

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

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

*Периодичность – 4 раза в год*

2(75) 2022

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

- КАПСКИЙ Д. В.** Определение параметров функционирования системы городского маршрутного пассажирского транспорта..... 4
- ПОЛТОРАЦКИЙ С. Г., ШЕМЕНКОВ В. М.** Формирование гранных отверстий осевым вращающимся инструментом ..... 14
- РАБЫКО М. А., ШЕМЕНКОВ В. М., ЕЛИСЕЕВА А. Н.** Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле ..... 23
- ТАРАСИК В. П.** Моделирование режима испытаний «рывок руля» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля ..... 32

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- КОВАЛЬ А. С.** К вопросу определения циклового КПД асинхронного двигателя частотно-регулируемого привода лифта ..... 41

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- БОРИСОВ В. И., СЕРГЕЕВ С. С., ПРОКОПЕНКО Е. Н.** Акустическое поле излучения двухпластинчатого круглого пьезоэлектрического преобразователя ..... 49

## ФИЗИКА

**ЛЯПИН А. И., ПИВОВАРОВА Е. В., ХОМЧЕНКО А. В.**

Вывод закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи постоянного тока ..... 57

## ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**КЛИМОВА Л. А.** Разработка модели и выбор экспортных стратегий для основных видов продукции ОАО «Могилевский металлургический завод» ..... 67

**ЛИВИНСКАЯ В. А., ЛОБАНОВА Т. М.** Моделирование динамики ВВП средствами регрессионного анализа панельных данных..... 76

**ЛИВИНСКАЯ В. А., ШАЛУХОВА М. А.** Анализ компетенций рынка труда IT-сферы..... 86

- 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>KAPSKY D. V.</b> Determination of functioning parameters for the system of urban route passenger transport .....	4
<b>PALTARATSKI S. G., SHEMENKOV V. M.</b> Forming faceted holes with an axial rotating tool .....	14
<b>RABYKO M. A., SHEMENKOV V. M., ELISEEVA A. N.</b> Structural phase modification of die steels by glow discharge treatment in the magnetic field .....	23
<b>TARASIK V. P.</b> Simulation of the «steering wheel jerk» test mode when assessing vehicle steerability and stability .....	32

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KOVAL A. S.</b> On determining cycle efficiency of an asynchronous motor of the frequency-controlled elevator drive .....	41
--	----

### INSTRUMENT MAKING

<b>BORISOV V. I., SERGEEV S. S., PROKOPENKO E. N.</b> Acoustic radiation field of a dual-plate circular piezoelectric transducer .....	49
--	----

### PHYSICS

<b>LYAPIN A. I., PIVOVAROVA E. V., KHOMCHENKO A. V.</b> Derivation of Ohm's law in integral form for a nonuniform section of DC circuit .....	57
---	----

### ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

<b>KLIMOVA L. A.</b> Development of a model and selection of export strategies for main types of products of JSC «Mogilev Metallurgical Plant».....	67
<b>LIVINSKAYA V. A., LOBANOVA T. M.</b> Modeling GDP dynamics using regression analysis of panel data .....	76
<b>LIVINSKAYA V. A., SHALUCHOVA M. A.</b> Analysis of competences of labor market in the IT sphere.....	86

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_4

УДК 656

*Д. В. Капский*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГОРОДСКОГО МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

*D. V. Kapsky*

### DETERMINATION OF FUNCTIONING PARAMETERS FOR THE SYSTEM OF URBAN ROUTE PASSENGER TRANSPORT

#### **Аннотация**

Статья раскрывает подходы к исследованию параметров функционирования системы маршрутного городского пассажирского транспорта с учетом перспективных тенденций развития городской транспортной системы. Раскрыты особенности построения картограммы (эпюры) пассажиропотоков. Приведен расчет требуемого парка подвижного состава и получено распределение перевозок по видам городского маршрутного пассажирского транспорта. Описаны основные аспекты проектирования маршрутной сети для целей градостроительного и детального планирования.

#### **Ключевые слова:**

город, устойчивость, мобильность, издержки, городской маршрутный пассажирский транспорт, транспортная система, эффективность, пассажиропоток, подвижной состав.

#### **Для цитирования:**

Капский, Д. В. Определение параметров функционирования системы городского маршрутного пассажирского транспорта / Д. В. Капский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 4–13.

#### **Abstract**

The article presents approaches to the study of functioning parameters for the system of urban route passenger transport taking into account the prospective trends in the development of the urban transport system as a whole. The specifics of constructing a cartogram (epure) of passenger flows are given. The calculation of the vehicle fleet required is given, as well as the distribution of traffic based on the type of urban route passenger transport. The article describes the main aspects of designing a route transport network for the purposes of urban planning and detailed planning.

#### **Keywords:**

city, sustainability, mobility, costs, urban route passenger transport, transport system, efficiency, passenger traffic, vehicle fleet.

#### **For citation:**

Kapsky, D. V. Determination of functioning parameters for the system of urban route passenger transport / D. V. Kapsky // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 4–13.

