэнергии, предназначенных для глубоких карьеров, очевидно, можно использовать ДВС меньшей мощности, компенсируя ее снижение использованием накапливаемой на спусках в карьере энергией электродинамического торможения. Оценим результат на примере карьера «Ерунаковский». Величину снижения мощности ДВС вычислим по формуле

$$\Delta P_e = \frac{W_{нак} \eta_{НЭ}}{(1 - k_{в.о}) \eta_{эг} t_{п}}, \quad (17)$$

где  $\eta_{НЭ}$  – КПД накопителя энергии при его разрядке с учетом потерь в конвертере в процессе потребления накопленной электроэнергии;  $t_{п}$  – время преодоления подъема при движении в карьере (в исследуемом примере  $t_{п} = 187$  с).

Принимая  $\eta_{НЭ} = 0,92$ , получаем  $\Delta P_e = 127,7$  кВт, что составляет 14,36 % исходного значения мощности  $P_{ев}$ . В результате искомая сниженная мощность дизеля будет  $P_e^* = 761,2$  кВт.

Применение двигателя меньшей мощности позволяет снизить расход топлива и объем выбросов отработавших газов. Величину снижения расхода топлива за один цикл подъема самосвала из карьера найдем из выражения

$$\Delta Q_{ц} = g_e \Delta P_e t_{п} / 3600, \quad (18)$$

где  $g_e$  – удельный расход топлива двигателя.

Удельный расход топлива дизельных двигателей, применяемых на карьерных самосвалах, в среднем составляет  $g_e = 208$  г/(кВт·ч). В результате получаем  $\Delta Q_{ц} = 1,380$  кг. Экономия топлива за 1 ч работы составит  $\Delta Q_{ч} = 3600 \Delta Q_{ц} / t_{п} = 26,557$  кг.

Возможен иной вариант использования накопленной энергии электродинамического торможения самосвала на спуске в карьере. Суммируя энергию, поступающую от дизеля, с энергией накопителя, можно обеспечить увеличение скорости движения самосвала на подъеме из карьера и повышение его производительности. Мощность источника энергии, используемой тяговыми электродвигателями в этом случае,

$$P_{эд}^* = P_{эд.ном} (1 + k_{эф} \eta_{НЭ}). \quad (19)$$

Для карьера «Ерунаковский»  
 $P_{эд}^* = 434,5$  кВт.

Подставим в выражение (3) вместо  $P_{эд,ном}$  значение  $P_{эд}^*$  и определим с учетом этого функцию момента тягового электродвигателя  $M_{эд} = f(n_{эд})$ , а затем по формуле (6) – силу тяги самосвала  $F_T = f(n_{эд})$ . Используя функции  $M_{эд} = f(n_{эд})$  и  $F_T = f(n_{эд})$  при инте-

грировании системы дифференциальных уравнений (9), получим графики процесса движения самосвала с гибридным источником энергии на подъеме при выезде из карьера.

На рис. 10 представлены графики изменения скорости самосвала во времени (а) и по перемещению (б), а на рис. 11, а и б – соответствующие им графики ускорения самосвала.

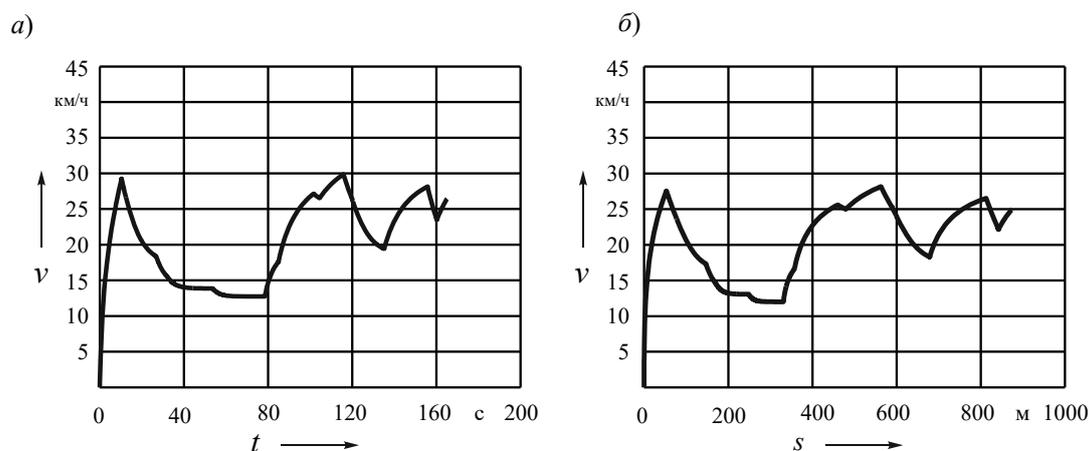


Рис. 10. Изменение скорости самосвала с гибридным источником энергии во времени (а) и по перемещению (б)

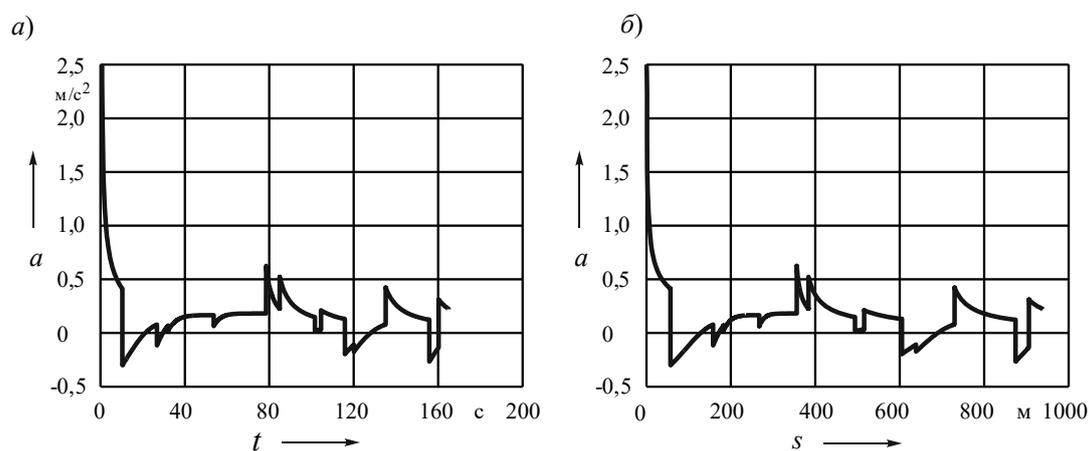


Рис. 11. Изменение ускорения самосвала с гибридным источником энергии

Сравнивая эти графики с аналогичными им графиками самосвала без накопителя энергии, приведенными соответственно на рис. 4 и 8, можно констатировать, что гибридный самосвал

позволяет при прочих равных условиях обеспечить более высокую скорость движения, а следовательно, и производительность. Так, в приведенном примере время преодоления маршрута

подъема в карьере составило 165,1 с, что в 1,133 раза меньше, чем у противопоставляемого варианта, что свидетельствует о преимуществах гибридного источника энергии.

В [3] отмечается, что электропривод на грузовых автомобилях будет постепенно вытеснять гибридный привод. В частности, шведская фирма Volvo Trucks выпускает грузовые электромобили полной массой 16 и 27 т. Однако гибридная техника по-прежнему будет востребована в горнодобывающей отрасли, где необходима высокая энергоемкость источников энергии и производительность машин, а также на дорожных и строительных машинах.

### *Заключение*

1. Разработана методика определения энергетических параметров и характеристик движения гибридного карьерного самосвала. Предложены формулы определения необходимой мощности тяговых электродвигателей и двигателя внутреннего сгорания. Приведены математические модели движения самосвала на подъеме из карьера с грузом и на спуске в карьер с использова-

нием электродинамического торможения для поддержания заданной постоянной скорости спуска.

2. Рассмотрена модель оценки потенциальной энергии положения снаряженного автомобиля, накопления электроэнергии в процессе спуска в карьер и последующего ее использования на подъеме из карьера.

3. Показано, что накопление существенной величины энергии и ее реальное эффективное использование на этапе подъема возможно лишь при работе самосвала в глубоких карьерах с крутыми затяжными подъемами при уклонах порядка 10...12 % и более. В карьерах с уклонами не выше 4...5 % величина накапливаемой энергии электродинамического торможения незначительна и эффективность ее использования низкая.

4. Накопленную потенциальную энергию в процессе спуска в карьер можно использовать либо для применения ДВС меньшей расчетной мощности, что позволяет уменьшить расход топлива и снизить загазованность карьера, либо для повышения скорости движения на подъеме и производительности самосвала.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
2. Повышение энергетических параметров карьерных самосвалов. Методические основы выбора накопителя энергии / С. Н. Поддубко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2014. – Вып. 3. – С. 74–76.
3. **Калинин, М. А.** Перспективные тренды коммерческого транспорта / М. А. Калинин // Грузовик. – 2020. – № 10. – С. 37–40.

*Статья сдана в редакцию 26 января 2021 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Ольга Владимировна Пузанова**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-634-57-04.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Olga Vladimirovna Puzanova**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-29-634-57-04.

---

---

УДК 621:787

*В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко*

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО  
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ  
ПОВЕРХНОСТИ**

---

---

UDC 621:787

*V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, I. A. Taradeiko*

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF COMBINED MAGNETODYNAMIC  
ROLLING ON SURFACE ROUGHNESS**

---

---

**Аннотация**

Приведены результаты исследований зависимости шероховатости обработанной поверхности от основных технологических и конструктивных параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания, необходимые технологам и инженерным работникам при назначении рациональных режимов упрочняющей обработки.

**Ключевые слова:**

магнитное поле, деформирующие шары, отделочно-упрочняющая обработка, накатывание, шероховатость поверхности, наноструктурированный поверхностный слой, эксплуатационные свойства.

**Abstract**

The paper presents the results of investigating the relationship between the roughness of the surface treated and the main technological and design parameters of the process of combined magnetodynamic rolling, which technologists and engineers need to select rational modes of strengthening treatment.

**Keywords:**

magnetic field, deforming balls, finishing and strengthening treatment, rolling, surface roughness, nanostructured surface layer, performance properties.

---

**Введение**

Для машиностроения важной технологической задачей является разработка и применение инновационных методов отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих повышение эффективности процесса упрочнения поверхностей ответственных деталей машин, характеристик упрочнения их поверхностного слоя и эксплуатационных свойств [1, 2].

Большой научный и практический интерес представляет разработанный в Белорусско-Российском университете метод совмещенного магнитно-динами-

ческого накатывания (СМДН) внутренних цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, в соответствии с которым на поверхностный слой одновременно воздействуют вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,05...1,20 Тл и колеблющимися деформирующими шарами, свободно расположенными в кольцевой камере, получающими энергию для многократного импульсно-ударного деформирования от периодически действующего магнитного поля комбинированного инструмента. Указанный метод позволяет получать на деталях пар трения

поверхностные структуры с новыми физико-механическими свойствами [3, 4]. Метод СМДН обеспечивает интенсивное снижение исходной шероховатости поверхности по параметру Ra с 6,3...0,40 до 0,6...0,05 мкм, повышение точности геометрической формы поперечного сечения нежестких деталей, получение на поверхности ферромагнитной детали модифицированного антифрикционного слоя глубиной 10...25 мкм и наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5...3,0 мкм, повышение износостойкости поверхностей ферромагнитных деталей более чем в 3 раза [5–10].

Однако имеющиеся в настоящее время в литературных источниках сведения о совмещенном магнитно-динамическом накатывании указывают на необходимость проведения дальнейших исследований по определению технологических возможностей разработанного метода.

*Постановка задачи.* В связи с технической новизной метода СМДН и отсутствием исследований его технологических возможностей важно оценить влияние параметров процесса совмещенного упрочнения на шероховатость обработанной поверхности, являющейся комплексной характеристикой качества поверхностного слоя и во многом определяющей его эксплуатационные свойства. Полученные результаты исследований шероховатости поверхности ферромагнитных деталей при обработке СМДН позволят технологам назначать рациональные режимы и будут способствовать внедрению процесса совмещенного упрочнения в производство.

### **Основная часть**

Шероховатость упрочненных поверхностей заготовок по параметру Ra измеряли на профилометре-профилографе SurfTest SJ-210 фирмы Mitutoyo (Япония). Погрешность измерения не превышала 5 %. Для исключения систе-

матической составляющей погрешности измерения производили регулирование профилометра-профилографа с помощью образцов шероховатости. Измерение шероховатости поверхности заготовок выполняли при одной настройке прибора и температуре окружающей среды 20...22 °С. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений. На каждом из исследуемых режимов СМДН обрабатывали пять заготовок.

Упрочнение внутренней поверхности ферромагнитных заготовок осуществляли на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400. В качестве инструмента использовали специальный комбинированный раскатник.

*Характеристики обрабатываемых заготовок.* В качестве обрабатываемых заготовок использовали кольца из стали 45, 40X и серого чугуна СЧ 20 с размерами ( $D \times d \times l$ ) – 125 × 110 × 12 мм.

*Параметры комбинированного инструмента:*

- диаметр деформирующих шаров – 12 мм;
- материал деформирующих шаров – ШХ15 (62...65 HRC);
- материал цилиндрических постоянных магнитов Nd Fe B;
- размер цилиндрических постоянных магнитов ( $D \times h$ ) – 15 × 5 мм;
- количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары, – 22 шт.;
- количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых нежестких колец, – 32 шт.;
- материал магнитопроводов – сталь Ст 3.

Отверстия стальных и чугунных заготовок различной твердости предварительно обрабатывали в размер Ø110H8 следующими технологическими методами с обеспечением соответствующей шероховатости по параметру Ra:

– *расточиванием* ( $Ra$  5,8...6,0 и 3,0...3,2 мкм) – сталь 45 (190...200 НВ), сталь 40Х (180...190 НВ), сталь 45 (30...35 HRC), серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ);

– *расточиванием* ( $Ra$  2,0...2,2 мкм) – сталь 45 (190...200 НВ), серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ);

– *расточиванием* ( $Ra$  1,0...1,2 мкм) – сталь 45 (20...25 HRC), сталь 40Х (25...28 HRC);

– *шлифованием* ( $Ra$  0,63...0,60 мкм) – сталь 45 (30...35 НВ), сталь 40Х (28...30 HRC);

– *хонингованием* ( $Ra$  0,40...0,35 мкм) – сталь 45 (30...35 HRC), серый чугун СЧ 20 (25...30 HRC).

Режимы процесса СМДН:

– частота вращения инструмента – 1600...4500 мин<sup>-1</sup> (окружная скорость инструмента – 552,6...1554,3 м/мин);

– осевая подача инструмента – 20...160 мм/мин;

– индукция вращающегося магнитного поля, действующего на

упрочняющую поверхность заготовки, – 0,130 Тл;

– индукция магнитной системы инструмента – 0,350 Тл;

– количество рабочих ходов инструмента – один;

– охлаждение – масло индустриальное 45.

### **Исследование шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента**

Результаты экспериментальных исследований зависимости шероховатости упрочненных заготовок от частоты вращения комбинированного инструмента при СМДН внутренних цилиндрических поверхностей ферромагнитных заготовок из различных материалов, полученных растачиванием и имеющих соответствующую исходную шероховатость, представлены на рис. 1–3.

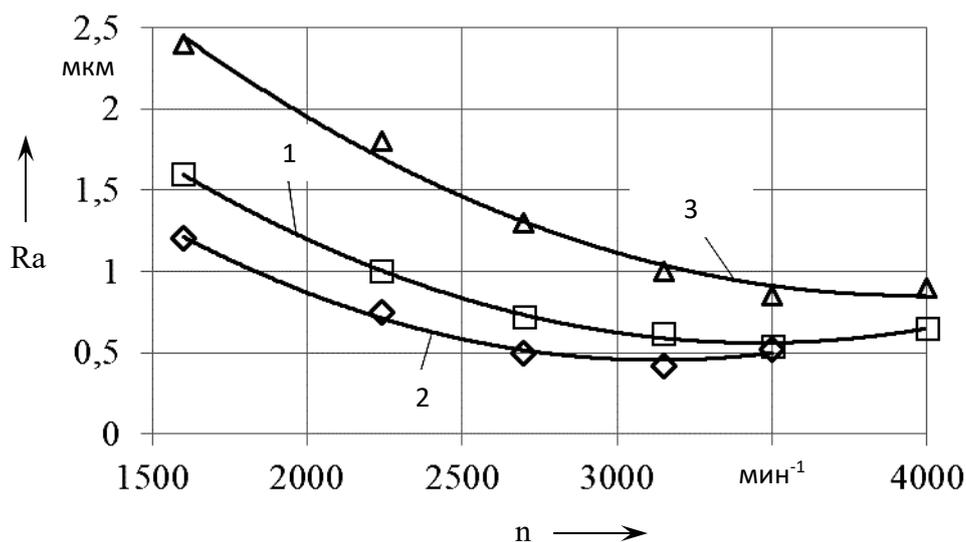


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  5,8...6,0 мкм ( $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл): 1 – сталь 45 (190...200 НВ); 2 – сталь 40Х (180...190 НВ); 3 – сталь 45 (30...35 HRC)

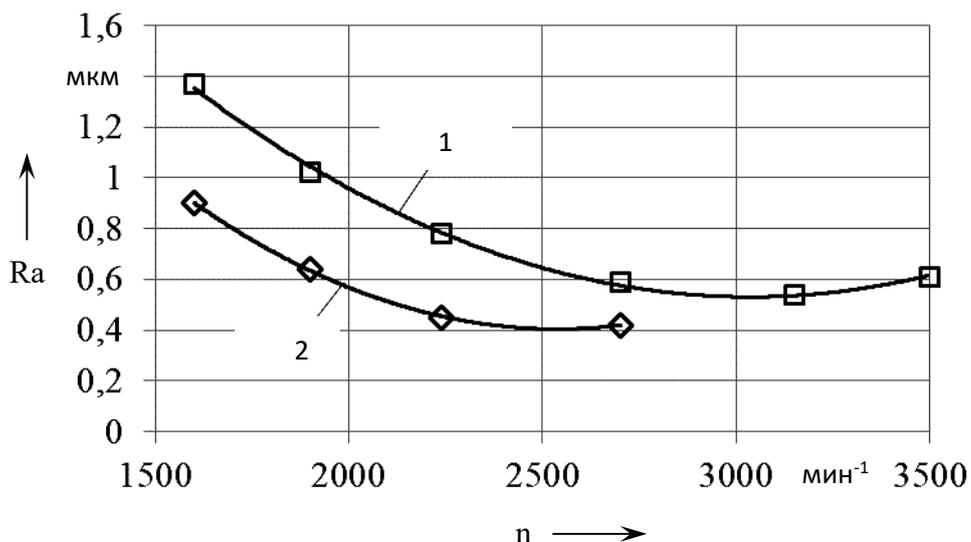


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  2,0...2,2 мкм ( $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл): 1 – сталь 45 (190...200 НВ); 2 – серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ)

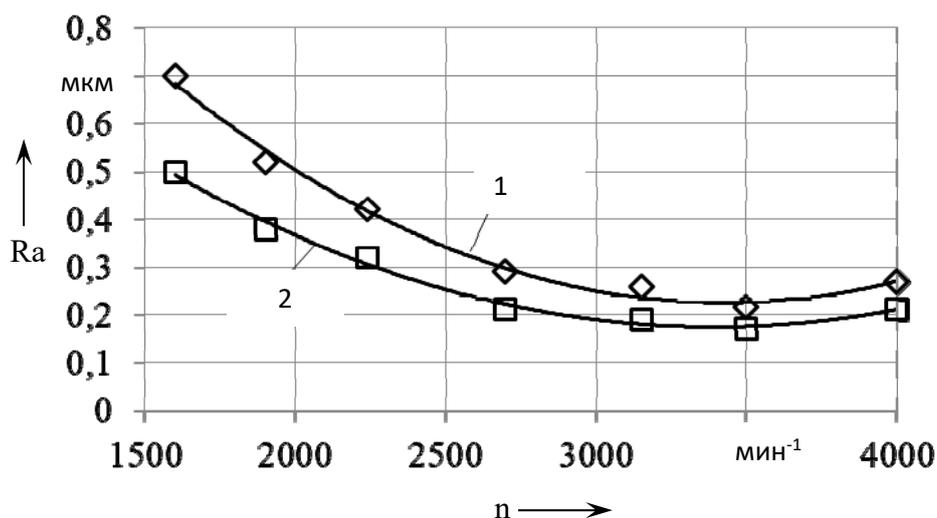


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  1,0...1,2 мкм ( $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл): 1 – сталь 45 (20...25 HRC); 2 – сталь 40X (25...28 HRC)

На рис. 4 показаны зависимости шероховатости поверхности заготовок от частоты вращения инструмента при СМДН внутренних цилиндрических поверхностей заготовок, предварительно обработанных шлифованием с достижением шероховатости по параметру  $Ra$  0,60...0,63 мкм.

На рис. 5 изображены зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  0,35...0,40 мкм, полученной хонингованием.