#### **Введение**

Планы устойчивой городской логистики включают мероприятия по раз-

витию транспортно-логистической подсистемы движения грузопотоков, которая позволяет значительно улучшить транспортно-экспедиционное обслужи-

вание клиентов за счет ускорения доставки грузов, обеспечения их сохранности, предоставления грузоотправителям и грузополучателям дополнительных услуг по их информационному, складскому, транспортно-экспедиционному и сервисному обслуживанию, информационному обеспечению, реализации е-логистики и пр., а также развитие подсистемы логистики маршрутного пассажирского транспорта, которая интегрирует отдельные виды городского пассажирского транспорта, формирует с должным комфортом и безопасностью оптимальные маршруты передвижения населения. В результате мультимодальность становится отличительной особенностью подсистемы городского маршрутного пассажирского транспорта (ГМПТ) [1, 2]. Это не только обеспечивает мобильность участников дорожного движения, но и требует правильного планирования городской транспортной системы с учетом размещения и функционирования промышленных предприятий, бизнеса, повышения эффективности городской логистики на всей городской территории с учетом его топологии и пр. [3, 4].

Учитываются планирование землепользования и планы обслуживания и предоставления транспортных услуг крупных объектов (например, больниц, офисных зданий, заводов, предприятий и пр., а также других центров тяготения грузопотоков в центральной части городов), предусматриваются мероприятия по перераспределению перевозок грузов и пассажиров альтернативными видами транспорта. Например, в последнее время распространен развоз мелкопорционных грузов не автомобильным, а велосипедным транспортом. Небезопасные доставки тяжелыми грузовыми автомобилями в центральной части города могут представлять угрозу для незащищенных участников дорожного движения. В некоторых странах как альтернатива автомобильному применяется

для городских перевозок водный и рельсовый транспорт. Отдельно в таких планах предусматриваются решения по выделению велопешеходных пространств, принудительному снижению скорости, ограничению доступа, изменению условий оплаты парковки и т. д., обоснование которых (мероприятий) возможно только с учетом соответствующего моделирования и прогнозирования [5, 6].

### ***Построение картограммы (эпюры) пассажиропотоков***

Построение картограмм интенсивности пассажиропотоков – завершающий этап четырехступенчатой схемы транспортного моделирования. Рассмотрим упрощенный порядок построения суточных картограмм интенсивности движения пассажиров на предварительной сети ГМПТ без использования методов моделирования. Интенсивность пассажиропотоков определяется на базе показателей транспортного спроса – матрицы межрайонных суточных корреспонденций. На основе этих данных на каждом участке предварительной сети, соединяющем центроиды (характеристические центры) транспортных районов, откладываются значения пассажиропотоков. Так как участки сети связывают, как правило, корреспонденции нескольких пар районов, то значения пассажиропотоков на них суммируются. Для крупных транспортных районов начало или окончание цепочки передвижений по сети может не совпадать с центроидом, а привязываться к центрам планировочной структуры жилых или производственных зон. Если транспортные районы связаны не одним, а несколькими маршрутами, то пассажиропоток распределяется в пропорции, обратной их протяженности (рис. 1, пасс./сут в двух направлениях).

На основе полученных численных значений (картограммы) может

быть откорректирована предварительная сеть ГМПТ путем исключения слабо загруженных участков или дуб-

лирования транспортных линий в местах избыточной концентрации пассажиропотоков (рис. 2).

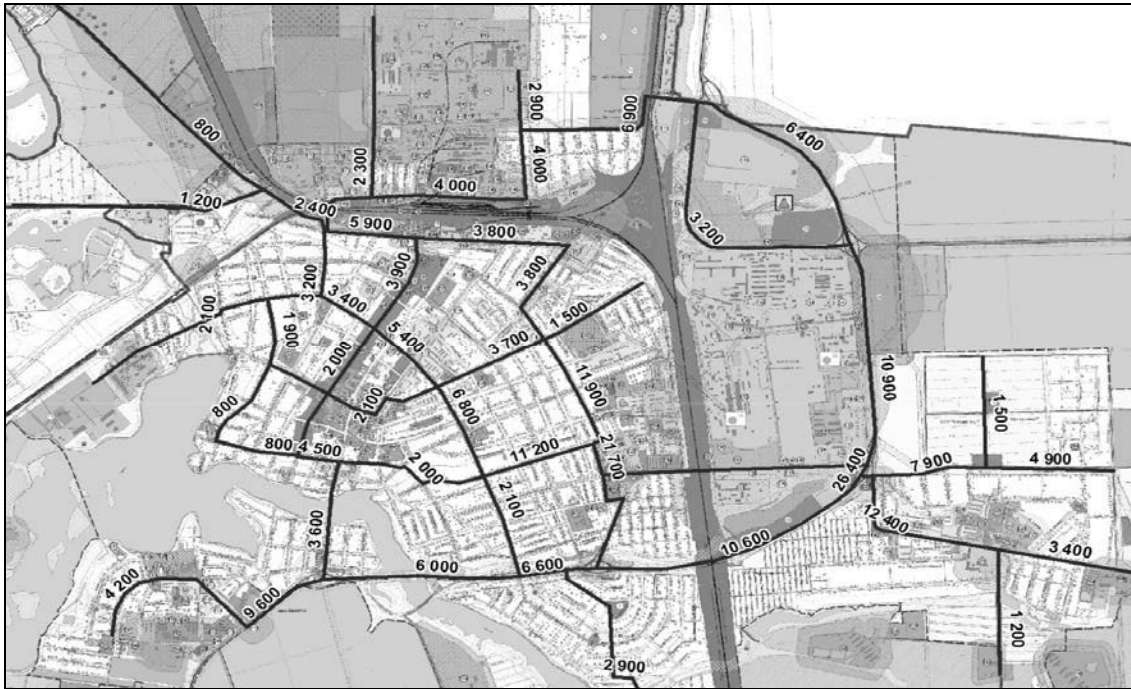


Рис. 1. Распределение пассажиропотока по предварительной сети ГМПТ (цифрами показаны значения пассажиропотоков)

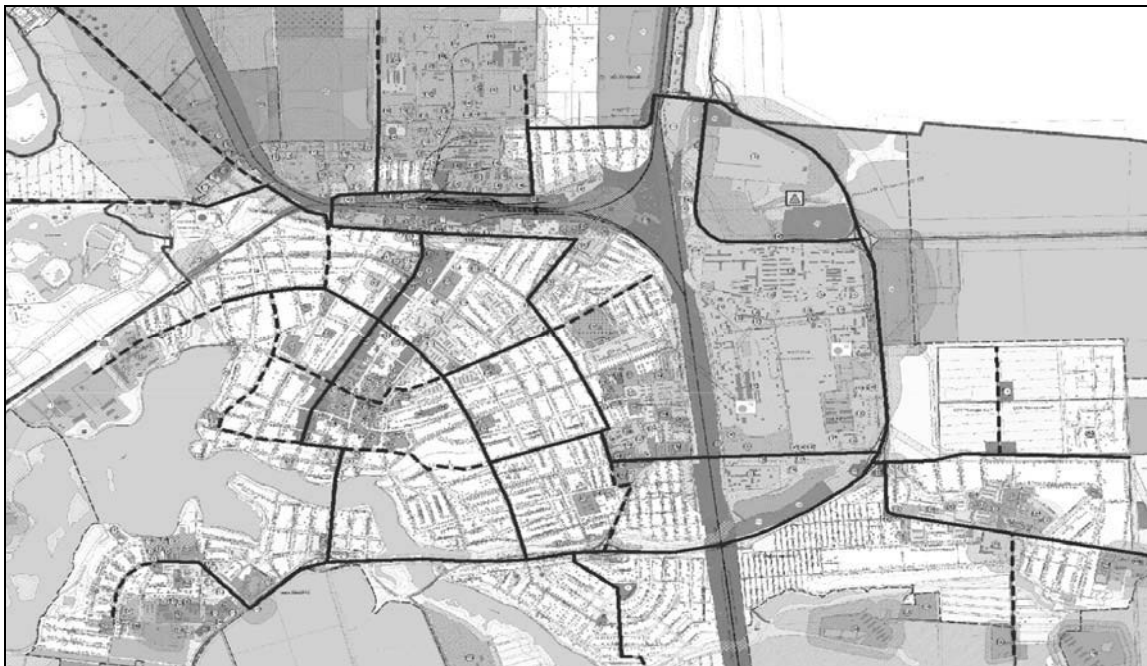


Рис. 2. Откорректированная сеть городского маршрутного пассажирского транспорта (пунктиром показаны исключаемые элементы предварительной сети)

Одним из критериев корректности полученной сети является показатель ее плотности. По итогам корректировки плотность сети ГМПТ составила  $43,5/17,1 = 2,5$  км/км<sup>2</sup>, что соответствует рекомендуемому нормативу. При этом в результате сокращения линий ГМПТ уменьшилась площадь территории, удовлетворяющей требованиям по обеспечению 500-метровой пешеходной доступности линий ГМПТ.

Полученные значения интенсивности пассажиропотоков на участках сети ГМПТ служат основанием для определения экономической целесообразности использования маршрутного пассажирского транспорта, выбора того или иного набора видов ГМПТ, построения маршрутной сети, назначения проектных параметров улично-дорожной сети и т. д.

### **Расчет требуемого парка подвижного состава**

Расчет требуемого парка подвижного состава производится на ос-

нове параметров транспортного спроса. Рассмотрим простую ситуацию, при которой транспортное обслуживание пассажиров обеспечивается только одним видом наземного ГМПТ – автобусами. На первом этапе необходимо определить средневзвешенную дальность поездки  $L_{ср}$ :

$$L_{ср} = \sum(x_{ijсум} l_{ijпр}) / \sum x_{ijсум}, \quad (1)$$

где  $x_{ijсум}$  – элементы матрицы передвижений на ГМПТ (с учетом всех видов передвижений).

При этом

$$Q_{пасс.} = \sum(x_{ijсум} l_{ijпр}), \quad (2)$$

где  $Q_{пасс.}$  – объем пассажирской работы, пасс.-км/сут.

Умножив значения матрицы расстояний на объемы передвижений, получим матрицу произведений данных параметров (табл. 1, чел./сут · м), что позволит определить средневзвешенную дальность поездки.

Табл. 1. Матрица произведений объемов передвижений на расстояния

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сумма отпр./приб.
1		1159387	5360940	559227	268775	247448	302716	286300	232073	810690	9227555
2			32588580	3560792	1186624	2434295	1495650	1848673	1418845	3159620	47693078
3				31864925	8445655	13017783	10386465	19583013	22362736	29221521	134882097
4					798206	1471678	1077499	1455049	1525404	2465780	8793617
5						521285	310346	573874	410757	991934	2808196
6							584728	831206	640430	2376365	4432730
7								504518	628621	1481378	2614517
8									942554	1808694	2751248
9										1740130	1740130
10											0
											214943169

Средняя дальность поездки

$$L_{\text{ср}} = 214943169 / 57580 = 3733 \text{ м.}$$

Расчет требуемого количества подвижного состава производится по формуле

$$W_{\text{инв}} = (\sum x_{ij\text{сум}} L_{\text{ср}} \lambda) / (1000 v_3 h \Omega \alpha \eta), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сезонной неравномерности;  $v_3$  – эксплуатационная скорость, км/ч;  $h$  – число часов работы транспорта в сутки;  $\Omega$  – нормативное максимальное наполнение единицы подвижного состава, пасс.;  $\alpha$  – коэффициент выпуска подвижного состава;  $\eta$  – среднесуточный коэффициент наполнения подвижного состава.