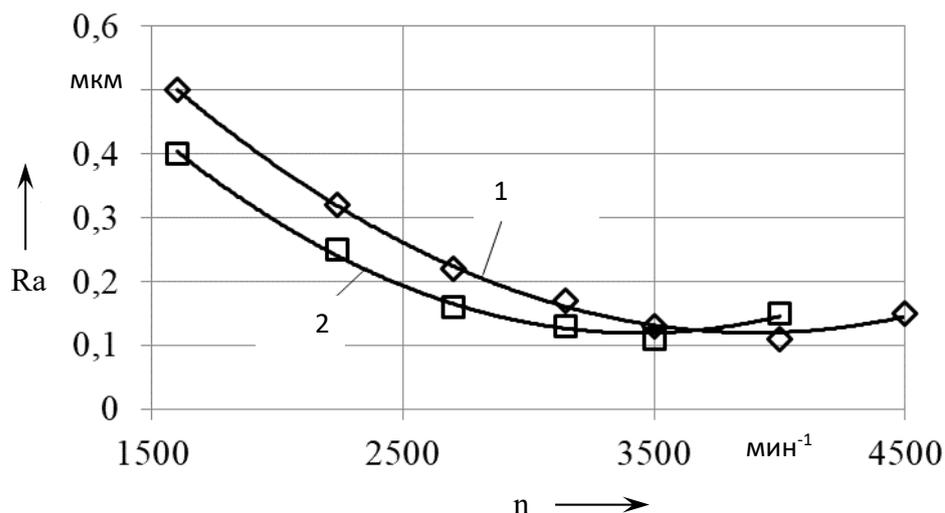


Рис. 4. Зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  0,60...0,63 мкм ( $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл): 1 – сталь 45 (30...35 HRC); 2 – сталь 40X (28...30 HRC)

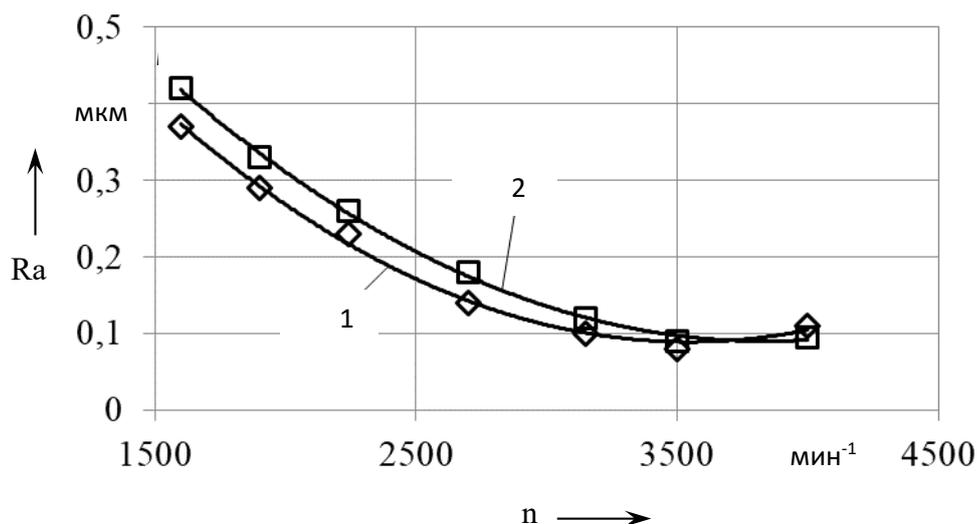


Рис. 5. Зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  0,35...0,40 мкм ( $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл): 1 – сталь 45 (30...35 HRC); 2 – серый чугун СЧ 20 (25...30 HRC)

Анализ результатов исследований показывает, что шероховатость упрочненной поверхности ферромагнитных заготовок существенно зависит от частоты вращения инструмента, определяющей характеристики импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров.

Как видно из рис. 1–5, при частоте вращения инструмента менее  $1600 \text{ мин}^{-1}$

деформирующие шары находятся на поверхности магнитной системы (т. к. действующей центробежной силы недостаточно для преодоления силы их магнитного притяжения к источникам магнитного поля) и не взаимодействуют с упрочняемой заготовкой. При увеличении частоты вращения комбинированного инструмента более  $1600 \text{ мин}^{-1}$  деформирующие шары отрываются от

поверхности магнитной системы. Под действием магнитного поля деформирующие шары инструмента перемещаются в окружном направлении кольцевой камеры, совершают радиальные колебательные движения и выполняют импульсно-ударное деформирование поверхности заготовки.

По мере увеличения частоты вращения инструмента возрастает и сила импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров на упрочняемую поверхность ферромагнитной заготовки. В процессе совмещенной отделочно-упрочняющей обработки происходит пластическое перераспределение деформированного металла из вершин во впадины микронеровностей.

Одновременно с увеличением силы динамического воздействия на упрочняемую поверхность со стороны деформирующих шаров возрастает и сопротивление деформации металла, что несколько замедляет процесс уменьшения высоты исходных микронеровностей заготовки. Когда впадины микронеровностей полностью заполняются деформированным металлом, высота шероховатости обрабатываемой поверхности заготовки стабилизируется.

Если частота вращения комбинированного инструмента превышает оптимальное значение, то происходит некоторое увеличение шероховатости поверхности заготовки. Это может быть обусловлено снижением динамической активности деформирующих шаров (вследствие рассогласования частоты воздействия вращающегося магнитного поля с частотой собственных колебаний деформирующих шаров) или переупрочнением поверхностного слоя заготовки.

Из представленных на рис. 1–5 зависимостей следует, что рациональными значениями частот вращения комбинированного инструмента, при которых обеспечивается максимальная деформация (максимальное снижение) исходных микронеровностей поверхности загото-

вок, являются:

- $R_{\text{исх}}$  5,8...6,0 мкм:
  - а) сталь 45 (190...200 НВ) –  $n = 3550 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - б) сталь 40X (180...220 НВ) –  $n = 3150 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - в) сталь 45 (30...35 HRC) –  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ ;
- $R_{\text{исх}}$  2,0...2,2 мкм:
  - а) сталь 45 (190...200 НВ) –  $n = 3080 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - б) серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ) –  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ;
- $R_{\text{исх}}$  1,0...1,2 мкм:
  - а) сталь 45 (20...25 HRC) –  $n = 3550 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - б) сталь 40X (25...28 HRC) –  $n = 3350 \text{ мин}^{-1}$ ;
- $R_{\text{исх}}$  0,60...0,63 мкм:
  - а) сталь 45 (30...35 HRC) –  $n = 3850 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - б) сталь 40X (28...30 HRC) –  $n = 3320 \text{ мин}^{-1}$ ;
- $R_{\text{исх}}$  0,35...0,40 мкм:
  - а) сталь 45 (30...35 HRC) –  $n = 3700 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - б) серый чугун СЧ 20 (25...30 HRC) –  $n = 3580 \text{ мин}^{-1}$ .

Анализ результатов исследования шероховатости поверхности показал, что метод СМДН имеет хорошие технологические возможности, обеспечивает снижение исходной шероховатости поверхности стальных и чугунных заготовок твердостью 190...220 НВ в 4–9 раз, а с твердостью 28...30 HRC – в 4–6 раз.

### ***Исследование шероховатости поверхности от подачи комбинированного инструмента***

Одним из важных режимов процесса СМДН является подача комбинированного инструмента (далее – инструмента) относительно обрабатываемой поверхности, определяющая интенсивность импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров на элементарную поверхность ферромагнит-

ной заготовки в единицу времени. Подача инструмента определяет характеристики формируемого на обрабатываемой поверхности заготовки микрорельефа, получаемого вследствие сопряжения микролунок от деформирующих шаров комбинированного инструмента.

На рис. 6–8 показаны экспериментальные зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при СМДН внутренней цилиндрической поверхности колец, имеющих исходную шероховатость  $Ra$  5,8...6,2; 2,0...2,2 и 1,0...1,2 мкм соответственно.

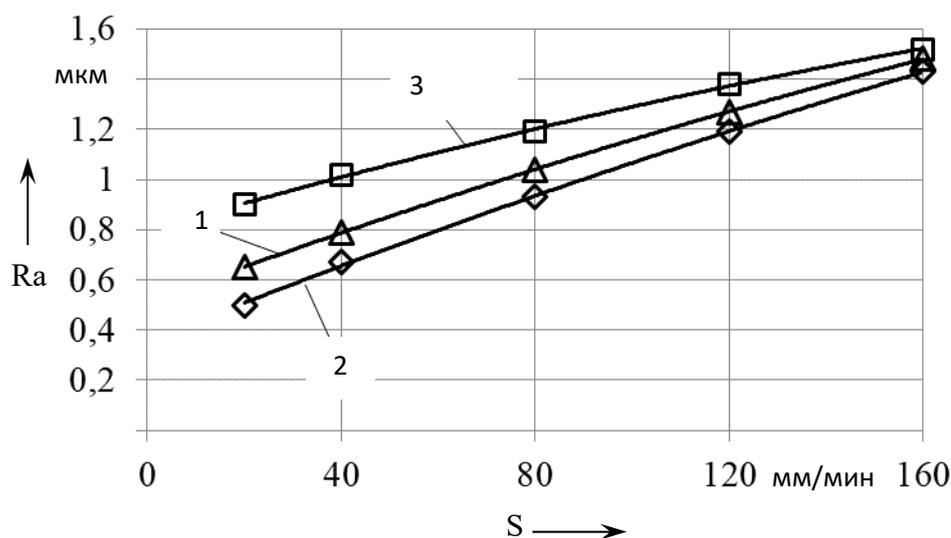


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  5,8...6,2 мкм ( $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3500$  мин<sup>-1</sup>): 1 – сталь 45 (190...200 НВ); 2 – сталь 40X (180...190 НВ); 3 – серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ)

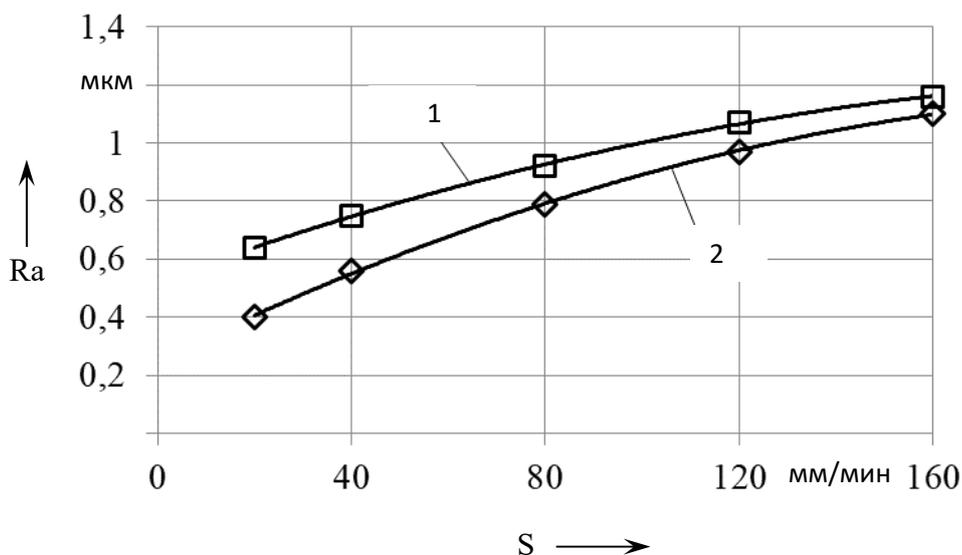


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  2,0...2,2 мкм ( $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>): 1 – сталь 45 (190...200 НВ); 2 – серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ)

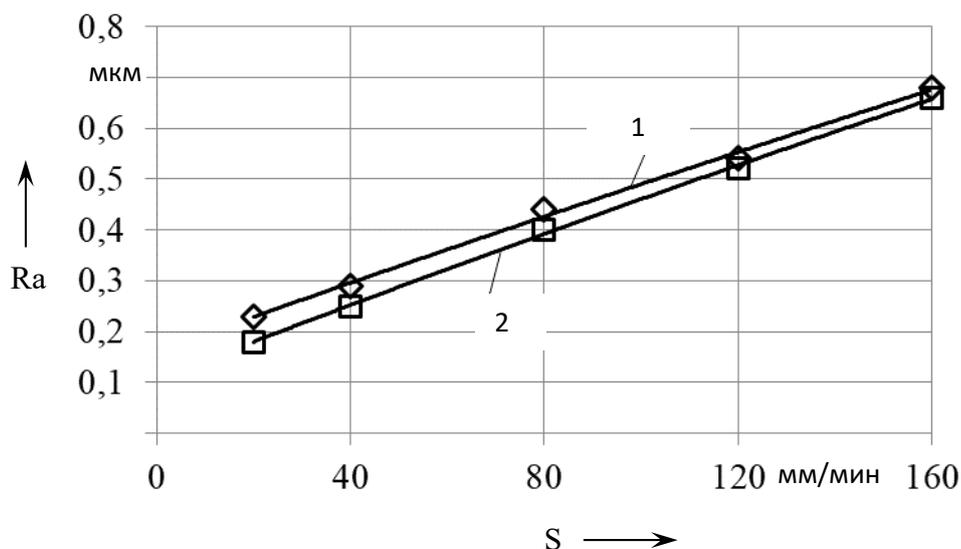


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  1,0...1,2 мкм ( $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3500$  мин<sup>-1</sup>): 1 – сталь 45 (20...25 HRC); 2 – сталь 40X (25...28 HRC)

На рис. 9 изображены зависимости шероховатости внутренней поверхности колец от подачи инструмента при СМДН заготовок из стали 45 (30...35 HRC), стали 40X (28...30 HRC), обработанных шлифованием и имеющих исходную шероховатость  $Ra_{исх}$  0,60...0,63 мкм.

На рис. 10 изображены зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при упрочнении внутренней поверхности колец СМДН, полученной хонингованием с исходной шероховатостью  $Ra_{исх}$  0,35...0,40 мкм.

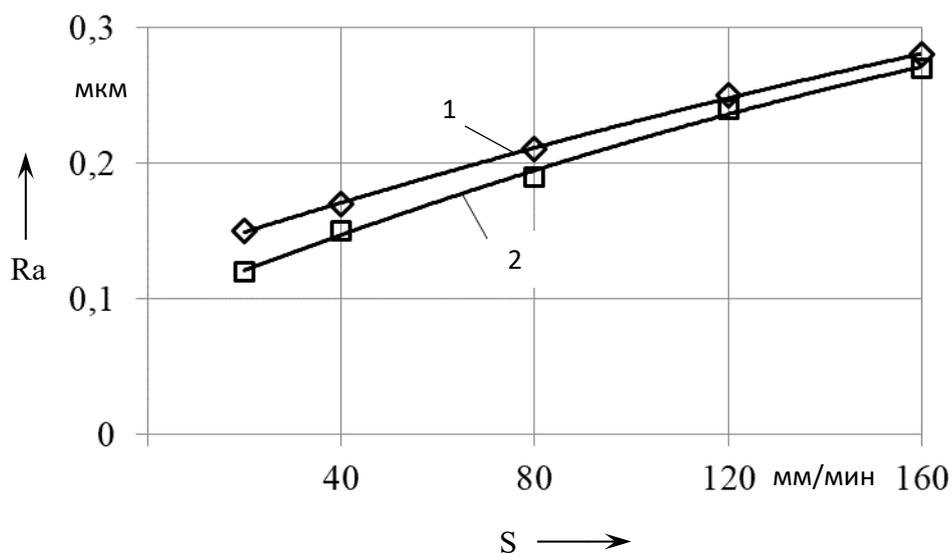


Рис. 9. Зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  0,60...0,63 мкм ( $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 4000$  мин<sup>-1</sup>): 1 – сталь 45 (30...35 HRC); 2 – сталь 40X (28...30 HRC)

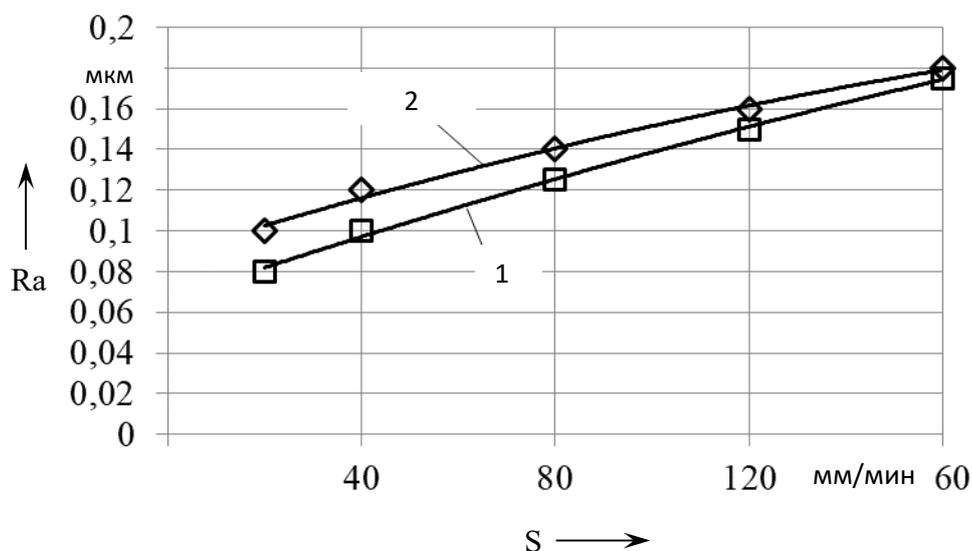


Рис. 10. Зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$  0,35...0,40 мкм ( $d = 12$  мм;  $V_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3600$  мин<sup>-1</sup>): 1 – сталь 45 (30...35 HRC); 2 – серый чугун СЧ 20 (25...30 HRC)

Из рис. 6–10 следует, что величина подачи инструмента при СМДН может выбираться в широких пределах в соответствии с требуемой шероховатостью поверхности детали, заданной чертежом.

### Заключение

Определены оптимальные значения частот вращения комбинированного инструмента, обеспечивающие минимальную шероховатость поверхности для заготовок из исследуемых материалов, имеющих различную исходную шероховатость.

Установлено, что метод СМДН обеспечивает снижение исходной шероховатости поверхности заготовок: сталь 45 (190...220 НВ) – в 9,6 раза (с  $Ra$  5,75 до 0,60 мкм); сталь 45 (30...35 HRC) – в 3,6 раза (с  $Ra$  2,00

до 0,55 мкм); серый чугун СЧ 20 (150...160 НВ) – в 5,0 раз (с  $Ra$  2,00 до 0,4 мкм).

Выявлено, что на шероховатость формируемой поверхности при СМДН влияет величина подачи комбинированного инструмента. При упрочнении поверхности заготовок в диапазоне подач инструмента от 20 до 160 мм/мин обеспечивается снижение шероховатости поверхности: из стали 45 (190...220 НВ) с исходной шероховатостью  $Ra_{исх}$  5,8...6,2 мкм – до  $Ra$  1,42...0,60 мкм; из серого чугуна СЧ 20 (150...160 НВ) с  $Ra_{исх}$  2,0...2,2 мкм – до  $Ra$  1,1...0,4 мкм; из стали 45 (20...25 HRC) с  $Ra_{исх}$  1,0...1,2 мкм – до  $Ra$  0,68...0,23 мкм; из стали 45 (30...35 HRC) с  $Ra_{исх}$  0,60...0,63 мкм – до  $Ra$  0,27...0,20 мкм; из стали 45 (30...35 HRC) с  $Ra_{исх}$  0,35...0,40 мкм – до  $Ra$  0,17...0,08 мкм.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 1. – 480 с.

2. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2068770 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.11.1996.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2089373 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 10.09.1997.
5. **Довгалева, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
6. Математическое моделирование процесса совмещенной обработки деталей магнитно-динамическим раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег [и др.] // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 152–160.
7. **Dovgalev, A.** Combined magnetic dynamic rolling as process module for quality assurance / A. Dovgalev // Technologia i automatyzacja montazu. – 2015. – № 3. – С. 54–60.
8. **Довгалева, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
9. **Довгалева, А. М.** Разработка магнитных систем комбинированных инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания / А. М. Довгалева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1. – С. 15–26.
10. **Шелег, В. К.** Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330–334.

*Статья сдана в редакцию 3 февраля 2021 года*

**Валерий Константинович Шелег**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: sheleh\_v@tut.by.

**Александр Михайлович Довгалева**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Иван Анатольевич Тарадейко**, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

**Valery Konstantinovich Sheleg**, DSc (Engineering), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: ShelehV@tut.by.

**Aleksandr Mikhailovich Dovgalev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Ivan Anatolyevich Taradeiko**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

---

УДК 621.9.047:669:538.8

*В. М. Шеменков*

---

**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ  
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТАНТАЛСОДЕРЖАЩИХ  
ПОКРЫТИЙ**

---

UDC 621.9.047:669:538.8

*V. M. Shemenkov*

---

**INFLUENCE OF GLOW DISCHARGE PROCESSING ON STRUCTURAL-PHASE  
STATE OF TANTALUM-CONTAINING COATINGS**

---

**Аннотация**

Представлены результаты исследования структуры и фазового состава износостойких защитных покрытий типа TiN + Ta и чистого тантала, полученных методом магнетронного напыления на режущие пластины из твердого сплава T15K6, как в исходном состоянии, так и подвергнувшейся обработке тлеющим разрядом.

**Ключевые слова:**

тлеющий разряд, структура, фазовый состав, износостойкое защитное покрытие, модифицирующая обработка, поверхностный слой, тантал.

**Abstract**

The paper presents the results of studying the structure and phase composition of wear-resistant protective coatings of the TiN + Ta type and pure tantalum, obtained by magnetron sputtering onto cutting inserts made of T15K6 hard alloy, both in the initial state and after being glow discharge-treated.

**Keywords:**

glow discharge, structure, phase composition, wear-resistant protective coating, modifying treatment, surface layer, tantalum.

---

Как известно, после главной режущей кромки передняя поверхность любого режущего инструмента работает в сложных трибомеханических, тепловых и трибохимических условиях, особенно при обработке пластичных материалов.

Образовавшаяся стружка сходит по передней поверхности режущего инструмента, где возникает сила трения, препятствующая свободному сходу стружки из зоны резания. Действие указанной силы приводит к возникновению вторичной пластической деформации обрабатываемого материала, перешедшего в стружку. При этом следует отме-

тить, что чем больше сила трения стружки о переднюю поверхность, тем больше толщина «заторможенного» слоя и больше усилие резания. Вследствие чего в последнее время уделяется большое внимание разработке новых наукоемких способов, позволяющих создавать на рабочих поверхностях, особенно инструментальной оснастки, барьерные слои с повышенными эксплуатационными свойствами [1–3].

Несмотря на большое разнообразие способов получения различных защитных покрытий, в промышленности широкое распространение получил метод магнетронного напыления тугоплавких

металлов в среде реакционных газов.

Одним из наиболее интересных металлов, который можно использовать для получения защитных покрытий и пленок, является тантал. Как известно, за счет высоких температур плавления, твердости и коррозионной устойчивости танталосодержащие покрытия применяются в качестве диффузионного барьера при покрытии, например, лопаток турбин и стволов орудий, что существенно увеличивает их ресурс работы.

Таким образом, использование тантала в качестве мишени при магнетронном напылении покрытий на режущие инструменты с последующей их обработкой тлеющим разрядом может привести к получению результатов, которые будут интересны для инструментального производства.

В рамках работы исследования проводились на образцах, полученных из листов тантала электродуговой плавки (чистотой 99,9) марки ТВЧ (ОСТ88.00.021.228–76), и защитных покрытиях на основе титана и тантала (TiN + Ta, Ta), нанесённых на многогранные режущие пластины из твердого сплава T15K6 по ГОСТ 3882–74.

### *Методика исследования*

В работе применялись электронно-микроскопический и рентгеноструктурный методы анализа фазового состава и структуры материалов.

Электронно-микроскопический анализ поверхности образцов проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 2SBA с при-

менением стандартного детектора вторичных электронов. Подготовка образцов для металлографических исследований осуществлялась по стандартной методике. В качестве реактива для травления использовался раствор «царская водка». Травление осуществлялось в течение 40...50 с при температуре раствора 343 К [4].

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на автоматизированном рентгеновском комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М с применением монохроматизированного  $\text{Co}_{K\alpha}$ -излучения. В качестве кристалла-монохроматора использовали пластину пиролитического графита. Рентгеновская съемка выполнялась при напряжении  $U = 25$  кВ, токе  $J = 12$  мА в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1 град. При рентгенофазовом анализе продолжительность набора импульсов в каждой точке составляла до 20 с, при этом съемка велась в интервале углов рассеяния  $2\theta$  для образцов из тантала 40...125 град, а для многогранных режущих пластин с танталосодержащим покрытием – 30...110 град.

Физическое уширение дифракционных линий определялось методом аппроксимации с помощью программного обеспечения HighScore++ (Panalytical, Нидерланды). В качестве эталона использовался образец отожженной стали 10 ГОСТ 1050–88 [5, 6].

Обработка образцов проводилась по трем основным режимам, указанным в табл. 1. Время обработки по всем режимам составила 30 мин.

Табл. 1. Режимы обработки образцов в тлеющем разряде

Режим обработки	Напряжение горения тлеющего разряда U, В	Плотность тока J, мА/м <sup>2</sup>
№ 1	1000	0,125
№ 2	2000	0,250
№ 3	3000	0,375

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты металлографического анализа поверхности образцов из чистого тантала до обработки тлеющим разрядом (рис. 1, а) показывают, что структура соответствует классической, полу-

ченной методом проката.

Модифицирующая обработка приводит к дисперсности и сглаживанию краев за счет распыления поверхности ионами плазмы тлеющего разряда (рис. 1, б–г). Наиболее ярко этот эффект наблюдается при обработке тлеющим разрядом по режиму № 3 (см. рис. 1, г).

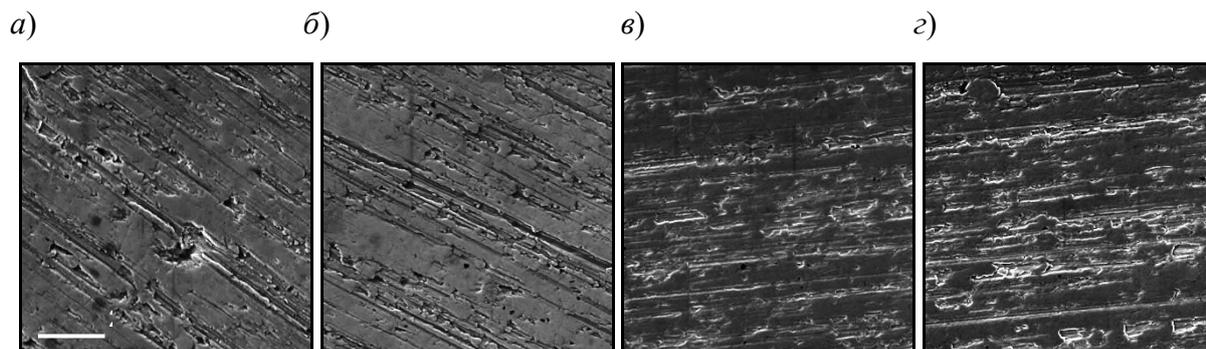


Рис. 1. Структура поверхности образцов из тантала: а – в состоянии поставки; б – после обработки в тлеющем разряде по режиму № 1; в – после обработки в тлеющем разряде по режиму № 2; г – после обработки в тлеющем разряде по режиму № 3

Анализ полученных рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образцов из тантала (рис. 2) в исходном состоянии показывает, что соотношение интенсивностей дифракци-

онных линий не соответствует эталону (Ta (110) / Ta (200) / Ta (211) / Ta (220) / Ta (310) = 100 / 20 / 30 / 5 / 5), что свидетельствует о наличии текстуры, отличающейся от равновесной.

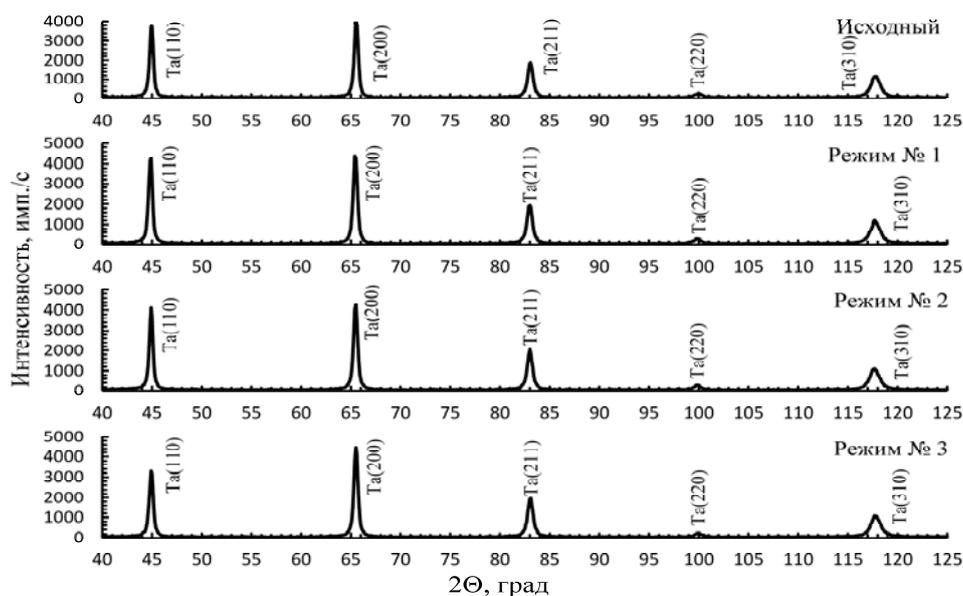


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из тантала в исходном состоянии и после обработки тлеющим разрядом с различными режимами

Отношение физических уширений дифракционных линий 110 и 200 ( $\beta_{200}/\beta_{110}$ ) равно 2,483 (табл. 2), пропорционально отношению  $\text{tg}\theta_{200}/\text{tg}\theta_{110}$ , равному 2,194. Указанный факт свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено высоким со-

держанием в образце линейных дефектов. Параметр решетки несколько больше эталонного значения параметра решетки тантала (см. табл. 2), что указывает на наличие в нем сжимающих макронапряжений.

Табл. 2. Параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и размер фрагментов тантала

Образец (режим обработки)	$a_{Ta}$ , нм		$\beta_{110}$ , $10^{-3}$ · рад	$\beta_{200}$ , $10^{-3}$ · рад	$\beta_{311}$ , $10^{-3}$ · рад	Размер фрагментов, мкм
	эксперимент (110)	эталон [5]				
Исходный	0,23404	0,2338	6,8569	17,0262	21,8029	0,1594
Режим № 1	0,23453		6,0900	13,5627	23,8722	0,1365
Режим № 2	0,23418		5,1838	12,8419	23,9329	0,1360
Режим № 3	0,23413		7,2967	17,6845	23,3524	0,1396

В результате обработки образца тлеющим разрядом по режиму № 1 регистрируется небольшое снижение величин физического уширения дифракционных линий 110 и 200. Отношение  $\beta_{200}/\beta_{110}$  составляет 2,22, что также пропорционально отношению тангенсов соответствующих углов дифракции, и свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено как дисперсностью кристаллического строения материала, так и высоким содержанием в них линейных дефектов. Величина параметра решетки тантала возрастает, что свидетельствует о том, что обработка разрядом с указанными параметрами приводит к росту сжимающих макронапряжений.

В результате обработки образца тлеющим разрядом по режиму № 2 регистрируется дальнейшее снижение величин физического уширения дифракционных линий 110 и 200. Отношение физических уширений дифракционных линий 200 к 110 так же, как и у необработанного образца, пропорционально отношению тангенсов соответствующих углов дифракции. При этом пониженные значения величин  $\beta_{200}$  и  $\beta_{110}$  (см. табл. 2),

по сравнению с образцом в исходном состоянии, могут свидетельствовать о том, что в результате обработки тлеющим разрядом по режиму № 2 происходит уменьшение размеров фрагментов и снижение в них плотности дислокаций. Величина параметра решетки незначительно возрастает, что свидетельствует о том, что обработка разрядом с указанными параметрами приводит к незначительному росту растягивающих макронапряжений.

В результате обработки тлеющим разрядом по режиму № 3 регистрируется рост величины физического уширения дифракционных линий 110 и 200 тантала (см. табл. 2). Отношение физических уширений дифракционных линий 200 к 110 пропорционально отношению тангенсов соответствующих углов дифракции и свидетельствует о содержании в образце линейных дефектов. При этом рост величин  $\beta_{200}$  и  $\beta_{110}$ , по сравнению с предыдущими образцами, может свидетельствовать о росте размеров фрагментов и снижении в них плотности дислокаций. Вместе с тем, некоторое снижение отношения  $\beta_{200}/\beta_{110}$  по отношению к необработанному образцу может свиде-

тествовать об увеличении степени корреляции в распределении дислокаций и формировании развитой системы дислокационных стенок. Величина параметра решетки при этом несколько возрастает, что может свидетельствовать о некотором снятии остаточных растягивающих макронапряжений.

В результате металлографического анализа поверхности многогранных не-

перетачиваемых пластин с покрытием в виде тантала до обработки тлеющим разрядом (рис. 3, а) выявлено, что структура покрытия соответствует классической, полученной методом магнетронного распыления, и характеризуется наличием мелкодисперсных частиц тантала. Покрытие является равномерным и полностью покрывает рабочую поверхность режущей пластины (рис. 3, б, в, табл. 3).

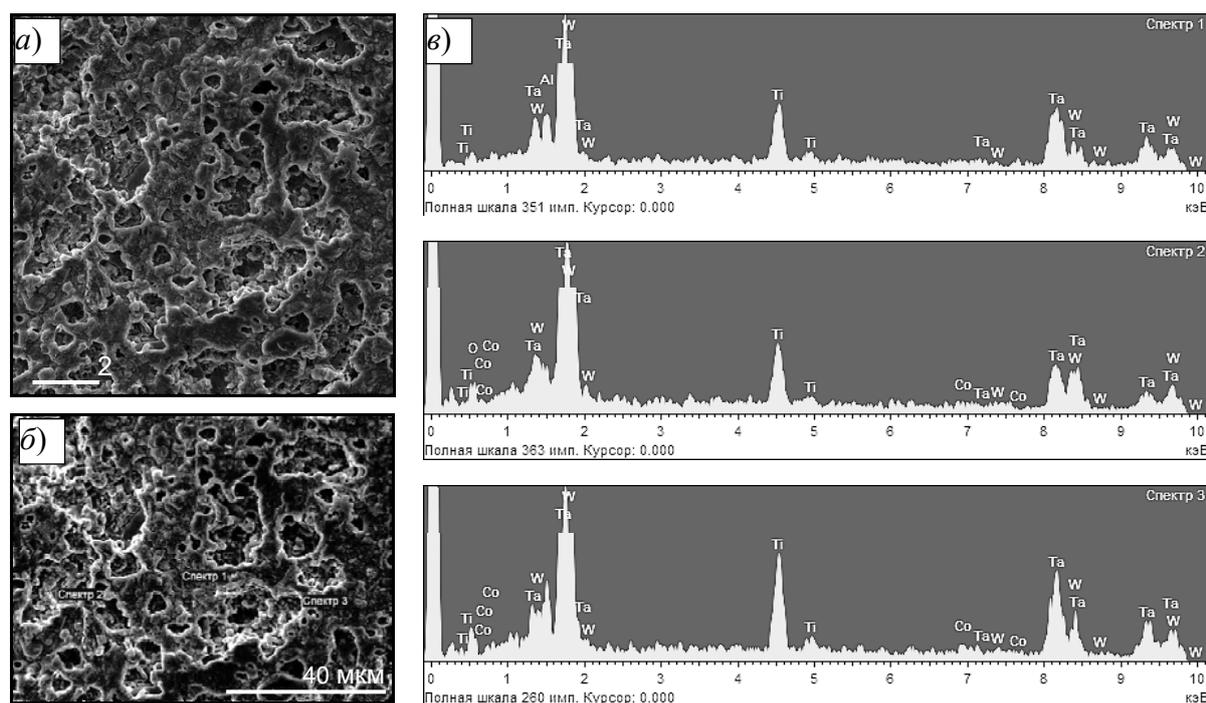


Рис. 3. Структура покрытия из тантала на режущей пластине из твердого сплава T15K6 до обработки тлеющим разрядом (а), электронное изображение структуры покрытия (б) и рентгеновские спектры от участков образца (в)

Табл. 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участков образца

Спектр (см. рис. 3)	Элемент, % весовой			
	Ti	Co	Ta	W
1	9,72	0,10	81,00	9,18
2	8,09	0,21	44,45	47,25
3	13,53	1,86	67,65	16,97

Модифицирующая обработка приводит к дисперсности и некоторому распылению покрытия из тантала

(рис. 4, табл. 4).

Рентгеновская дифрактограмма покрытия из тантала на твердосплавной

пластине T15K6 (рис. 5) в исходном состоянии характеризуется тем, что помимо составляющих самого твердого

сплава (WC, TiC, Co) регистрируются рефлексы не только от Ta, но и от фазы TaC.

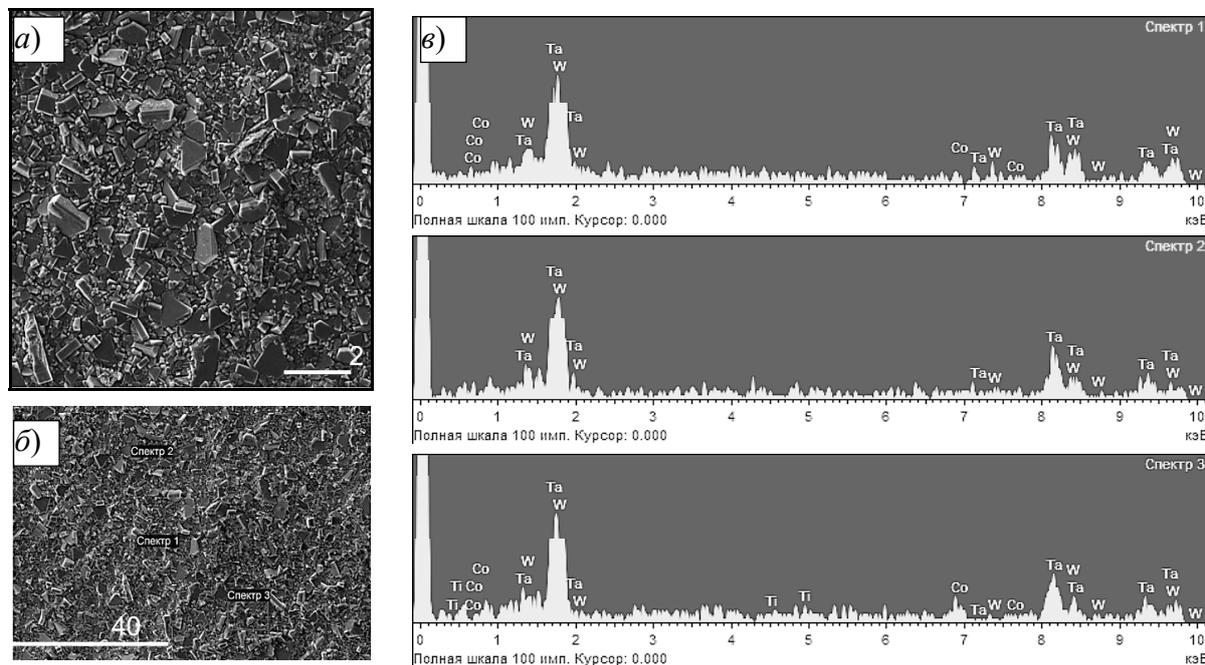


Рис. 4. Структура покрытия из тантала на режущей пластине из твердого сплава T15K6 до обработки тлеющим разрядом (а), электронное изображение структуры покрытия (б) и рентгеновские спектры от участков образца (в)

Табл. 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участков образца после обработки тлеющим разрядом

Спектр (см. рис. 4)	Элемент, % весовой			
	Ti	Co	Ta	W
1	9,72	0,10	81,00	9,18
2	8,09	0,21	44,45	47,25
3	13,53	1,86	67,65	16,97

Отношение физических уширений дифракционных линий 111 и 220 ( $\beta_{220}/\beta_{111}$ ) равно 2,81 (табл. 5), находится в диапазоне между  $\sec\theta_{220}/\sec\theta_{110}$ , равным 2,61, и  $\tan\theta_{220}/\tan\theta_{111}$ , равным 3,61. Указанный факт свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено как дисперсностью кри-

сталлического строения, так и высоким содержанием в нем линейных дефектов. Параметр решетки существенно больше эталонного значения параметра решетки тантала (см. табл. 5), что указывает на наличие в нем мощных сжимающих макронапряжений.