Переменные в формуле (3) можно определить следующим образом.

1. Суточное количество перевезенных пассажиров и средневзвешенная дальность поездки.

2. Значения остальных переменных при отсутствии точной информации можно принять по средним значениям:  $\lambda = 1$ ,  $v_3 = 20$  км/ч,  $h = 12$  ч,  $\Omega = 75$  пасс.,  $\alpha = 0,85$ ,  $\eta = 0,35$ .

Таким образом,

$$W_{\text{инв}} = (57580 \cdot 3733 \cdot 1) / (1000 \cdot 20 \times \\ \times 12 \cdot 75 \cdot 0,85 \cdot 0,35) = 40 \text{ ед.}$$

### ***Распределение перевозок по видам городского маршрутного пассажирского транспорта***

При проектировании сети ГМПТ важна правильная расстановка акцентов в развитии отдельных видов транспорта, что особенно актуально в связи с появлением интереса к новым видам ГМПТ. Вопрос распределения перевозок пассажиров (оптимизации структуры перевозок) находится за пределами рассмотрения практических примеров, т. к. упрощенная схема на базе рассмот-

рения среднего города не предполагает решения данной задачи. Далее представлены только общие подходы к распределению перевозок.

Во вновь проектируемом городе основными факторами, определяющими выбор вида транспорта, являются: размер максимальных и минимальных часовых пассажиропотоков; средняя дальность поездки; объем единовременных капиталовложений.

В реальности, как правило, речь идет о совершенствовании современной структуры перевозок по видам транспорта с учетом имеющихся мощностей, доступности и дешевизны электроэнергии, климатических особенностей и т. д. Большую роль играют и традиционные предпочтения жителей конкретного города. Тем не менее каждый вид маршрутного пассажирского транспорта обладает своими достоинствами и недостатками (табл. 2).

Помимо указанных видов, в городах могут использоваться и другие виды транспорта (монорельсовый транспорт, канатные дороги и т. д.), рассмотрение которых также может использоваться при решении задачи распределения пассажироперевозок.

На практике для решения задачи оптимизации структуры пассажироперевозок можно воспользоваться рекомендуемым распределением перевозок или ориентироваться на разработанные методики, предполагающие проведение ряда расчетов. Так, М. Я. Сницарем [7] была предложена следующая структура определения основного вида скоростного транспорта, применение которого целесообразно в городах с различной планировочной структурой (табл. 3 (по [7])).

МДС 30–2.2008 *Рекомендации по модернизации транспортной системы городов* предлагает следующее ориентировочное распределение объемов пассажироперевозок между видами ГМПТ (табл. 4).



Табл. 2. Характеристика основных видов городского маршрутного пассажирского транспорта

Вид ГМПТ	Достоинство	Недостаток	Максимальная провозная способность, тыс. пасс./ч в одном направлении
Автобус	Низкие капитальные затраты. Возможность оперативного изменения маршрутов	Низкая провозная способность. Высокий уровень загрязнения воздуха. Высокий уровень шума. Зависимость от основного автомобильного потока	5...8
Троллейбус	Экологичность	Необходимость контактной сети. Низкая маневренность	5...10
Трамвай	Возможности регулирования провозной способности и скоростного режима. Экологичность	Необходимость выделения пространства для сети	15...20
Скоростной трамвай на изолированном полотне	Высокая скорость. Относительная дешевизна (по сравнению с метрополитеном). Экологичность	Трудность организации сети в сложившейся застройке	20...25
Метрополитен	Высокая скорость. Высокая провозная способность. Экологичность. Экономичность с точки зрения использования городской территории. Безопасность	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты. Длительные сроки строительства. Необходимость организации подвозочного транспорта	45...55
Городская железная дорога	Высокая скорость. Высокая провозная способность. Возможность развития на пригородные территории	Высокие эксплуатационные затраты. Высокий уровень шума. Необходимость организации подвозочного транспорта	55...65

Табл. 3. Структура видов скоростного транспорта в городах

Планировочная структура	Размещение фокусов тяготения	Население, млн чел.		
		0,25...0,5	0,5...0,75	0,75...1,3
Центричная	Дисперсное	Экспресс-автобус	Скоростной автобус	Скоростной трамвай
	Вдоль линий скоростного транспорта	Экспресс-автобус	Скоростной автобус или скоростной трамвай	Скоростной трамвай или метрополитен
Линейная	То же	Скоростной автобус	Скоростной трамвай	Метрополитен

Табл. 4. Ориентировочное распределение объемов пассажироперевозок между видами городского пассажирского транспорта

В процентах

Город, тыс.чел.	Уровень автомобилизации, авт./тыс. чел.								
	150	300	450	150	300	450	150	300	450
	Уличный ГМПТ			Скоростной (внеуличный) ГМПТ			Индивидуальный транспорт		
100	60	50	30	–	–	–	40	50	70
300	65	45	40	–	–	–	35	55	60
500	70	60	50	–	–	–	30	40	50
1000	60	50	40	10	15	20	30	35	40
1500	60	50	40	15	20	25	25	30	35
3000	65	55	40	15	20	30	20	25	0
Св. 5000	50	40	35	30	35	40	20	25	25

В дополнение к имеющимся рекомендациям представим несколько разработанных в России методик оптимизации структуры пассажироперевозок на ГМПТ.