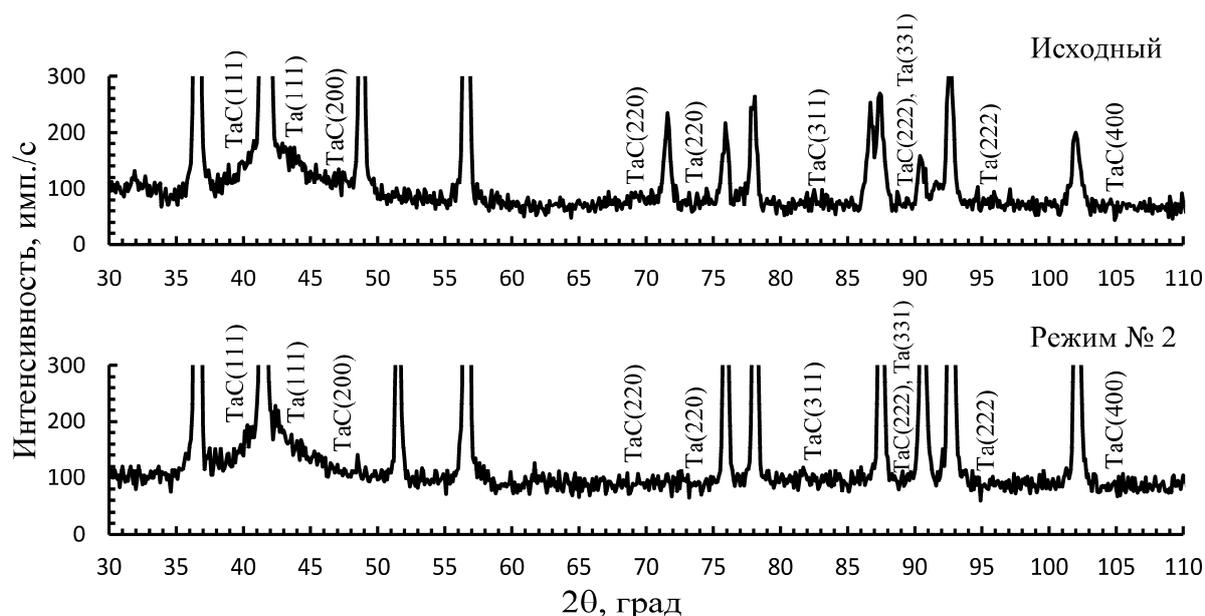


Рис. 5. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм покрытия из тантала на твердом сплаве Т15К6 в исходном состоянии и после обработки тлеющим разрядом

Табл. 5. Параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и размер фрагментов покрытия из тантала на режущей пластине из твердого сплава Т15К6

Образец (режим обработки)	$a_{Ta}$ , нм		$\beta_{111}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	$\beta_{220}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	Размер фрагментов, мкм
	эксперимент (111)	эталон [5]			
Исходный	0,24374	0,23380	8,3459	23,3960	0,2166
Режим № 2	0,24384		12,3881	26,2676	0,1457

В результате обработки покрытия из тантала тлеющим разрядом регистрируется увеличение величины физического уширения дифракционных линий 111 и 220 по сравнению с исходным состоянием. Отношение  $\beta_{220}/\beta_{111}$  свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено дисперсностью кристаллического строения покрытий. Величина параметра решетки тантала существенно возрастает, что свидетельствует об увеличении уровня сжимающих напряжений. Также наблюдается значительное уменьшение разме-

ров фрагментов танталового покрытия.

Структура покрытия TiN + Ta, так же как и в предыдущем случае, соответствует классической, полученной методом магнетронного распыления, и характеризуется наличием мелкодисперсных частиц нитрида титана и тантала, является равномерной и полностью покрывает рабочую поверхность режущей пластины (рис. 6, табл. 6).

Модифицирующая обработка приводит к дисперсности покрытия (рис. 7, табл. 7).

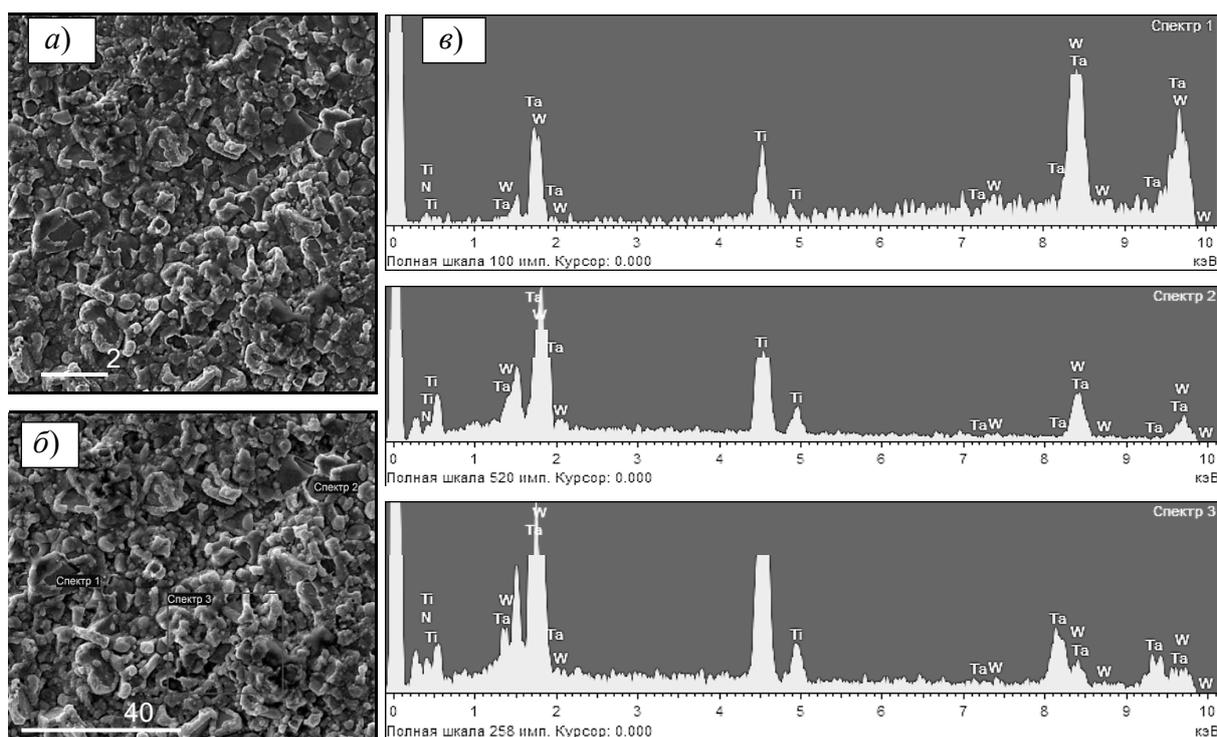


Рис. 6. Структура покрытия TiN + Ta на режущей пластине из твердого сплава T15K6 после обработки тлеющим разрядом по режиму № 2 (а), электронное изображение структуры покрытия (б) и рентгеновские спектры от участков образца (в)

Табл. 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участков образца

Спектр (см. рис. 6)	Элемент, % весовой			
	N	Ti	Ta	W
1	19,69	25,43	41,97	12,91
2	5,47	24,82	1,74	67,97
3	10,54	27,58	48,12	13,76

Табл. 7. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участков образца

Спектр (см. рис. 7)	Элемент, % весовой			
	N	Ti	Ta	W
1	8,41	21,66	50,11	19,81
2	8,19	31,07	55,66	5,08
3	8,09	19,71	47,18	25,02

Анализ рентгеновских дифрактограмм образцов с покрытием TiN + Ta (рис. 8) в исходном состоянии показывает, что покрытие имеет сложный фа-

зовый состав (табл. 8 и 9). Отношение физических уширений дифракционных линий 111 и 220 тантала (см. табл. 9) существенно больше, чем  $tg\theta_{220}/tg\theta_{111}$ ,

что свидетельствует о дисперсности кристаллического строения фрагментов тантала, а также о высоком содержании в них линейных дефектов. Параметры решетки тантала существенно отлича-

ются от эталонных значений, что указывает на нестехиометрический состав покрытия и наличие в нем сжимающих макронапряжений.

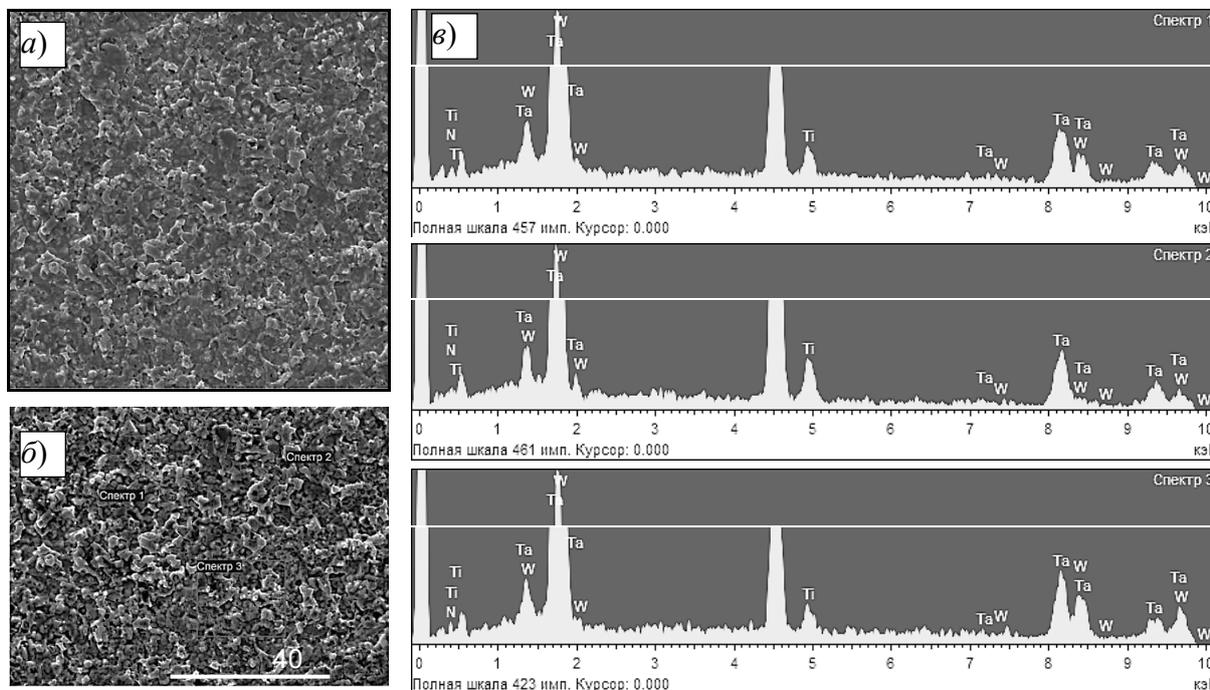


Рис. 7. Структура покрытия TiN + Ta на режущей пластине из твердого сплава T15K6 после обработки тлеющим разрядом по режиму № 2 (а), электронное изображение структуры покрытия (б) и рентгеновские спектры от участков образца (в)

Табл. 8. Параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и размер фрагментов тантала (Ta) покрытия Ti + Ta на режущей пластине из твердого сплава T15K6

Образец (режим обработки)	$a_{Ta}$ , нм		$\beta_{Ta111}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	$\beta_{Ta220}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	Размер фрагментов Ta, мкм
	эксперимент (111)	эталон [5]			
Исходный	0,24422	0,23380	3,5135	32,4215	0,0822
Режим № 2	0,24368		3,0231	33,7057	0,0777

Табл. 9. Параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и размер фрагментов нитрида титана (TiN) покрытия Ti + Ta на режущей пластине из твердого сплава T15K6

Образец (режим обработки)	$a_{TiN}$ , нм		$\beta_{TiN111}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	$\beta_{TiN200}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	$\beta_{TiN220}$ , $10^{-3} \cdot \text{рад}$	Размер фрагментов TiN, мкм
	эксперимент (200)	эталон [5]				
Исходный	0,21269	0,21207	3,4449	10,3863	12,3723	0,1787
Режим № 2	0,21217		3,1688	9,7291	10,7465	0,1903

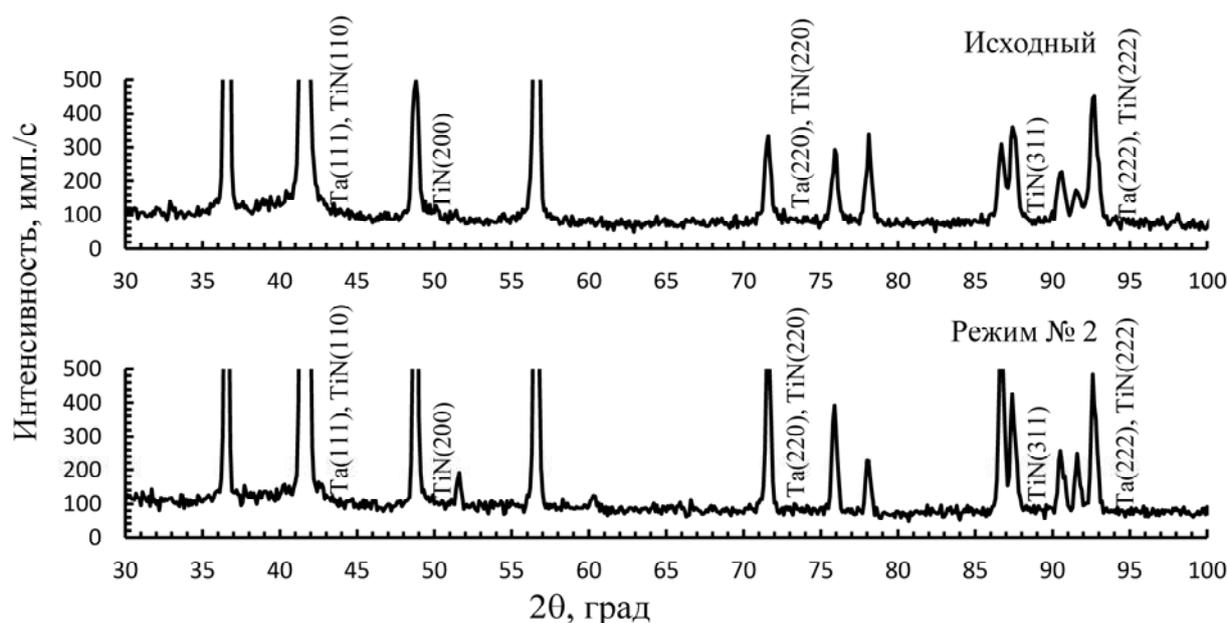


Рис. 8. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм покрытия TiN + Ta на твердом сплаве T15K6 в исходном состоянии и после обработки тлеющим разрядом

Отношение физических уширений дифракционных линий 111 и 220 нитрида титана (TiN) (см. табл. 9) составляет 3,59 и пропорционально диапазону между  $\sec\theta_{220}/\sec\theta_{110}$ , равным 2,55, и  $\operatorname{tg}\theta_{220}/\operatorname{tg}\theta_{111}$ , равным 3,56, что свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено как дисперсностью кристаллического строения, так и высоким содержанием в нем линейных дефектов. Параметр решетки больше эталонного значения параметра решетки тантала (см. табл. 9), что указывает на наличие в нем сжимающих макронапряжений.

В результате обработки покрытия тлеющим разрядом регистрируется уменьшение величины физического уширения дифракционных линий 111 и 220 нитрида титана по сравнению с исходным состоянием. Отношение  $\beta_{220}/\beta_{111}$  свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено дисперсностью кристаллического строения покрытий. Величина параметра решетки тантала уменьшается, что свидетельствует об уменьшении уровня сжимающих напряжений. Также наблюдается рост размеров фрагментов

нитрида титана.

Вместе с тем, обработка приводит к снижению величины физического уширения дифракционной линии 111 Ta с одновременным ростом уширения линии 220. Отношение  $\beta_{220}/\beta_{111}$  находится между величинами отношений секансов и тангенсов соответствующих углов дифракции. Данное изменение может свидетельствовать о том, что уширение дифракционных линий обусловлено как дисперсностью кристаллического строения тантала в покрытии, так и высоким содержанием в них линейных дефектов. Увеличенный параметр решетки указывает на рост уровня сжимающих напряжений в тантале.

### Выводы

Обработка образцов из тантала в зависимости от технологических параметров обработки приводит к дисперсности кристаллического строения материала, росту параметров кристаллической решетки, что свидетельствует о том, что обработка разрядом с указанными параметрами приводит к росту сжимающих макронапряжений, умень-

шению размеров фрагментов и снижению в них плотности дислокаций.

Обработка покрытия из тантала на режущей пластине из твердого сплава Т15К6 приводит к дисперсности кристаллического строения покрытий, увеличению уровня сжимающих напряжений и значительному уменьшению размеров фрагментов танталового покрытия.

Обработка покрытия TiN + Ta на режущей пластине из твердого сплава Т15К6 тлеющим разрядом приводит к дисперсности кристаллического строения покрытий, уменьшению уровня сжимающих напряжений в TiN и увеличению их в Ta, росту размеров фрагментов нитрида титана.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.: ил.
2. **Шеменков, В. М.** Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и твердость износостойких защитных покрытий на основе титана / В. М. Шеменков, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 118–127.
3. **Шеменков, В. М.** Влияние тлеющего разряда на структурно-фазовое состояние двухслойных износостойких защитных покрытий на основе титана / В. М. Шеменков, О. В. Обидина // Фундам. проблемы совр. материаловедения. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 223–229.
4. **Анисович, А. Г.** Практика металлографического исследования материалов: монография / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 221 с.: ил.
5. **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учебное пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСИС, 2002. – 360 с.: ил.
6. **Лысак, Л. И.** Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения: сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.

*Статья сдана в редакцию 25 января 2021 года*

**Владимир Михайлович Шеменков**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Vladimir Mikhailovich Shemenkov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.019.34

*А. Г. Капустин, О. Г. Карачун*

### ПРИНЦИПЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ТИПА ALL ELECTRIC AIRCRAFT

UDC 621.3.019.34

*A. G. Kapustin, O. G. Karachun*

### PRINCIPLES OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF COMPLEX SYSTEMS OF FUTURE-PROOF AIRPLANES OF ALL ELECTRIC AIRCRAFT TYPE

#### **Аннотация**

Целью работы является формирование подхода к разработке алгоритма для проведения мероприятий по технической диагностике системы электроснабжения воздушного судна с полностью электрифицированным оборудованием типа *All electric aircraft*. На основании аналитических расчетов и имитационного моделирования в среде *MatLab* определены преимущества и недостатки различных методов диагностики (метод последовательных проверок и метод половинного разбиения) в применении к системе электроснабжения воздушного судна. Построены логическая модель системы диагностики, алгоритм диагностики методом последовательных проверок и алгоритм диагностики методом половинного разбиения. Показано дерево проверок и графическое представление алгоритма, позволяющее определить среднее число проверок для установления места отказа. Даны рекомендации по использованию рассмотренных методов диагностики с учетом степени глубины локализации отказов.

#### **Ключевые слова:**

техническая диагностика, система электроснабжения, воздушное судно, отказ системы, логическая модель, алгоритм диагностики.

#### **Abstract**

The purpose of the research is to form an approach to the development of an algorithm for carrying out technical diagnostics of the power supply system for an aircraft with fully electrified equipment of *All electric aircraft* type. Based on analytical calculations and simulation modeling in the *MatLab* environment, the advantages and disadvantages of various diagnostic methods have been identified (sequential test method and half split method) as applied to the aircraft power supply system. A logical model of the diagnostic system has been constructed, as well as a diagnostic algorithm using the sequential test method and a diagnostic algorithm applying the half split method. A test tree and a graphical representation of the algorithm are shown; the latter makes it possible to determine the average number of tests needed to establish the failure location. Recommendations are given for the use of the diagnostic methods considered, taking into consideration the depth of failure localization.

#### **Keywords:**

technical diagnostics, power supply system, aircraft, system failure, logical model, diagnostic algorithm.

#### **Введение**

Известно, что задачей мировой авиации является разработка перспективных воздушных судов по концепции

*All electric aircraft* (полностью электрический самолет) с целью усовершенствования аэродинамики, силовой установки, конструкции воздушного судна, технологичности, надежности, а также

повышения летно-технических характеристик [1, 2].

Элементы этой концепции внедряются на борт воздушного судна постепенно по мере разработки тех или иных вопросов. В настоящее время воздушные суда с элементами концепции *All electric aircraft* носят название самолета с полностью электрифицированным оборудованием (СПЭО). На таких воздушных судах все бортовые системы работают, используя только электроэнергию, полностью исключены системы, которые для своей работы требуют гидро-, пневмо- и другие виды энергии. К эксплуатируемым воздушным судам типа СПЭО относят самолеты A380, *Boeing 747 Dream liner*, *Boeing 777*, A400M, A300-600 *Beluga* и др. Однако с увеличением электрификации СПЭО возрастает мощность и роль системы электроснабжения и, как следствие, количество электрических компонентов и систем на борту воздушного судна [1]. Это способствует повышению вероятности возникновения отказов в системе электроснабжения, что, в свою очередь, требует решение задач диагностирования и локализации неисправностей (отказов) электрических компонентов системы.

Цель работы – сформировать подход к формированию алгоритма для проведения мероприятий по технической диагностике и определить преимущества и недостатки различных методов диагностики в применении к системе электроснабжения воздушного судна с полностью электрифицированным оборудованием.

Любая техническая система до проведения мероприятий по диагностике характеризуется одним из двух несовместных состояний: работоспособное и неработоспособное. Целью диагностики является определение соответствия диагностируемого объекта одному из этих состояний и локализации места отказа и его вида [3, 4].

Качество результата диагностики

основывается на использовании эффективных алгоритмов ее проведения. Выбор и разработка алгоритма в основном зависит от количества компонентов в составе диагностируемой системы, времени их тестирования и вероятности возникновения отказов [5, 6].