1. Методика Д. С. Самойлова [8]. Данная методика основана на распределении работы ГМПТ по группам вместимости подвижного состава с учетом численности населения города. Однако такое распределение условно, т. к. предполагается, что каждому виду транспорта в основном соответствует определенная вместимость поездных единиц. Подобное разделение не всегда оправдано в связи с появлением транспортных единиц многих видов ГМПТ с большим интервалом по вместимости.

2. Методика А. Э. Горева. В соответствии с данной методикой каждый вид маршрутного пассажирского транспорта имеет свою зону эффективного использования в координатах «провозная возможность – эксплуатационная скорость» (рис. 3 (по [9])).

3. Методика на основе оценки напряженности пассажиропотока. В основе данной методики лежит ключевой показатель – напряженность пассажиропотока, пасс.-км/км, при этом определение структуры систем ГМПТ осуществляется на основе пла-

нировочных и социально-экономических факторов [10].

4. Методика распределения пассажирских корреспонденций по видам ГМПТ на основе досетевого моделирования [11]. Данный подход основан на использовании так называемых досетевых моделей расчета матриц межрайонных корреспонденций, позволяющий оптимизировать структуру передвижений по группам ГМПТ при заданных параметрах размещения основных функциональных зон в городе без учета ограничений, задаваемых транспортной сетью.

### *Проектирование маршрутной сети*

Проектирование маршрутной сети осуществляется на основе результатов расчета транспортного спроса и интенсивности пассажиропотоков. Можно выделить следующие основные требования к системе маршрутов ГМПТ [12, 13]:

- соответствие направлению основных пассажиропотоков;
- обеспечение кратчайших (наиболее прямолинейных) направлений и беспересадочных связей между районами проживания, основными объектами тяготения и центром города;
- обеспечение наименьшей пере-

сачности сообщений;

- размещение конечных пунктов, как правило, вне центральной зоны города;
- обеспечение координированности маршрутной системы, объединяю-

щей несколько видов транспорта;

- обеспечение удобных пересадок между видами транспорта;
- удобство для изучения и запоминания населением.

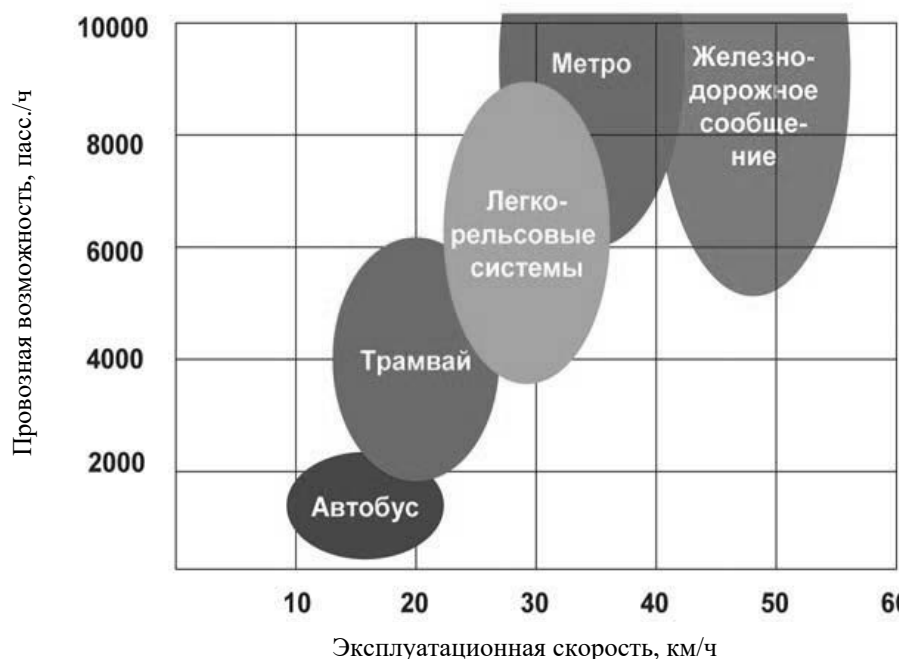


Рис. 3. Эффективные зоны использования видов ГМПТ

Кроме того, рекомендуется трассировать маршруты таким образом, чтобы коэффициент непрямолинейности не превышал 1,5...2,0 (за исключением кольцевых маршрутов).

Коэффициент непрямолинейности  $k_{нс}$  вычисляется по следующей формуле:

$$k_{нс} = l_{тр} / l_{пр}, \quad (4)$$

где  $l_{тр}$  – расстояние между начальным и конечным пунктами маршрута по транспортной сети, км;  $l_{пр}$  – расстояние между транспортными районами по прямой (по воздуху), км.

Маршрутный коэффициент  $\mu$  должен находиться в диапазоне 1,5...3,5:

$$\mu = \sum l_m / L_{тр}, \quad (5)$$

где  $\sum l_m$  – суммарная протяженность маршрутов, км;  $L_{тр}$  – протяженность транспортной сети, км.

Тогда ориентировочное число маршрутов  $n_m$  можно определить по формуле

$$n_m = \mu L_{тр} / l_{м ср}, \quad (6)$$

где  $l_{м ср}$  – средняя дальность поездки на маршруте, км.

Разработаны детальные методики расчета маршрутной сети, приведенные, например, в [13]. Оптимизация маршрутной сети также может выполняться с помощью методов математического моделирования [1, 16, 17].

### Заключение

Оценка эффективности системы ГМПТ может базироваться на различных показателях. В целом при оценке транспортных систем городов и их подсистем можно руководствоваться тремя принципами: адекватность, эффективность, результативность. Под адекватностью понимается соответствие транспортной системы потребностям населения и реальным условиям их удовлетворения, что достигается применением организационных, технических, экономических, градостроительных мер, технологий и ресурсов, достаточных для достижения желаемых целей в количественном и качественном отношении. Эффективность – соотношение результатов, выраженных в определенных показателях (экономических и социальных), к произведенным затратам. Оценка результативности – процедура, поз-

воляющая оценить максимальную эффективность воздействия при минимальных затратах.

При определении экономической эффективности используются различные показатели, к которым относятся: интегральный экономический эффект, или чистый дисконтированный доход; индекс интегральной эффективности, или индекс доходности; внутренняя норма эффективности, или внутренняя норма доходности; срок окупаемости [14, 15]. Оценка результативности может быть основана на использовании серии коэффициентов. Критерии оценки качества функционирования системы ГМПТ могут базироваться на системе балльной оценки и других частных, интегральных и иных критериях, причем целесообразно использовать обобщенный стоимостной критерий – потери в дорожном движении [1, 2, 16–18].

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Врубель, Ю. А.** Опасности в дорожном движении: монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. – Москва: Новое знание, 2013. – 244 с.
2. **Капский, Д. В.** Методология повышения качества дорожного движения: монография / Д. В. Капский. – Минск: БНТУ, 2018. – 372 с.
3. **Капский, Д. В.** Транспорт в планировке городов: пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 ч. / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. – Минск: БНТУ, 2019. – Ч. 1. – 94 с.
4. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации: монография / Д. В. Капский [и др.]. – Минск: Капитал Принт, 2018. – 144 с.
5. **Врубель, Ю. А.** Определение потерь в дорожном движении: монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
6. Теоретические и практические аспекты организации городского движения велосипедистов: монография / Д. В. Капский [и др.]; под общ. ред. В. К. Шумчика. – Минск: Капитал Принт, 2019. – 374 с.
7. **Сницарь, М. Я.** Определение сравнительной эффективности применения различных видов скоростного маршрутного пассажирского транспорта / М. Я. Сницарь // Город и пассажир. Градостроительные проблемы развития пассажирского транспорта: тез. докл. III Ленинградской науч. конф. – Ленинград: Стройиздат, 1975. – С. 149–153.
8. **Самойлов, Д. С.** Городской транспорт: учебник для вузов / Д. С. Самойлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1983. – 384 с.
9. **Горев, А. Э.** К вопросу об экономической эффективности городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 34–36.
10. **Дудкин, Е. П.** Основные аспекты проектирования систем рельсового транспорта в городах / Е. П. Дудкин, В. А. Черняева, С. А. Дороницева // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т. 6, № 1. – С. 38–43.
11. **Федоров, В. П.** Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне / В. П. Федоров, Л. А. Лосин // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 2 (39). – С. 42–45.

12. Булавина, Л. В. Проектирование и оценка транспортной сети и маршрутной сети в городах / Л. В. Булавина. – Екатеринбург: Уральский ун-т, 2014. – 50 с.
13. Горев, А. Э. Проектирование систем городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, Д. Т. Оспанов. – Санкт-Петербург: КОСТА, 2018. – 256 с.
14. Сафронов, Э. А. Транспортные системы городов и регионов / Э. А. Сафронов. – Москва: АСВ, 2007. – 288 с.
15. Капский, Д. В. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках / Д. В. Капский, В. Н. Шуть, П. А. Пегин // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 246–254.
16. Капский, Д. В. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // Наука и техника. – 2019. – № 18 (1). – С. 47–54.
17. Капский, Д. В. Расчетная стоимость социально-экономических издержек от аварий / Д. В. Капский, Р. Ю. Лагерева // Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 8 (91). – С. 116–122.
18. Капский, Д. В. Методика определения экономических потерь в зоне остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта / Д. В. Капский, Т. Н. Самойлович // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – № 4 (4). – С. 145–152.

*Статья сдана в редакцию 17 ноября 2021 года*

**Денис Васильевич Капский**, д-р техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет.  
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

**Denis Vasilyevich Kapsky**, DSc (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University.  
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_14

УДК 621.9.042

*С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков*

## ФОРМИРОВАНИЕ ГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ ОСЕВЫМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ

*S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov*

## FORMING FACETED HOLES WITH AN AXIAL ROTATING TOOL

### Аннотация

Представлены теоретические основы и методика формирования отверстий любой гранности специальным универсальным осевым лезвийным инструментом, работающим по принципу обкатывания, с использованием станков с числовым программным управлением.

### Ключевые слова:

гранные отверстия, осевой лезвийный универсальный инструмент, траектория, параметрическое уравнение, треугольник Рёло, станок с ЧПУ.