### **Описание модели диагностируемой системы**

Для исследования различных видов отказов и определения причинно-следственных связей в системе электроснабжения (СЭС) современного воздушного судна типа СПЭО использовалась ее виртуальная модель без резервирования [1–3].

Для разработки алгоритма диагностики модель СЭС разбивается на шесть условных уровней, которые показаны на структурной схеме системы (рис. 1). На структурной схеме блоками с номерами обозначены условно выделенные уровни системы электроснабжения. Стрелками обозначены выходные сигналы каждого блока, которые являются входными сигналами для других, функционально связанных с ними блоков.

Первый уровень 1 включает механический привод генератора (*Mechanical engine*) и моделируется простым построителем сигналов. Второй уровень 2 – система генерирования электроэнергии (генератор переменного тока *Power Generation* и его регулятор напряжения *Generator Control Unit*). Третий уровень 3 – система первичного распределения электроэнергии в составе датчиков тока и напряжения и контакторов, управляемых блоком генератора (*Generator Control Unit*). Четвертый уровень 4 – это вторичная система распределения электроэнергии *Secondary Distribution* (автоматические выключатели с регулируемым отключением по току). Пятый уровень 5 представляет собой нагрузки переменного тока (*1kW Lamp*, *12 kVA induction motor driving hydraulic pump*, *2 kW Brushless motor driving a*

*ballscrew actuator*). Шестой уровень 6 включает в свой состав нагрузки постоянного тока: резистивные нагрузки (*Lamp, Heater*), двигатель постоянного

тока (*Brush Motor driving a fuel pump*), блок трансформаторов и выпрямитель (*Transformer and Rectifier Unit (TRU)*).

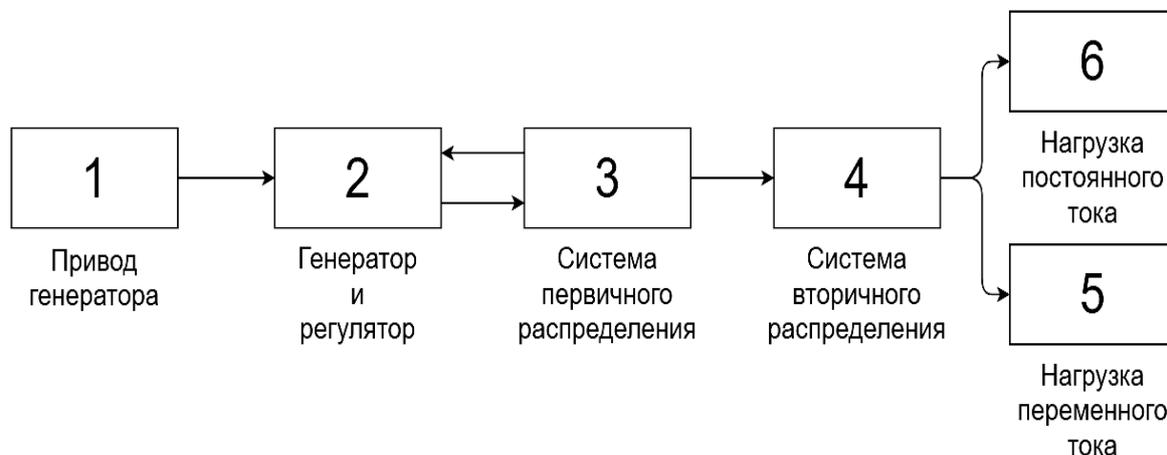


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения

Авиационный двигатель (*Mechanical engine*) и генератор переменного тока с регулятором (*Generator and regulator*) связаны посредством механического привода (см. рис. 1, блок 1). На схеме эти связи изображены последовательно. Таким образом, если выходной сигнал авиадвигателя входит в область недопустимых значений генератора, то дальнейшая работа генератора также будет некорректной и на его выходе появится сигнал из области недопустимых значений.

### Разработка логической схемы

Блок, из которого выходит стрелка (рис. 2), является причиной, а блок, к которому подходит стрелка, – следствием отказа. Таким образом, отказ авиадвигателя влечет за собой отказ генератора; отказ генератора или регулятора вызывает отказ в системе первичного распределения; отказ в системе первичного распределения обуславливает отказ в системе вторичного распределения; отказы в нагрузке переменного и постоянного тока являются след-

ствием отказа в системе вторичного распределения. Следует отметить, что отказ в системе первичного распределения вызывает отказ генератора или регулятора напряжения, т. к. они связаны обратной связью. Таким образом, каждый компонент «отвечает» за отказ в уровне, следующем за ним в структурной схеме. Исключением является система первичного распределения, отказ в которой приводит еще и к отказу в уровне, предшествующем ей.

Так как все электрические компоненты системы электроснабжения могут иметь только два состояния – 1 (работоспособное) и 0 (неработоспособное), то следует определить соответствие состояний данных (1, 0) в цифровой системе данным о техническом состоянии компонентов выделенного уровня [3, 5]. Выходной сигнал каждого уровня может иметь только два значения: 1 или 0. Единица соответствует выходному сигналу, который находится в области допустимых значений, ноль, соответственно, сигналу из области недопустимых значений. Следует отметить, что область допустимых значений

для выходного сигнала предшествующего блока не охватывает всю область допустимых значений для входного

сигнала последующего блока. График распределения областей допустимых значений изображен на рис. 2.

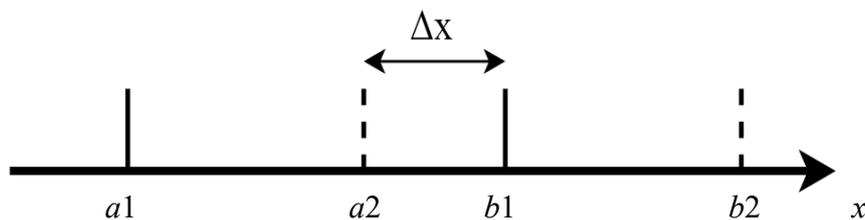


Рис. 2. Область допустимых значений

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $[a1; b1]$  – области допустимых значений выходного сигнала;  $[a2; b2]$  – области допустимых значений входного сигнала;  $\Delta x$  – общая область допустимых значений, применяемая для определения значения состояния выходного сигнала;  $x$  – множество значений для выходного и входного сигналов. Исходя из графика (см. рис. 2), определим два множества:  $x1 = [a1; b1]$ ;  $x2 = [a2; b2]$ , по которым можно определить области допустимых и недопустимых значений входных и

выходных сигналов системы.

Таким образом, если выходной сигнал попадает в область пересечения множеств  $x1$  и  $x2$  ( $\Delta x$ ), то он находится в области допустимых значений, и отказов в системе нет. Исходя из этого, формируется условие работоспособности для диагностируемого уровня

$$x \in \Delta x.$$

На основании данного условия составляется таблица состояний системы электроснабжения (табл. 1).

Табл. 1. Состояния системы электроснабжения

Номер состояния	Значение выходного сигнала					
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
$S_1$	1	1	1	1	1	1
$S_2$	1	1	1	1	1	0
$S_3$	1	1	1	1	0	1
$S_4$	1	1	1	1	0	0
$S_5$	1	1	1	0	0	0
$S_6$	1	0	0	0	0	0
$S_7$	1	0	0	0	0	0
$S_8$	0	0	0	0	0	0

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $S_i$  – номер состояния;  $x_n$  – выходной сигнал  $n$ -го блока системы электроснабжения (см. рис. 1).

Из табл. 1 видно, что состояния  $S_6$  и  $S_7$  являются неразличимыми, т. к. стро-

ки, соответствующие этим состояниям, одинаковые. Поэтому объединяем строки, соответствующие неразличимым состояниям и тогда таблица примет следующий вид (табл. 2).

Табл. 2. Объединенная таблица состояний системы электроснабжения

Номер состояния	Значение выходных сигналов					
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
$S_1$	1	1	1	1	1	1
$S_2$	1	1	1	1	1	0
$S_3$	1	1	1	1	0	1
$S_4$	1	1	1	1	0	0
$S_5$	1	1	1	0	0	0
$S_6$	1	0	0	0	0	0
$S_7$	0	0	0	0	0	0

На основании табл. 2 составлено уравнение булевой алгебры (1), одно-

значно определяющее все возможные состояния системы электроснабжения:

$$\begin{aligned}
 Z_s = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_6) = & (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge X_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge X_6) \vee \\
 & \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee (X_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6) \vee \\
 & \vee (\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3 \wedge \bar{X}_4 \wedge \bar{X}_5 \wedge \bar{X}_6).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Данное уравнение позволяет реализовать логическую модель работы предлагаемой системы диагностирования. С помощью логической модели упрощается написание программного кода микроконтроллера, на котором реализуется разрабатываемая система диагностики.

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:  $Z_s$  – выходной сигнал системы диагностирования;  $\varphi$  – функция, объединяющая зависимости

состояний системы и значения выходных сигналов каждого компонента системы электроснабжения. Каждая дизъюнкция характеризует одно из состояний диагностируемой системы, характеризующейся отказом, и соответствует определенному виду отказа.

По уравнению (1) составлена логическая схема диагностирования технического состояния системы электроснабжения (рис. 3).

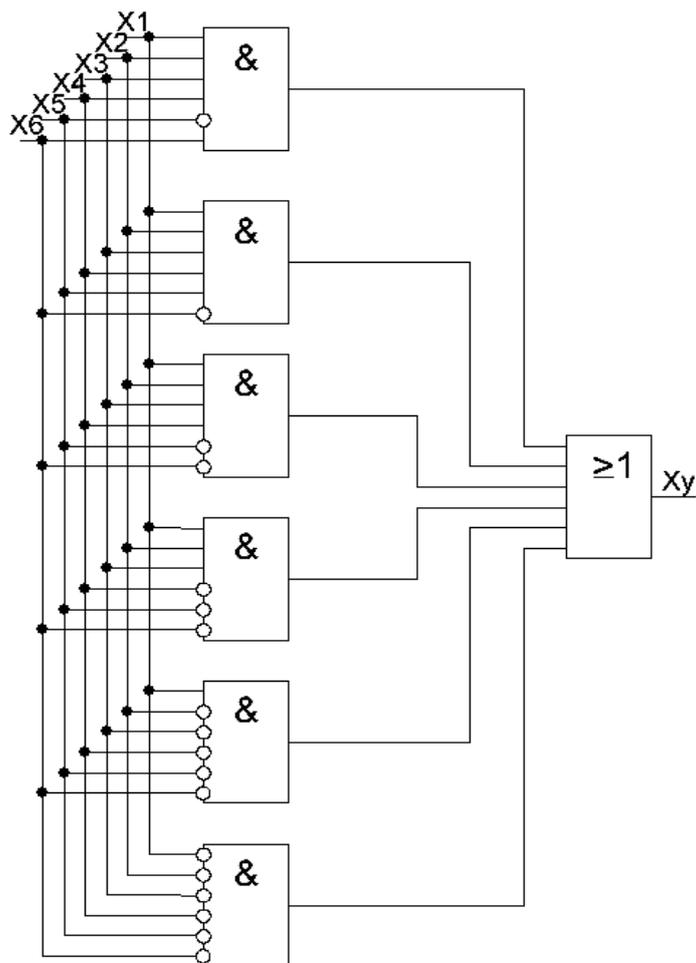


Рис. 3. Логическая модель системы диагностирования

Диагностическая модель системы достаточно легко реализуется на интегральных микросхемах. Немаловажным достоинством является возможность реализации данной логической модели диагностирования с помощью нанотранзисторов, что значительно сократит объем и габариты системы диагностирования [7, 8].

Для эффективной работы системы диагностирования, учитывая особенности функционирования системы генерирования электроэнергии (см. рис. 1, уровень 2), система диагностирования должна проводить диагностику уровней системы электроснабжения через интервалы времени менее 0,1 с. Это позволит практически мгновенно выявлять отказы, открывая возможности создания практически безынерционной системы

защиты системы электроснабжения и ее электрических компонентов.

Информация, получаемая от системы диагностирования, может быть использована для построения защиты системы электроснабжения от аварийных ситуаций, например, защиты от коротких замыканий, чрезмерного повышения напряжения и др.

#### *Исследование методов диагностики*

Для исключения неразличимых состояний генератор и система первичного распределения электроэнергии объединены в один блок с общим входным и выходным сигналами [4–6]. Тогда структурная схема системы электроснабжения (см. рис. 1) примет вид (рис. 4).

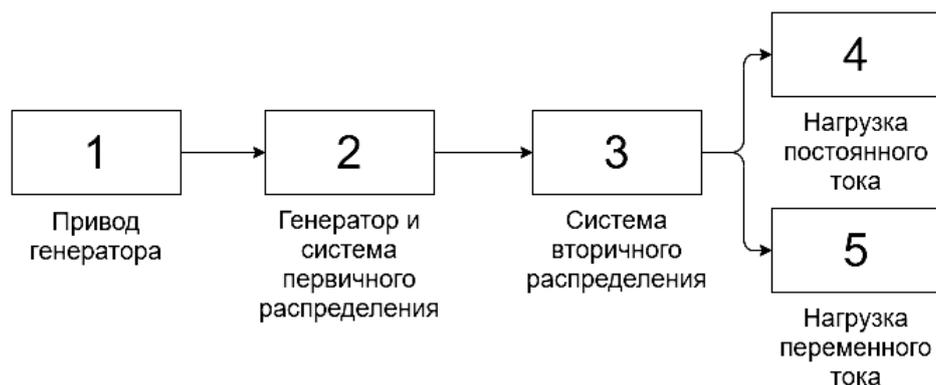


Рис. 4. Обновленная структурная схема системы электроснабжения

В рассматриваемом случае данные о надежности компонентов СЭС и продолжительности их проверок отсутствуют, поэтому проверки выполняются в случайной (произвольной) последовательности. Последовательность соответствует расположению компонентов на борту воздушного судна или определяется какими-либо субъективными факторами [4–6].

При случайном выборе проверок существенным параметром является среднее число проверок  $N_{\text{cp}}$ , которое может быть определено в предположении равных вероятностей отказа всех компонентов ( $q_i = 1/n$ ) следующим образом:

$$N_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^{n-1} i \cdot q_i + (n-1) \cdot q_n =$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} \frac{i}{n} + \frac{n-1}{n} = \frac{(n-1)(n+2)}{2n}.$$

Как было показано ранее, типовая система электроснабжения воздушного судна состоит из пяти уровней. Поэтому при проведении диагностики системы следует принять во внимание, что при отказе на уровне 4 или 5 (см. рис. 4) вы-

ходные сигналы всех уровней соответствуют области допустимых значений. Таким образом, при наличии информации об отказе в системе и соответствии выходных сигналов уровней 1–3 следует утверждать об отказе на уровне 4 или 5. Данное условие показывает, что при этой ситуации нет необходимости определять выходные сигналы уровней 4 и 5 даже при исправности всех остальных уровней (см. рис. 4). Тогда среднее число проверок для определения уровня, на котором произошел отказ, определяется для трех следующих уровней (см. рис. 4): *Mechanical engine, Generator and primary distribution, Secondary distribution* и составляет:

$$N_{\text{cp}} = \frac{(n-1)(n+2)}{2n} =$$

$$= \frac{(3-1)(3+2)}{2 \cdot 3} = 1,67.$$

Таким образом, среднее число проверок для определения отказа в системе электроснабжения равно 1,67 проверкам. Для этого случая дерево условного теста представлено на рис. 5.

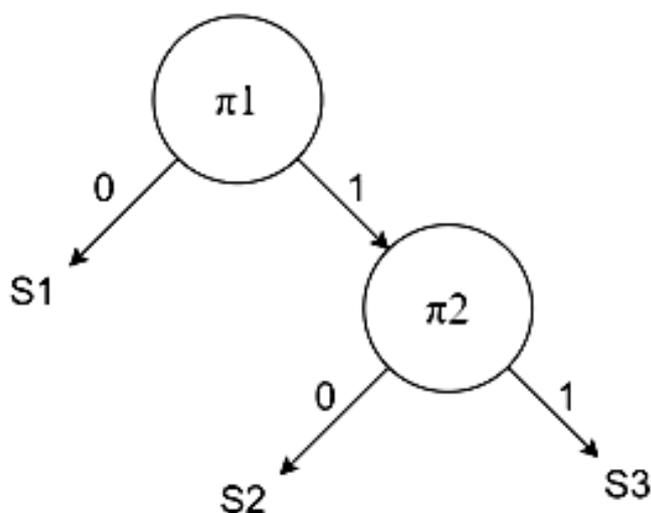


Рис. 5. Дерево условного теста

Для локализации места отказа в системах с большим количеством компонентов выявление носителей дефектов может выполняться не только в индивидуальном порядке, но и групповой проверкой компонентов по участкам системы. Данный подход имеет преимущество в том случае, если количество компонентов в диагностируемой системе больше или равно восьми [3–5]. При этом последовательность проверок по выявлению дефекта состоит в том, что диагностируемый объект делится на две части и одна из этих частей подвергается проверке. Если проверяемый участок оказывается исправным, то входящие в него компоненты дальнейшей проверке не подлежат. Поиск дефекта ведется на другой половине схемы объекта, которая снова разбивается на две части, одна из которых проверяется для выявления дефекта. В результате нескольких последовательных разбиений всего множества компонентов на все более ограниченные подмножества производится постепенная локализация отказа и отказавший уровень выявляется [4, 6]. Выполним данную про-

цедуру для модели системы электропитания воздушного судна. Результат такой процедуры представлен на рис. 6, где приняты следующие обозначения: 1–8 – номера проверок; «+» – участок исправен; «–» – участок неисправен.

Метод половинного разбиения применяется в том случае, когда данные о надежности компонентов объекта и продолжительности их проверок отсутствуют или не могут быть учтены либо, когда затраты времени на выполнение проверок примерно одинаковы. Разбиение схемы объекта производится на участки, примерно равные по количеству компонентов. Очередной проверке подвергается любой из двух образованных участков схемы. Необходимое число проверок и последовательность их выполнения определяются следующим образом. Представим количество компонентов в объекте  $n$  в следующем виде:

$$n = 2^m + R,$$

где  $R$  – количество компонентов сверх полной степени числа  $Z$ ,  $0 < R < n/2 < 2^m$ ,  $Z = 2^m$ .

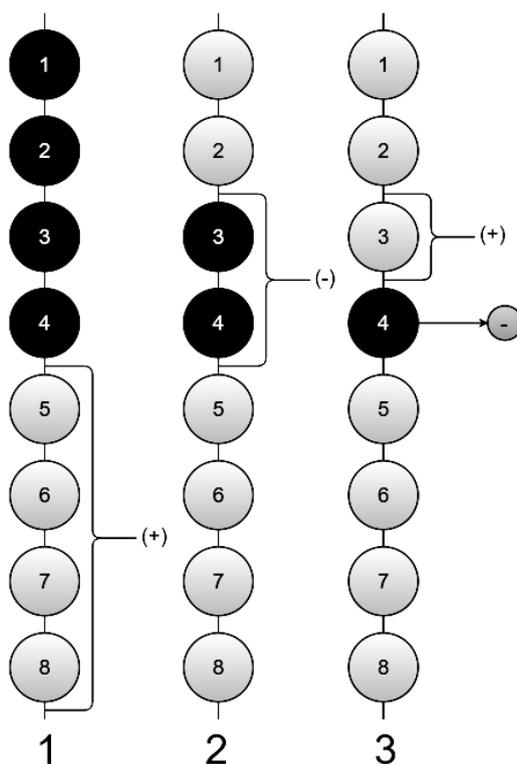


Рис. 6. Схема последовательности поиска дефекта методом половинного разбиения

Согласно этой методике рассмотрим схему проверок для объекта, состоящего из восьми компонентов (см. рис. 6). Из рис. 6 видно, что  $N_{\min} = m = 2,5$ , где  $N_{\min}$  – минимальное число проверок;  $N_{\max} = 3,5 = m + 1$  (для  $R \neq 0$ ). Отсюда следует вывод о том, что при  $m$  проверках отказ может быть обнаружен в одном из  $(n - 2 \cdot R)$  уровней, в данном случае из  $m = (8 - 2 \cdot 2,3) = 4,6$  уровней.

Для определения среднего числа проверок  $N_{\text{ср}}$  необходимо учесть количество компонентов, которые подвергаются проверке с номерами  $m$  и  $m + 1$ , и суммарную приведенную вероятность отказа каждой из этих групп:

$$N_{\text{ср}} = m \sum_{i=1}^{n-2R} q_i + (m + 1) \sum_{i=1}^{2R} q_i,$$

где  $q_i$  – равная вероятность отказов всех компонентов ( $q_i = 1/n$ ).