### Для цитирования:

Полторацкий, С. Г. Формирование гранных отверстий осевым вращающимся инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 14–22.

### Abstract

The theoretical foundations and methods are presented for forming holes with any number of facets on CNC machines using a special universal axial blade tool operating on the principle of rolling.

### Keywords:

faceted holes, axial blade universal tool, trajectory, parametric equation, Reuleaux triangle, CNC machine.

### For citation:

Paltaratski, S. G. Forming faceted holes with an axial rotating tool / S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 14–22.

### Введение

Использование гранных отверстий в машиностроении имеет специфическую и достаточно важную область применения. Следует только вспомнить бесшпоночные соединения для передачи больших крутящих моментов, используемые передовыми мировыми производителями станочного оборудования и инструментальной оснастки. Разработан ряд стандартов, которые регламентируют так называемые многоугольные профили.

Формирование таких отверстий, особенно глухих, в условиях классического механообрабатывающего производства, оснащенного универсальными станками и станками с ЧПУ и не имеющего специального оборудования, такого как электроэрозионные, прошивные, протяжные, долбежные и другие станки, является сложной, а в ряде случаев невыполнимой задачей.

В связи с этим разработка легкореализуемой, конкурентоспособной технологии получения гранных отверстий в условиях классического машинострои-

тельного производства является актуальной задачей, особенно в современных условиях импортозамещения.

На современном этапе развития металлообработки одним из основных методов, используемых при формировании гранных отверстий в серийном производстве, является метод качающего прошивания [1].

Неоспоримыми достоинствами этого метода является значительное снижение силовых параметров процесса резания по сравнению с классическим прошиванием. Однако данный метод, так же как и при прошивании, требует сверления предварительного отверстия, что увеличивает номенклатуру используемого режущего инструмента. Кроме этого, точность получаемых при таком методе отверстий не превышает 12-го качества.

В рамках статьи описан один из перспективных вариантов получения гранных отверстий на станках с ЧПУ фрезерно-сверлильно-расточной группы, заключающийся в применении

многолезвийного осевого режущего инструмента.

### **Формирование квадратных отверстий**

Формирование квадратных отверстий заключается в обкалывании фигур постоянной ширины по определенной траектории с одновременным вращением вокруг своей оси и перемещением вдоль оси на глубину резания. Ярким примером такой фигуры является треугольник Рёло [2, 3], при помощи которого возможно получить квадратное отверстие [4].

Одной из важных задач является разработка траектории движения режущего инструмента для формирования гранных отверстий.

Классическая траектория движения инструмента является кривой, состоящей из четырех дуг эллипса [5, 6]. На рис. 1 представлен пример траектории для формирования квадратного отверстия.

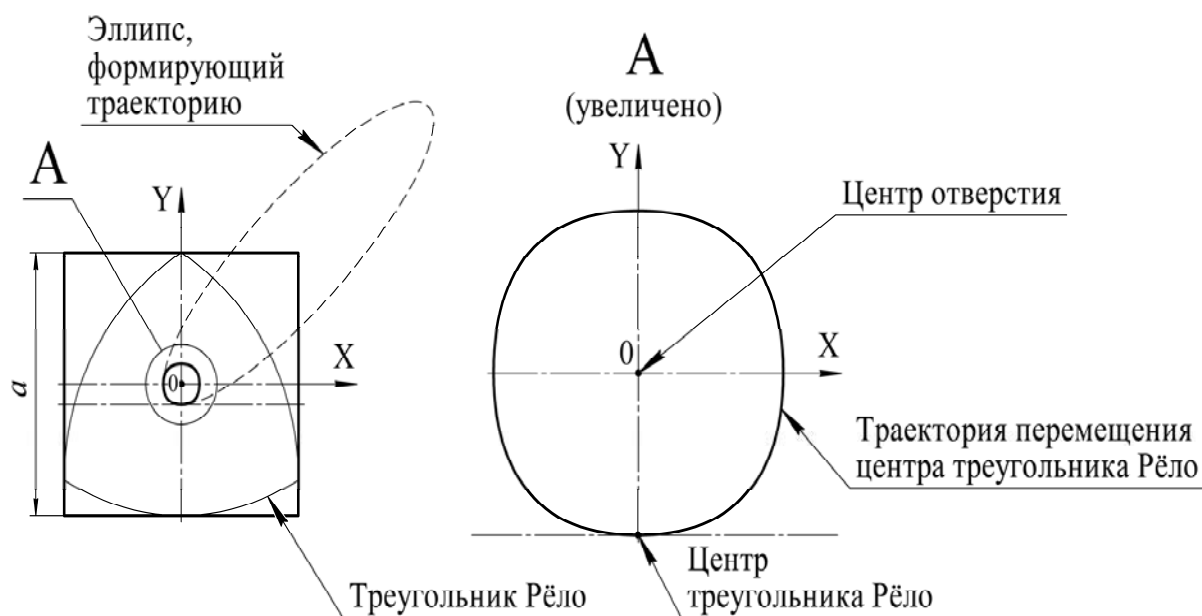


Рис. 1. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия, построенная по четырем эллипсам

Как видно из рисунка, центр квадратного отверстия совпадает с центром траектории движения инструмента, а центр треугольника Рёло – с нижней точкой траектории движения инструмента.