При одинаковых значениях приведенных вероятностей отказов компо-

нентов получим

$$\sum_{i=1}^{n-2R} q_i = (n - 2R) \frac{1}{n};$$

$$\sum_{i=1}^{2R} q_i = 2R \frac{1}{n}.$$

Следовательно,

$$N_{\text{ср}} = m \cdot \frac{n - 2R}{n} +$$

$$+ (m + 1) \frac{2R}{n} = m + \frac{2R}{n}.$$

Исходя из анализа рис. 7, имеем  $N_{\text{ср}} = 2,5 + 2 \cdot 2,3/8 = 1,4$ , т. е. при проверке методом половинного разбиения сокращается количество среднего числа проверок.

### Заключение

Таким образом, при выявлении неисправностей в системе электроснабжения перспективных воздушных судов следует обратить внимание на количество функционально значимых уровней и на необходимую степень глубины локализации отказа.

При определении отказов на уровнях с учетом обратных связей и объединении в этих уровнях компонентов, охваченных данными связями, достаточно использовать метод последовательных проверок, т. к. такой метод характеризуется простотой и относительной прозрачностью самого алгоритма [3, 6]. Однако степень глубины локализации при этом остается малой и определить место отказа с точностью до

блока с использованием метода последовательных проверок затруднительно (при использовании данного метода для систем с большим количеством компонентов и без объединения блоков, охваченных обратной связью, в один уровень метод становится слишком громоздким). Следовательно, увеличивается среднее количество проверок для выявления отказа, алгоритм теряет все свои преимущества и становится нецелесообразным.

При необходимости достичь повышенной степени глубины локализации отказов целесообразно использовать метод половинного разбиения. При этом также будет уменьшаться среднее количество проверок в сравнении с методом последовательных проверок.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор разработок полностью электрических самолетов / Е. Е. Тулинова [и др.] // *Электричество*. – 2016. – № 4. – С. 15–25.
2. **Моир, И.** Интеграция механических, электрических и авиационных подсистем авиационных систем / И. Моир, А. Сиабридж // John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Южные Ворота, Чичестер, Западный Суссекс PO19 8SQ, Англия, 2008. – 504 с.
3. **Схиртладзе, А. Г.** Надежность и диагностика технологических систем / А. Г. Схиртладзе. – Москва: Новое знание, 2008. – 518 с.
4. **Половко, А. М.** Основы теории надёжности / А. М. Половко. – Москва: Наука, 2007. – 249 с.
5. **Крестин, Е. А.** Диагностика машин и оборудования: учебное пособие / Е. А. Крестин, И. Е. Крестин. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 376 с.
6. **Калитенков, Н. В.** Надежность и диагностика транспортного радиооборудования и средств автоматизации: учебное пособие / Н. В. Калитенков, В. С. Солодов. – Москва: МОРКНИГА, 2012. – 521 с.
7. **Карачун, О. Г.** Development of diagnostic models of the typical aircraft power supply system / О. Г. Карачун, А. Г. Капустин // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXV Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч.* – Пенза: Наука и Просвещение, 2019. – Ч. 1. – 330 с.
8. **Мержи, И.** Практическое руководство по логическим микросхемам и цифровой схемотехнике: пер. с англ. / И. Мержи. – Москва: Пресс, 2007. – 256 с.

*Статья сдана в редакцию 2 декабря 2020 года*

**Александр Григорьевич Капустин**, канд. техн. наук, доц., Белорусская государственная академия авиации. E-mail: kapustin2649@mail.ru.

**Олег Геннадьевич Карачун**, стажер мл. науч. сотрудника, Белорусская государственная академия авиации. E-mail: oleg.karachun.99@mail.ru.

**Alexander Grigoryevich Kapustin**, PhD (Engineering), Associate Prof, Belarussian State Academy of Aviation. E-mail: kapustin2649@mail.ru.

**Oleg Gennadievich Karachun**, Research Assistant Trainee, Belarussian State Academy of Aviation. E-mail: oleg.karachun.99@mail.ru.

---

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко*

**МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (СДПМ) СО ВСТРОЕННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ МАГНИТОВ В РОТОРЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА**

---

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, A. G. Kondratenko*

**MODEL OF ELECTRIC DRIVE BASED ON A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (PMSM) WITH BUILT-IN ARRANGEMENT OF MAGNETS IN THE ROTOR AND FLOW REGULATION**

---

**Аннотация**

На основе структурной схемы синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) со встроенным расположением магнитов в роторе разработана модель электропривода с возможностью ослабления потока двигателя и реализацией регулирования скорости двигателя выше номинальной. Представлены результаты моделирования работы электропривода на базе СДПМ по разработанной модели.

**Ключевые слова:**

синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) со встроенными магнитами в ротор, ослабление потока, регулирование скорости, составляющие тока статора, графики изменения момента, скорости, тока и потока.

**Abstract**

Based on the block diagram of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with a built-in arrangement of magnets in the rotor, a model of an electric drive has been developed with the possibility of flux attenuation and regulation of motor speed above the nominal speed. The results of modeling the operation of the PMSM-based electric drive according to the model developed are presented.

**Keywords:**

permanent magnet synchronous motor (PMSM) with built-in magnets in the rotor, flux attenuation, speed regulation, stator current components, graphs of torque, speed, current and flux change.

---

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) не имеют электрических потерь в роторе, связанных с формированием магнитного потока ротора. Они находят все более широкое применение в современных разработках регулируемого электропривода переменного тока вместо асинхронных двигателей, несмотря на проблемы использования высокоэнергетических магнитов на основе редкоземельных ме-

таллов (низкий гарантированный срок службы магнитов, высокая стоимость магнитов). СДПМ конструктивно имеют различное исполнение. В зависимости от расположения постоянных магнитов на роторе различают СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и СДПМ со встроенными магнитами в ротор (рис. 1, магниты – более темные элементы конструкции ротора).

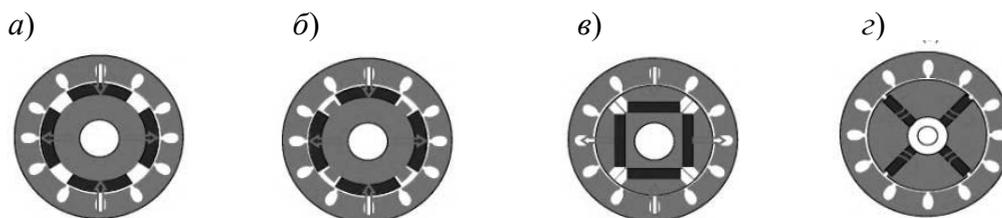


Рис. 1. Расположение магнитов в СДПМ: а, б – поверхностное расположение магнитов на роторе (PMSM); в, з – магниты встроены в ротор (IPMSM)

Расположение магнитов существенно влияет на характеристики СДПМ. В зависимости от их расположения при вращении ротора различны расчетные значения магнитных проводимостей в воздушном зазоре от магнитного потока магнитов. Для двигателей с поверхностным расположением магнитов магнитная проводимость рабочего зазора практически не меняется. Соответственно, расчетные значения индуктивностей  $L$  по осям  $d$  и  $q$  одинаковы. Для двигателей со встроенными магнитами в роторе эти индуктивности различны, они определяют дополнительную (реактивную) составляющую развиваемого двигателем момента, а также возможность регулирования скорости выше номинальной за счет ослабления потока двигателя для соответствующих нагрузочных моментов при допустимых потерях в двигателе.

В [1] показана возможность более энергоэффективного использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов за счет увеличения скорости кабины в этих режимах. Реализуется режим увеличения скорости за счет ослабления потока, например СДПМ, при работе лифта в генераторном режиме, что по тепловым режимам работы возможно только при использовании тихоходного двигателя, обеспечи-

вающего допустимые по нагреву потери при ослаблении потока. СДПМ с поверхностным расположением магнитов такой режим работы лифта не обеспечивает [2, 3]. Использование СДПМ со встроенными магнитами в ротор или асинхронного низкоскоростного двигателя возможно в этом случае [4].

Уравнения электрического равновесия СДПМ со встроенными магнитами в ротор в осях  $d$ – $q$  и выражение момента двигателя имеют вид [4]:

$$U_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} + L_d \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_{эл} \cdot L_q \cdot i_{1q};$$

$$U_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + L_q \cdot \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_{эл} \cdot (L_d \cdot i_{1d} + \psi_m);$$

$$M = \frac{3}{2} p \cdot [\psi_m \cdot i_q - (L_q - L_d) \cdot i_q \cdot i_d],$$

где  $L_d$ ,  $L_d$  – индуктивности по осям;  $\omega_{эл}$  – электрическая частота вращения;  $p$  – число пар полюсов;  $\psi_m$  – потокосцепление;  $R_1$  – сопротивление.

Структурная схема СДПМ, соответствующая этим уравнениям, показана на рис. 2.

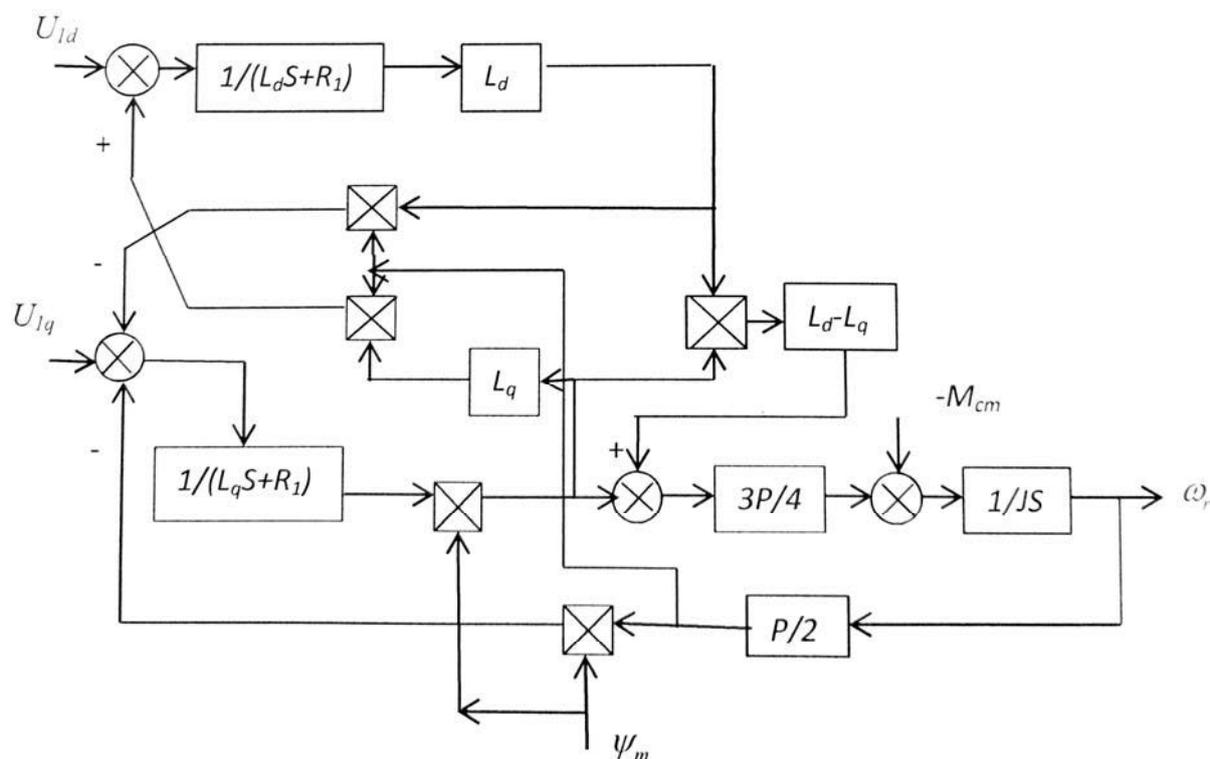


Рис. 2. Структурная схема СДПМ со встроенными магнитами в ротор

На базе данной структурной схемы может быть разработана модель электропривода с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной за счет ослабления потока СДПМ.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления электроприводом на базе СДПМ, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [5]. Например, САУ приводом лифта может быть реализована с контролем ограничения напряжения, формируемого на двигателе, в соответствии с условием  $U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2$ , где  $U_s$  – амплитудное значение номинального напряжения двигателя ( $U_{dc}$  – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты),  $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ . С увеличением скорости двигателя выше  $\omega_{ном}$  при превышении напряжением на дви-

гателе значения  $U_s$  привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования отрицательной составляющей тока  $i_d$  с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального. Структурная схема системы автоматического управления (САУ) электроприводом в осях  $d-q$ , реализующая этот вариант, показана на рис. 3 (блок voltage decoupling – компенсация перекрестных связей).

Номинальное напряжение, формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты  $U_{dc}$  и способом реализации ШИМ инвертором. При увеличении скорости задания выше номинальной и соответствующем увеличении напряжения  $U$  на двигателе ( $U$  больше номинального значения) вступает в работу контур ограничения напряжения на двигателе, задающий отрицательную составляющую тока  $i_d$ , формирующего поток двигателя. Привод переходит в режим работы регули-

рования (ослабление) потока машины с контролем перегрузки по току и поддержанием напряжения на двигателе не превышающим  $U_{ном}$ . Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и скорости и ПИ-регулятором в контуре поддержания напряжения. На основе структурной

схемы электропривода (см. рис. 3) разработана в среде MATLAB имитационная модель электропривода с параметрами механической подсистемы, соответствующими безредукторному приводу пассажирского лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с (рис. 4). При моделировании использован СДПМ с расчетными параметрами, приведенными в табл. 1.

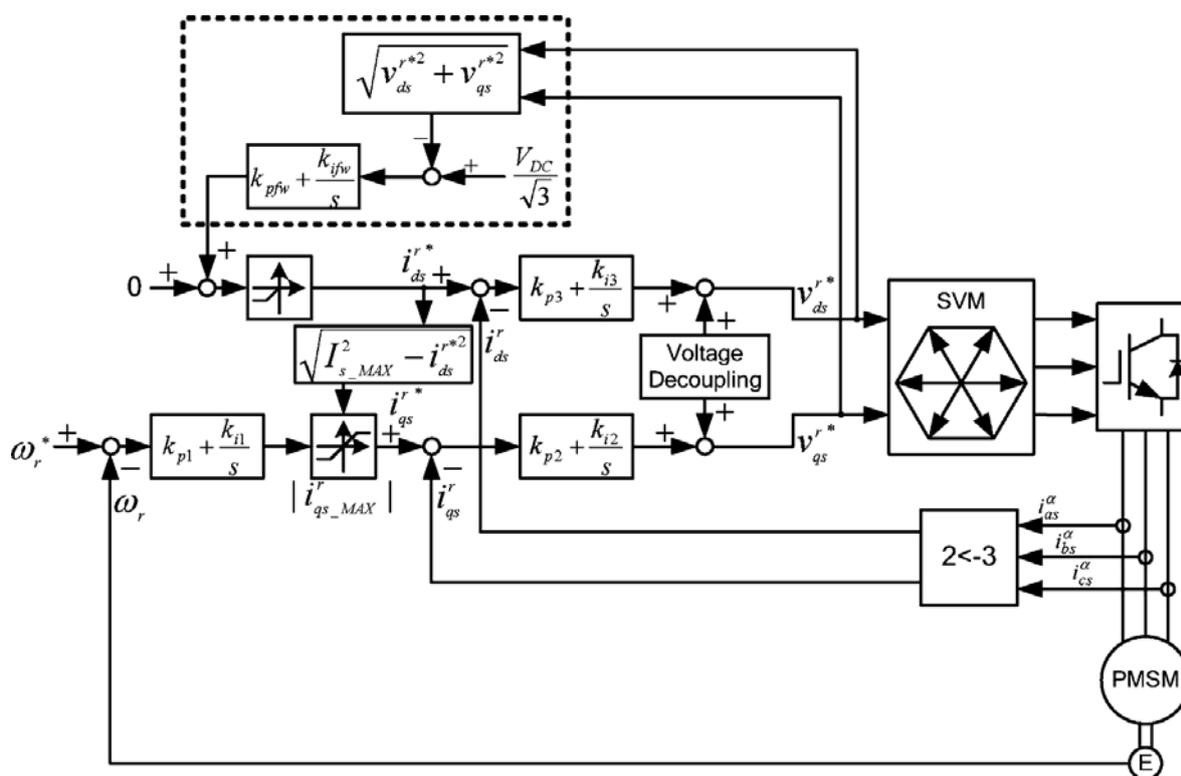


Рис. 3. Структурная схема САУ электроприводом в осях  $d-q$

Табл. 1. Расчетные параметры СДПМ, использованные при моделировании

$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$R$ , Ом	$M_{ном}$ , Н·м	$I_{ном}$ , А	$P_{ном}$ , Вт	$L_q$ , Гн	$L_d$ , Гн	$\Omega_{max}$ , с <sup>-1</sup>	$\Psi_{ном}$ , Вб	$\Omega_{ном}$ , с <sup>-1</sup>
4,5	0,652	710	12,4	3400	0,065	0,041	6,33	4,87	4,88

На схеме (см. рис. 4) блоки Interval Test1 и Interval Test2 соответственно формируют команды на работу СДПМ с постоянным потоком и начало режима работы с ослабленным потоком (рис. 6 – ослабление потока СДПМ на проме-

жутке времени с 5 до 15,4 с). Переключение происходит по сигналу задания скорости с блока задания скорости Signal Bilder3 при скорости двигателя больше 5 м/с.

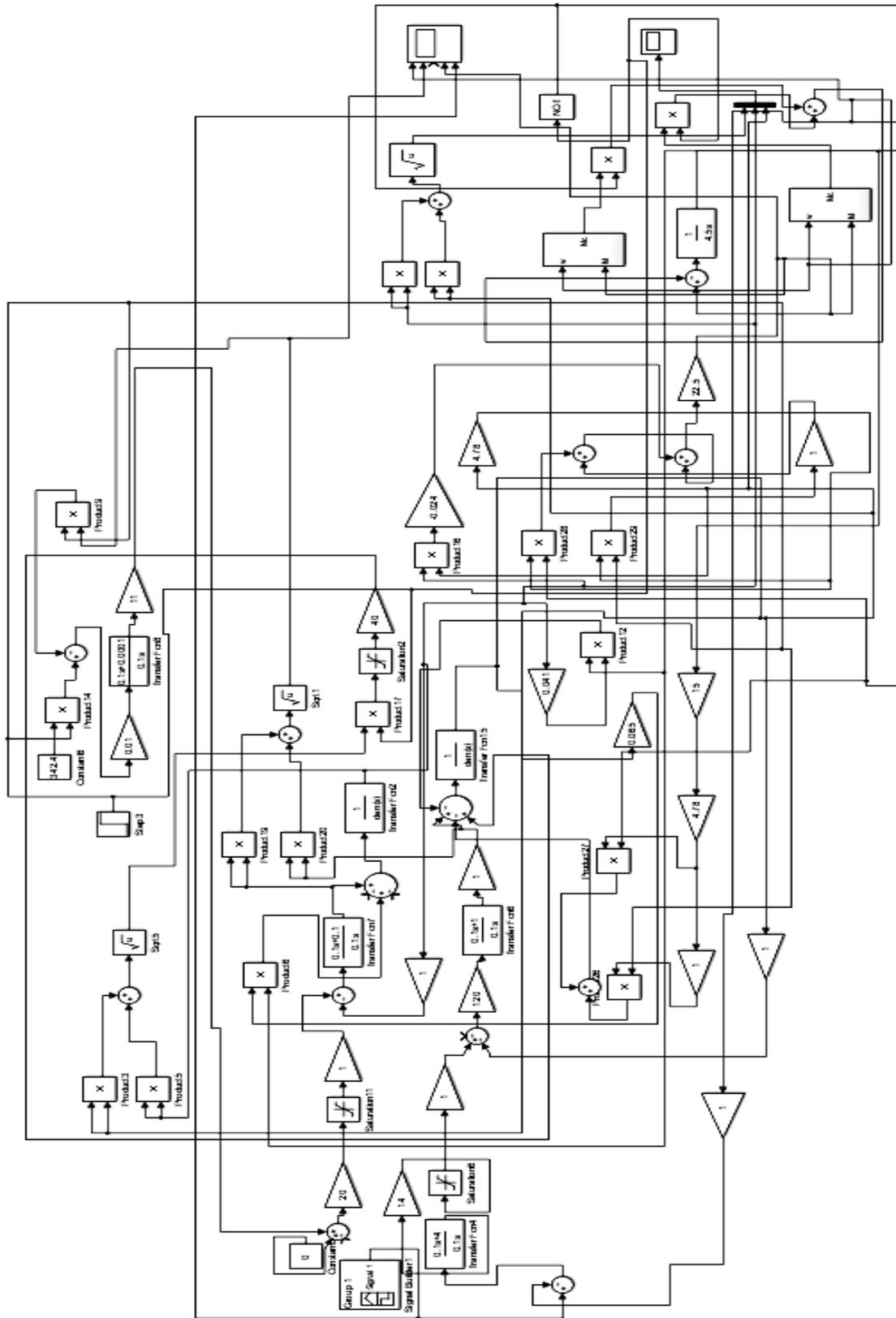


Рис. 4. Имитационная модель электропривода

В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{p+1}{0,1p}$$

Нагрузка формируется двумя блоками (выход блоков  $M_c$ ): соответственно для случая работы СДПМ с постоянным потоком (момент нагрузки 300 Н·м)

и с ослабленным (момент нагрузки 50 и 300 Н·м) (см. рис. 6) [6]. Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствии со схемой на рис. 2. Моделирование СДПМ реализовано по структурной схеме на рис. 3. Результаты моделирования работы электропривода показаны на рис. 5–9.

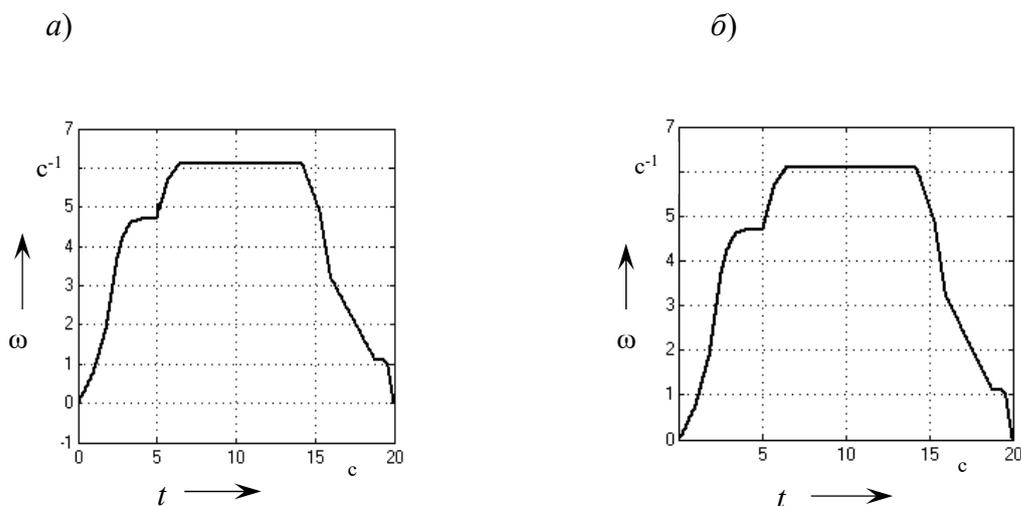


Рис. 5. Графики: *a* – тахограмма задания скорости; *б* – тахограмма скорости на модели

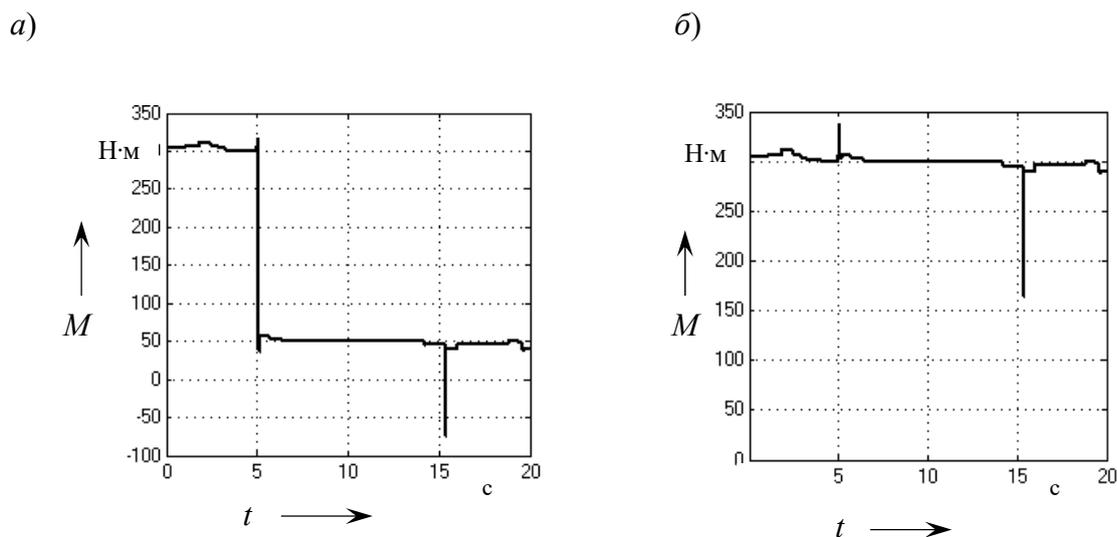


Рис. 6. Графики момента при пуске ( $M_c = 300$  Н·м) и в режиме регулирования потока: *a* – при  $M_c = 300$  Н·м; *б* – при  $M_c = 50$  Н·м

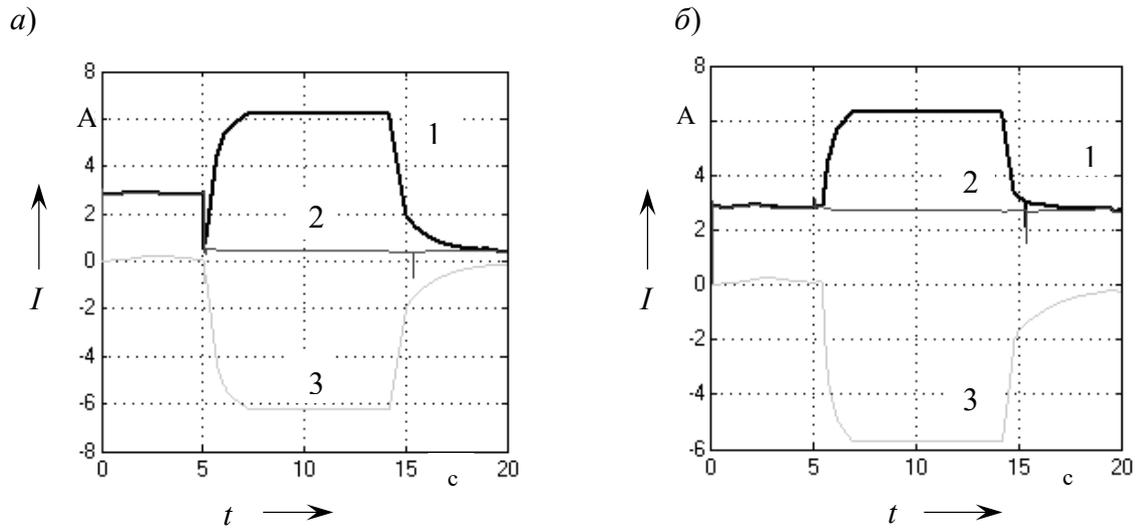


Рис. 7. Графики изменения тока двигателя: а – при  $M_c = 50$  Н·м; б – при  $M_c = 300$  Н·м; 1 – ток статора; 2 – составляющая тока  $i_q$ ; 3 – составляющая тока  $i_d$

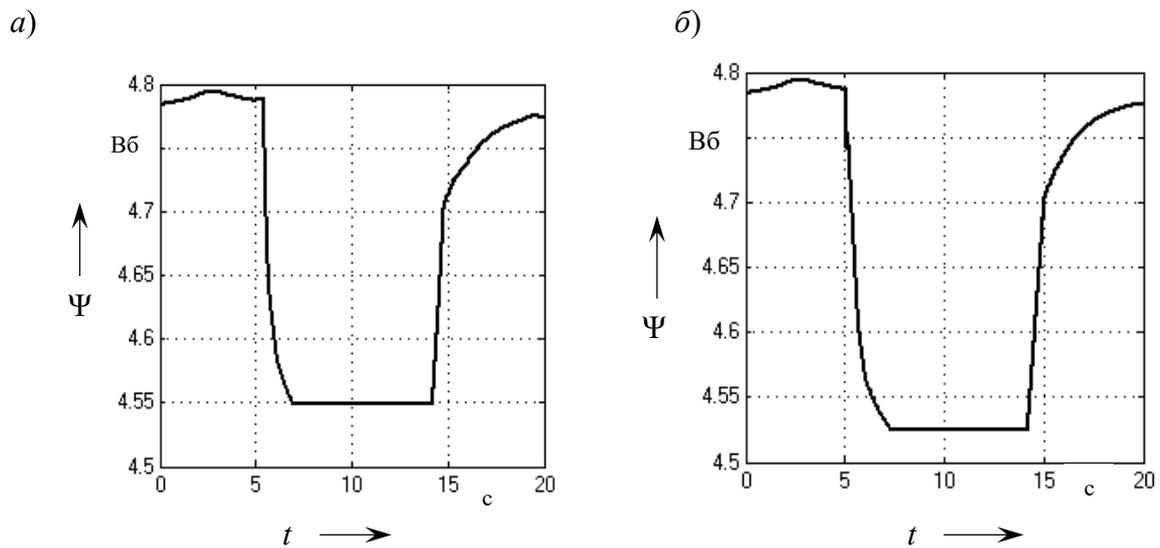


Рис. 8. Графики регулирования потока двигателя: а – при  $M_c = 300$  Н·м; б – при  $M_c = 50$  Н·м

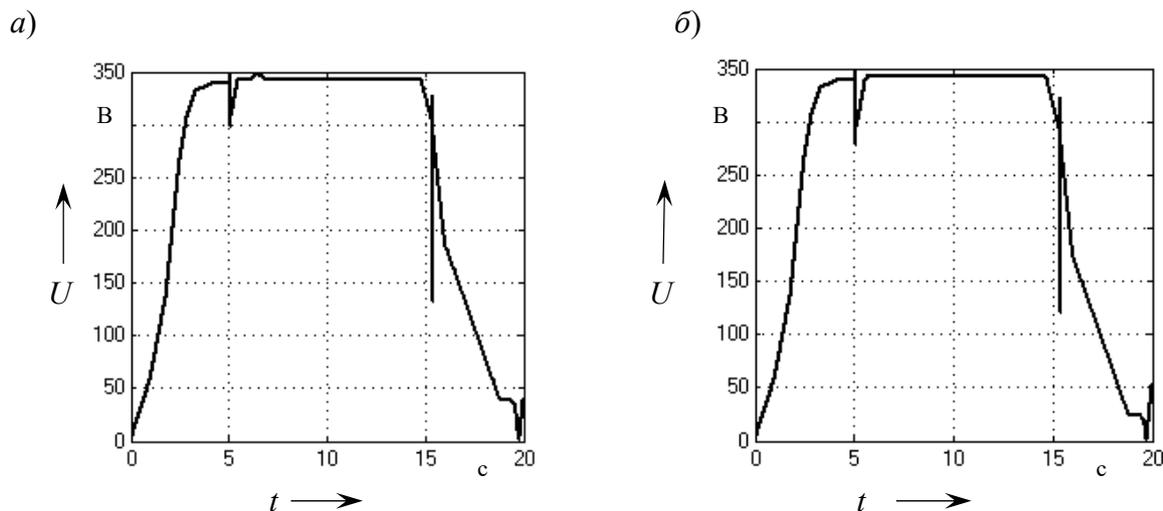


Рис. 9. Графики изменения напряжения на двигателе при регулировании потока: а – при  $M_c = 300$  Н·м; б – при  $M_c = 50$  Н·м

Осциллограммы изменения регулируемых параметров электропривода на базе СДПМ показывают работоспособность разработанной модели электропривода. Модель позволяет реализовать двухзонный режим работы электропривода с увеличением скорости двигателя выше номинальной за счет регулирования потока. Смоделирован режим работы при увеличении скорости на 30 % выше номинала для двух нагрузок в режиме ослабления потока: 50 и 300 Н·м. В отличие от СДПМ с поверхностным расположением магнитов в этом режиме для СДПМ со встроенными в ротор магнитами ток двигателя не превышает номинальное значение. Соответственно, данный тип двигателя может быть применен для реализации режима работы безредукторного привода лифта [1] с использованием повышенной скорости движения кабины лифта в рекуперативных режимах.

Таким образом, разработана модель регулируемого электропривода переменного тока на базе СДПМ со встроенными магнитами в ротор. Эта модель позволяет и для безредукторного привода лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины

лифта моделировать основные режимы его работы. Моделирование электропривода с СДПМ со встроенными магнитами в ротор двигателя показывает принципиальную возможность реализации безредукторного регулируемого электропривода лифта, например на базе СДПМ со встроенными магнитами в ротор, обеспечивающего движение кабины лифта в рекуперативных режимах работы со скоростью выше номинальной с целью увеличения энергоэффективности лифта.

### Выводы

Предложена модель регулируемого электропривода переменного тока с СДПМ со встроенным расположением магнитов в роторе двигателя, позволяющая и для безредукторного привода лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины лифта моделировать режимы его работы при увеличении скорости кабины лифта выше номинальной. Моделирование работы электропривода с СДПМ со встроенными магнитами в ротор двигателя при регулировании потока двигателя показывает возможность реализации безредукторного электропри-

вода лифта, обеспечивающего движение кабины лифта в рекуперативных режимах работы со скоростью выше номи-

нальной с целью увеличения энергоэффективности лифта.

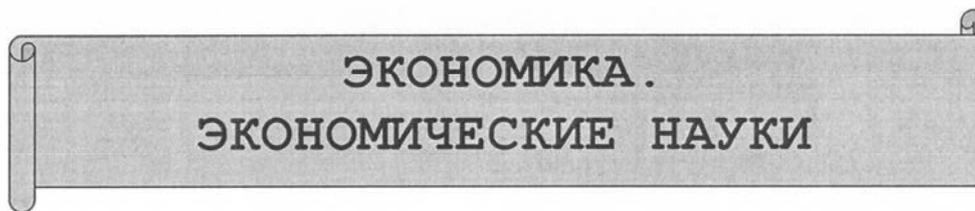
#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. **Коваль, А. С.** Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока / А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 121–129.
4. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
5. **Ping-Yi Lin.** Control Technique for the Extension of DC-Link Voltage Utilization of Finite-Speed SPMSM Drives / Ping-Yi Lin, Yen-Shin Lai // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2012. – Vol. 59, № 9.
6. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB / Р. Т. Шрейнер [и др.] // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, № 8 (19).

*Статья сдана в редакцию 5 января 2021 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Алексей Григорьевич Кондратенко**, аспирант, Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyevich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Aleksey Grigoryevich Kondratenko**, PhD student, Belarusian-Russian University.



---

УДК 378.1

*Л. А. Климова*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОГО ПОТЕНЦИАЛА  
СТУДЕНТОВ БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В РАМКАХ  
РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРОЕКТА «УНИВЕРСИТЕТ 3.0»**

---

UDC 378.1

*L. A. Klimova*

**STUDY ON ENTREPRENEURIAL POTENTIAL OF BELARUSIAN-RUSSIAN  
UNIVERSITY STUDENTS WHILE IMPLEMENTING THE UNIVERSITY 3.0  
PILOT PROJECT**

---

**Аннотация**

Проведено исследование уровня предпринимательского потенциала студентов, а также предпринимательской среды Белорусско-Российского университета в рамках реализации экспериментального проекта «Университет 3.0». Предложены мероприятия по повышению уровня предпринимательской активности студентов и улучшению имиджа университета как предпринимательского учреждения образования.

**Ключевые слова:**

исследование, предпринимательский потенциал, предпринимательская среда, поддержка предпринимательства.

**Abstract**

The research into the level of entrepreneurial potential of students, as well as entrepreneurial environment of the Belarusian-Russian University has been conducted within the framework of the University 3.0 pilot project. Measures are proposed to increase the level of entrepreneurial activity of students and to improve the image of the university as an entrepreneurial educational institution.

**Keywords:**

research, entrepreneurial potential, entrepreneurial environment, entrepreneurship support.

---

Концепция реализации экспериментального проекта «Университет 3.0» предполагает комплексное развитие образовательной, научно-инновационной и производственно-предпринимательской деятельности сотрудников и студентов университета.

Совершенствование образовательной деятельности осуществляется за счет предоставления комплекса совре-

менных образовательных услуг, а также внедрения новых технологий преподавания, направленных на развитие университетской бизнес-среды, формирование предпринимательских компетенций, повышение инновационной и деловой активности сотрудников, студентов и выпускников университета.

Развитие научно-инновационной деятельности достигается за счет созда-

ния субъектов инновационной деятельности университета (центра трансфера технологий, отраслевого инжинирингового центра, лаборатории волоконно-оптической диагностики и лаборатории взрывозащищенного оборудования с интегрированными студенческими конструкторскими бюро).

Активизация производственно-предпринимательской деятельности обеспечивается за счет создания инновационной инфраструктуры университета, направленной на взаимодействие университета с современными промышленными предприятиями Республики Беларусь, Российской Федерации, ближнего и дальнего зарубежья, которые являются потребителями инновационной продукции и услуг университета, а также основными заказчиками кадров.

С целью совершенствования образовательного процесса, системы поддержки и развития инновационно-предпринимательской деятельности в рамках реализации экспериментального проекта «Университет 3.0» в Белорусско-Российском университете в октябре 2020 г. было проведено исследование предпринимательского потенциала студентов. Для проведения исследования использовалась методология «Global University Entrepreneurial Spirit Students Survey» (GUESSS), адаптированная ГУО «Республиканский институт высшей школы» к «белорусским» условиям. Исследование проводилось в форме онлайн-опроса путем заполнения анкеты [1].

В анкетировании приняли участие 502 студента дневной формы обучения первой ступени высшего образования, в том числе получающие образование в сфере инженерное дело – 99 человек, или 19,7 %, экономика – 236 человек, или 47 %, информационные технологии – 167 человек, или 33,3 %.

На вопрос о наличии постоянного места работы ответы респондентов распределились следующим образом: из студентов инженерных специальностей

имеют постоянное место работы 14 человек, или 14,1 %; из экономистов – 31 человек, или 13,1 %, из программистов – 24 человека, или 14,4 %.

В целом по университету 13,7 % респондентов имеют постоянное место работы.

В среднем на свою работу студенты университета тратят 31,4 часа в неделю, в том числе инженеры – 31 час, экономисты – 28 часов, программисты – 36 часов.

Распределение ответов респондентов на вопрос о том, какой карьерный путь они намерены выбрать сразу после окончания университета и через 5 лет, представлены в табл. 1.

По данным таблицы видно, что большинство инженеров сразу после окончания учебы планируют стать работниками средней или крупной организации – соответственно 22 человека (или 22,2 %) и 20 человек (или 20,2 %), непопулярными у будущих инженеров являются такие пути карьеры, как работник научной организации и государственный служащий. Через пять лет после окончания работы большинство инженеров рассчитывают стать основателями своего бизнеса (предпринимателями), так ответили 36 человек, или 36,4 %.

Большинство экономистов сразу после окончания учебы «видят» себя работниками средних или небольших организаций – соответственно 65 человек (или 27,5 %) и 40 человек (или 17 %), непривлекательными для экономистов на начальном этапе карьеры являются такие пути, как работник научной организации, преемник семейного бизнеса, руководитель частного бизнеса. Картина кардинально меняется спустя пять лет: большинство экономистов считают, что станут основателями собственного бизнеса – 90 человек (или 38,1 %), работниками крупных организаций – 43 человека (или 18,2 %) или руководителями частного бизнеса – 40 человек (или 16,9 %).

Табл. 1. Распределение ответов респондентов на вопрос: «Какой карьерный путь Вы намерены выбрать?»

Вариант ответа	Инженеры		Экономисты		Программисты		Всего	
	сразу	через 5 лет	сразу	через 5 лет	сразу	через 5 лет	сразу	через 5 лет
Работником в небольшой организации (1–49 сотрудников)	15	3	40	2	44	4	99	9
Работником в средней организации (50–249 сотрудников)	22	7	65	14	44	15	131	36
Работником в крупной организации (250 и больше сотрудников)	20	11	38	43	32	40	90	94
Работником в некоммерческой организации	8	7	11	8	1	5	20	20
Работником в научной организации (академическая карьера)	1	3	4	5	2	1	7	9
Работником только государственной организации	6	6	10	4	1	0	17	10
Государственным служащим	3	6	9	11	1	2	13	19
Основателем своего бизнеса (предпринимателем)	6	36	23	90	14	54	43	180
Преемником в семейном бизнесе	4	4	8	14	2	3	14	21
Руководителем частного бизнеса (не семейный бизнес)	7	9	8	40	7	25	22	74
Пока не решил(а)	7	7	20	5	19	18	46	30
Всего	99	99	236	236	167	167	502	502

Так же, как и экономисты, большинство программистов сразу после окончания учебы планируют стать работниками в небольших или средних организациях; такие ответы дали по 44 человека (или по 26,3 %). Непопулярными направлениями карьерного пути у программистов являются работник некоммерческой организации, работник научной организации, работник только государственной организации, государственный служащий. Через пять лет большинство программистов «видят» себя основателями собственного бизнеса (предпринимателями) или работниками крупных организаций – соответственно 54 человека (или 32,3 %) и 40 человек (или 24 %).

В целом по университету сразу после окончания учебы большинство студентов планируют стать работниками средней или небольшой организации (рис. 1), через пять лет – основателями собственного бизнеса или работниками крупных организаций (рис. 2).

Многие студенты уже в настоящее время пытаются начать свой бизнес: из инженеров таких оказалось 22 человека (или 22,2 %), из экономистов – 50 человек (или 21,2 %), из программистов – 33 человека (или 19,8 %). В целом по университету пытаются стать предпринимателями в настоящее время 105 человек (или 20,9 %) опрошенных. Уже имеют свой бизнес среди инженеров 3 человека (или 3 %), среди экономистов 5 человек (или 2,1 %), среди программистов 4 человека (или 2,4 %), в целом по университету – 12 человек (или 2,4 % опрошенных), из них 4 человека развивают бизнес в сфере информационных технологий и коммуникаций, 4 человека – в сфере рекламы, маркетинга и дизайна, 2 человека – в сфере торговли.

Оценка важности различных факторов при выборе будущей карьеры студентами, обучающимися по разным направлениям, представлена в табл. 2.



Рис. 1. Структура ответов респондентов на вопрос о выборе карьерного пути сразу после окончания университета

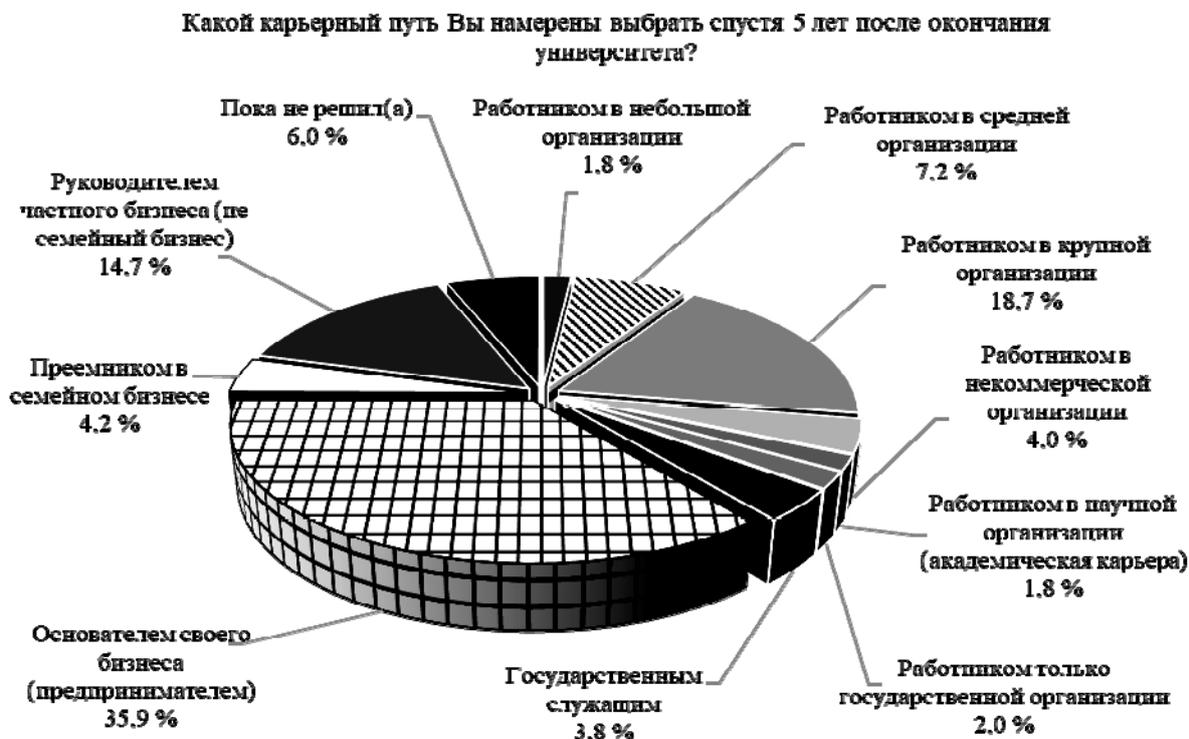


Рис. 2. Структура ответов респондентов на вопрос о выборе карьерного пути спустя 5 лет после окончания университета

Табл. 2. Ответы респондентов на вопрос: «Когда Вы принимаете решение о Вашей будущей карьере, насколько важны следующие факторы? (1 – совсем не важны, 7 – очень важны)»

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
Иметь многообещающую работу	5,2	5,4	5,2	5,2
Иметь увлекательную (интересную) работу	6,0	6,1	6,1	6,1
Свобода	5,3	5,5	5,6	5,4
Независимость	5,5	5,5	5,3	5,4
Быть самому себе начальником	5,0	5,2	4,6	4,9
Иметь возможность принимать решения	5,5	5,8	5,4	5,5
Иметь власть	4,7	5,1	4,2	4,6
Реализация своей мечты	5,8	6,1	5,7	5,8
Возможность создавать что-то новое	5,6	5,6	5,4	5,5
Иметь возможность реализовывать свои творческие способности	5,5	5,6	5,4	5,5
Заработать деньги и стать богатым	5,6	6,0	5,7	5,7

Для инженеров наиболее важными при выборе будущей карьеры являются такие факторы, как возможность иметь увлекательную (интересную) работу, возможность реализовать свою мечту, возможность создавать что-то новое, возможность заработать деньги и стать богатым.

Для экономистов наиболее важными факторами при выборе карьеры стали возможность иметь увлекательную работу, возможность реализовать свою мечту, возможность заработать деньги и стать богатым, возможность принимать решения.

Для программистов наиболее важными факторами при выборе карьерного пути являются возможность иметь интересную работу, возможность реализовать мечту, свобода, возможность заработать деньги и стать богатым.

Наименее привлекательными факторами как для инженеров, так и для программистов и экономистов стали иметь власть и быть самому себе начальником.

Значимость различных факторов при принятии решения о будущей карьере в целом по университету отображе-

на на рис. 3.

Оценка вариантов ответов на вопрос о намерении начать свой бизнес будущими инженерами, экономистами и программистами представлена в табл. 3.

По данным таблицы видно, что как в целом по университету, так и в разрезе отдельных групп специальностей студенты имеют серьезные намерения однажды начать свое дело, серьезно обдумывают возможность начала своего бизнеса, а также готовы предпринимать все необходимые усилия для начала своего дела и управления собственной фирмой, что свидетельствует о достаточно высокой предпринимательской активности респондентов.

Одной из важнейших целей реализации экспериментального проекта «Университет 3.0» является развитие и активизация производственно-предпринимательской деятельности студентов и магистрантов, которая обеспечивается за счет создания соответствующей инновационной инфраструктуры и предпринимательской среды. В связи с этим респондентам был задан ряд вопросов, касающихся предпринимательской среды в университете.

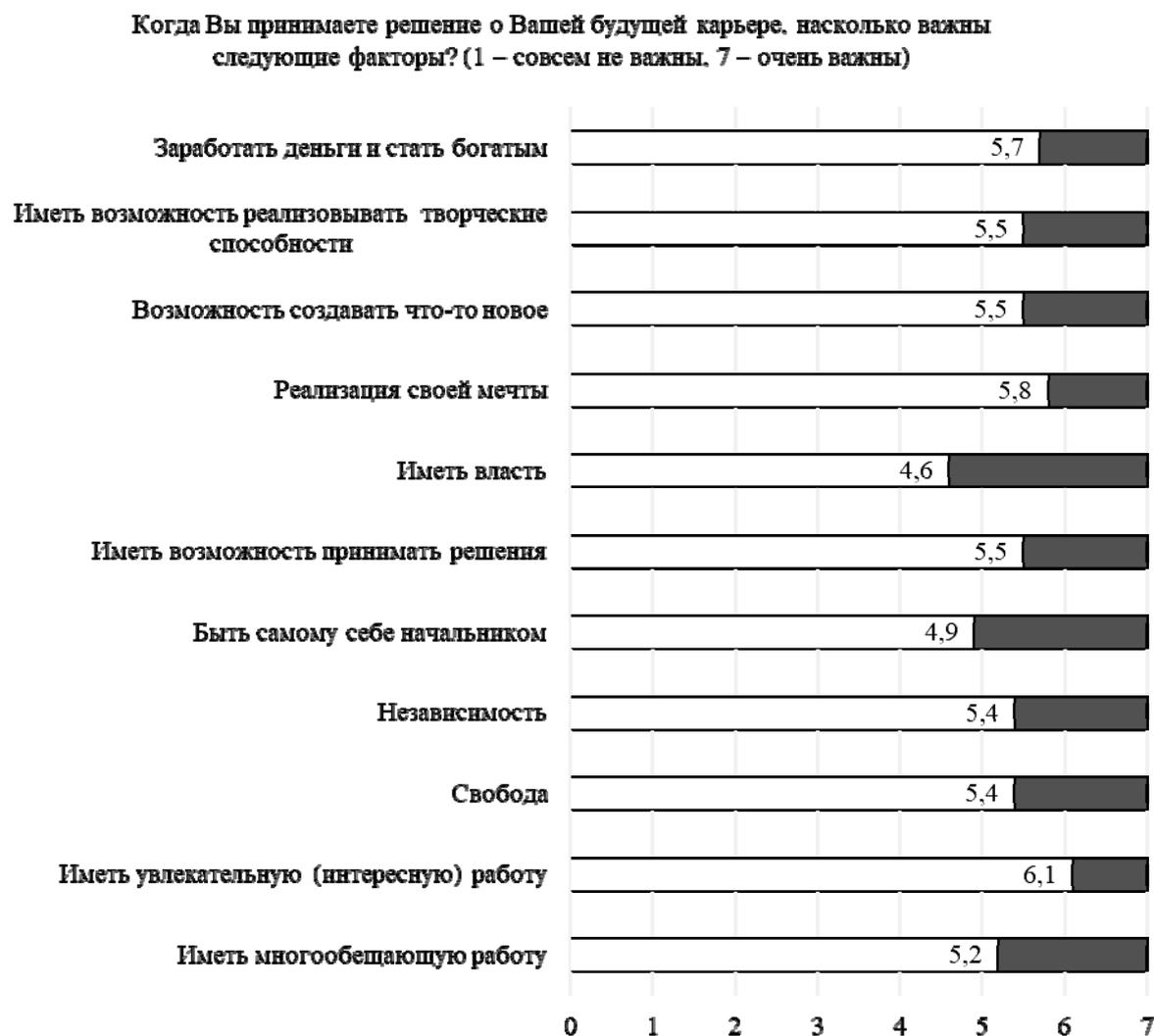


Рис. 3. Значимость различных факторов при выборе карьеры (в целом по университету)

Табл. 3. Ответы респондентов на вопрос: «Каковы Ваши намерения относительно начала своего бизнеса? (1 – абсолютно не согласен, 7 – абсолютно согласен)»

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
У меня есть серьезное намерение однажды начать свое дело	5,1	5,2	4,7	5,0
Я серьезно обдумываю возможность начала своего бизнеса	4,7	5,0	4,4	4,7
Я решительно настроен(а) на создание своей фирмы в ближайшем будущем	4,3	4,2	3,7	4,1
Я готов(а) предпринимать все необходимые усилия для начала своего дела и управления собственной фирмой	4,5	4,9	4,1	4,4
Моя профессиональная цель – стать предпринимателем	3,9	4,4	3,5	3,9
Я готов(а) сделать все, что угодно, чтобы стать предпринимателем	3,7	4,1	3,3	3,6

Результаты, полученные в ходе исследования, показали, что предпринимательская среда в Белорусско-Российском университете недостаточно развита и требует внедрения корректирующих мероприятий.

Так, в качестве главных причин поступления в университет большинство инженеров, экономистов и программистов указали географическую близость к месту проживания и хорошую общую репутацию университета, вместе с тем такую причину, как хорошая репутация

университета среди предпринимателей, указали только 18 человек, или 3,6 % всех респондентов (табл. 4). Структура ответов респондентов на вопрос о причинах поступления в Белорусско-Российский университет представлена на рис. 4.

Инженеры, экономисты и программисты по-разному оценивают, насколько в университете поощряется предпринимательская деятельность студентов (табл. 5).

Табл. 4. Распределение ответов респондентов на вопрос: «Какова была главная причина поступления в Ваш университет?»

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
Географическая близость к месту проживания	34	65	62	161
Привлекательность города/местности расположения университета	6	19	8	33
Приемлемая плата за обучение/проживание	2	13	5	20
Хорошая репутация университета (общая)	43	104	64	211
Хорошая репутация университета среди предпринимателей	3	11	4	18
Другое	11	24	24	59
Всего	99	236	167	502



Рис. 4. Структура ответов респондентов на вопрос о причинах поступления в Белорусско-Российский университет

Табл. 5. Оценка респондентами системы поощрения предпринимательской деятельности и предпринимательской среды в университете (1 – абсолютно не согласен, 7 – абсолютно согласен)

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
Атмосфера в моем университете вдохновляет меня на развитие идей для нового бизнеса	3,5	3,9	3,3	3,5
В моем университете благоприятный климат для того, чтобы я стал(а) предпринимателем	3,4	4,2	3,3	3,5
В моем университете поощряется вовлечение студентов в предпринимательскую деятельность	3,4	4,7	3,6	3,7
В моем университете имеются организационные структуры для поддержки предпринимательской деятельности студентов	3,2	4,4	3,4	3,5
В моем университете не поощряется предпринимательская деятельность студентов и нет условий для развития идей для нового бизнеса	3,2	3,3	3,2	3,2

Так, экономисты более высоко, чем инженеры и программисты, оценили атмосферу в университете, которая вдохновляет на развитие идей для нового бизнеса, благоприятный климат для развития предпринимательства, поощрение вовлеченности в предпринимательскую деятельность и наличие организационных структур для поддержки молодежного предпринимательства. Такая разница в выставленных баллах объясняется тем, что дважды в месяц на экономическом факультете проводятся курсы для студентов в рамках школы BeSmart, на которых разбираются вопросы, связанные с организацией, ведением бизнеса, проводятся мотивационные тренинги, бизнес-игры.

В целом по университету система поощрения предпринимательской деятельности студентов оценивается студентами как средняя: по различным вариантам ответов выставлены от 3,2 до 3,7 баллов из семи возможных.

Неутешительными являются ответы респондентов на вопрос о посещении курсов по предпринимательству (табл. 6). Подавляющее большинство студентов либо не посещали таких курсов, либо вообще не знают об их существовании. Так, среди инженеров не посещали курсы 58 человек (или 58,6 %), не знают об их существовании 33 человека (или 33,3 %); среди экономистов не

посещали курсы 125 человек (или 53 %), не знают об их существовании 43 человека (или 18,2 %); среди программистов – соответственно 102 человека (или 61,1 %) и 45 человек (или 26,9 %). Такие ответы свидетельствуют о слабой рекламно-информационной поддержке проводимых в университете курсов по предпринимательству.

Наглядно структура ответов всех респондентов на вопрос о посещении курсов предпринимательства в университете представлена на рис. 5.

Студентами, которые посещали университетские курсы предпринимательства, дана достаточно высокая их оценка (табл. 7). В целом по университету респондентами было отмечено, что курсы позволили им усовершенствовать практические управленческие навыки, необходимые для создания своего бизнеса, углубили понимание в отношении действий, которые необходимо совершить для открытия своего дела, а также углубили понимание ценностей и мотивации предпринимателя, развили способность заводить личные контакты.

Респондентами достаточно высоко был оценен уровень компетенций в различных областях, позволяющих успешно заниматься предпринимательством (табл. 8).

Табл. 6. Распределение ответов респондентов на вопрос: «Посещали ли Вы курсы по предпринимательству в Вашем университете?»

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
В университете нет курсов по предпринимательству	33	43	45	121
Я пока не посещал(а) курсы по предпринимательству в университете	58	125	102	285
Я посещал, по крайней мере, одни факультативные курсы по предпринимательству в университете	1	11	4	16
Я посещал(а) обязательные курсы по предпринимательству в университете	0	0	2	2
Я обучаюсь по специальности, относящейся к сфере предпринимательства	2	54	5	61
Нет ответа	5	3	9	17
Всего	99	236	167	502



Рис. 5. Структура ответов всех респондентов на вопрос о посещении курсов предпринимательства в университете

По данным таблицы видно, что как инженеры, так и экономисты и программисты наиболее высоко оценивают такие компетенции, как извлечение прибыли из новых идей, применение собственных творческих способностей, налаживание

деловых связей, лидерство и коммуникации; наиболее низко оцениваются такие компетенции, как определение новых возможностей в бизнесе и управление инновациями.

Табл. 7. Оценка респондентами курсов и занятий по предпринимательству в университете (1 – абсолютно не согласен, 7 – абсолютно согласен)

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
Улучшили мою способность выявлять возможности для бизнеса	3,7	4,7	3,6	3,9
Развили мою способность завязывать личные контакты	4,3	4,6	4,1	4,3
Усовершенствовали мои практические управленческие навыки, необходимые для создания своего бизнеса	4,7	4,5	4,4	4,6
Углубили мое понимание в отношении действий, которые необходимо предпринять для открытия своего дела	4,3	4,9	4,2	4,4
Углубили мое понимание отношения, ценностей и мотивации предпринимателей	4,3	4,6	4,5	4,4
Оказались бесполезными для организации предпринимательской деятельности	4,0	2,9	2,1	3,2

Табл. 8. Оценка уровня компетенций респондентов в различных областях (1 – абсолютно не согласен, 7 – абсолютно согласен)

Вариант ответа	Инженеры	Экономисты	Программисты	Всего
Определение новых возможностей в бизнесе	4,0	4,1	3,7	3,9
Создание новой продукции и услуг	4,1	4,2	4,2	4,2
Применение моих творческих способностей	4,7	4,9	4,6	4,7
Управление инновациями	4,2	4,2	4,0	4,1
Лидерство и коммуникации	4,5	4,9	4,6	4,6
Налаживание деловых связей	4,7	5,0	4,5	4,7
Извлечение прибыли из новых идей	4,8	4,9	4,5	4,7
Успешное ведение бизнеса	4,4	4,8	4,0	4,3

### **Выводы по результатам исследования**

Проведенное исследование показало, что предпринимательский потенциал студентов Белорусско-Российского университета имеет уровень выше среднего. Уже в настоящее время, будучи студентами дневного отделения, 20,9 % из опрошенных пытаются открыть свой бизнес и стать предпринимателями; у 26,1 % опрошенных есть стремление стать основателями своего дела через пять лет после окончания учебы. Большинство студентов оценивают предпринимательскую среду и систему поощрения предпринимательства в университете как среднюю; подавляющее

большинство студентов либо не посещали таких курсов, либо вообще не знают об их существовании. Несмотря на хорошую общую репутацию Белорусско-Российского университета, студенты не воспринимают его как университет для предпринимателей.

Исходя из вышесказанного, можно предложить ряд мероприятий, которые будут способствовать повышению предпринимательского потенциала и предпринимательской активности студентов, совершенствованию предпринимательской среды университета, а также росту его имиджа как предпринимательского учреждения образования:

1) активная рекламно-информационная поддержка курсов предпринимательства;

2) привлечение на курсы школы BeSmart студентов всех специальностей, а не только экономических;

3) разработка системы поддержки предпринимательства в университете:

– содействие реализации научно-технических, инновационных и социально-экономических стартап-проектов путем выделения грантов университета;

– содействие в проведении научных исследований, испытаний и отработки опытных образцов техники, создании инновационных продуктов, технологий и услуг путем предоставления помещений, научного и технологического оборудования, иных объектов инфраструктуры университета на безвозмездной основе, приобретения недостающего оборудования и материалов;

– оказание экспертной, инженерно-технической, инжиниринговой и иной поддержки, обеспечивающей реализацию проектов;

– оказание помощи в проведении маркетинговых исследований рынка и подготовке бизнес-проектов;

– создание условий для коммерциализации результатов инновационной, научной и научно-технической деятельности, трансфера технологий в организации и предприятия реального сектора экономики;

– содействие в продвижении инноваций на рынок на основе создания информационных материалов, проведения рекламных кампаний, выставок, конференций и других мероприятий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование предпринимательского потенциала студентов [Электронный ресурс]: анкета. – Режим доступа: [https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeyS6uBJY5BeaP95Hd\\_cKc77EjAyGDzVlryNMhMyVWpaO5nxg/viewform](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeyS6uBJY5BeaP95Hd_cKc77EjAyGDzVlryNMhMyVWpaO5nxg/viewform). – Дата доступа: 20.09.2020.

*Статья сдана в редакцию 11 января 2021 года*

**Любовь Анатольевна Климова**, ведущий специалист группы сопровождения молодежных инновационных проектов, Белорусско-Российский университет. E-mail: [lubavaklim@yandex.ru](mailto:lubavaklim@yandex.ru).

**Lyubov Anatolyevna Klimova**, leading specialist of the Youth Innovation Support Group, Belarusian-Russian University. E-mail: [lubavaklim@yandex.ru](mailto:lubavaklim@yandex.ru).

# ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## № 1(70) 2021

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

В. П. Бабичева

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212022, г. Могилев. Телефон: 23-00-07, e-mail: [bru@bru.mogilev.by](mailto:bru@bru.mogilev.by).

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 25.02.2020. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 7,6. Тираж 100 экз. Заказ 1148.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.