Эллипс в нижнем левом квадранте имеет параметрические уравнения:

$$x = 1 + \cos \beta + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \beta; \quad (1)$$

$$y = 1 + \sin \beta + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \beta, \quad (2)$$

где  $\beta \in \left[ \frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{3} \right]$ . Эллипс имеет центр

$(+1; +1)$ , большую полуось  $k = 1 + \frac{1}{\sqrt{3}}$ ,

малую полуось  $j = 1 - \frac{1}{\sqrt{3}}$  и повернут на  $45^\circ$ .

Таким образом, можно получить траекторию движения инструмента при обработке только квадратного отверстия [7]. В случае, когда нужно получить отверстие другой гранности, отличной от квадратной, такой способ не применим либо требует определенной доработки, которая будет описана ниже.

В [8] приведено уравнение траектории движения инструмента, в основе которого лежит треугольник Рёло, для формирования квадратного отверстия (рис. 2). Данная траектория не отличается от траектории, построенной по эллипсам.

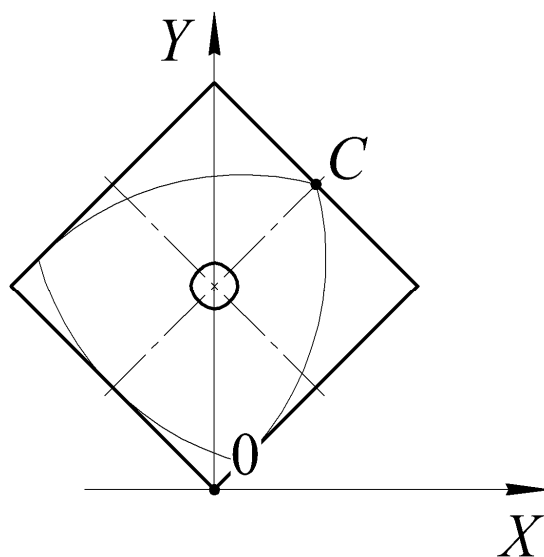


Рис. 2. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия, построенная по уравнению

При длине стороны квадрата, равной  $a$ , уравнение 1/4 траектории запишется как

$$x = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{6} - \beta \right) \right) \cdot a; \quad (3)$$

$$y = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{6} - \beta \right) \right) \cdot a \quad (4)$$

при  $\frac{\pi}{12} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}$ .



Выразим длину стороны квадрата через диаметр вписанной окружности:

$$a = d \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right), \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр вписанной окружности гранного отверстия;  $N$  – количество граней у формируемого отверстия.

Как видно из рис. 2, начало координат лежит на углу обрабатываемого отверстия, при этом отверстие наклонено на  $45^\circ$ . Это не совсем удобно с точки зрения программирования обработки на станке с ЧПУ. Преобразуем уравнение (4) таким образом, чтобы ось  $X$  проходила через центр обрабатываемого отверстия. Уравнение будет иметь вид:

$$y = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3-\sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot a - \sin 45^\circ. \quad (6)$$

Воспользуемся уравнениям преобразования, чтобы избавиться от угла наклона  $45^\circ$ :

$$x' = x \cdot \cos 45^\circ - y \cdot \sin 45^\circ; \quad (7)$$

$$y' = x \cdot \sin 45^\circ + y \cdot \cos 45^\circ. \quad (8)$$

Таким образом, ось координат проходит через центр обрабатываемого отверстия, при этом оно не имеет наклона (рис. 3). Преобразованное уравнение описывает траекторию в нижнем левом квадранте.

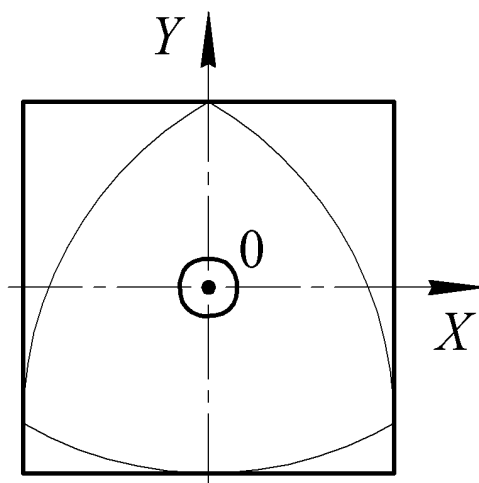


Рис. 3. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия с началом координат в центре этого отверстия

Так как сверло является осевым инструментом, преобразование траектории делает удобным составление программного продукта для обработки на станке с ЧПУ.

### **Формирование отверстий любой гранности**

Возьмем за основу сверление квадратных отверстий и рассмотрим сверление пяти-, шести- и семигран-

ных отверстий.

Как было описано выше, центр обрабатываемого отверстия совпадает с центром траектории движения инструмента, а центр фигуры постоянной ширины – с нижней точкой траектории движения инструмента. Таким образом, вписав фигуру постоянной ширины в гранное отверстие, можно получить центр траектории и его нижнюю точку. Расстояние от центральной и нижней точки траектории при обработке отвер-

стей разной гранности меняется, причем с увеличением числа граней оно уменьшается.

Исследования показали, что траектория обработки различных гранных отверстий (начиная с четырех) может иметь одинаковую форму, различия будут только в масштабе.

Найдем расстояние от центральной до нижней точки траектории обработки шестигранных отверстий и разделим эту длину на расстояние от центральной до нижней точки траектории обработки квадратных отверстий. Важно при этом, чтобы диаметры вписанной окружности квадратного и шестигранного отверстия были одинаковыми. Таким образом, это отношение будет описывать отношение масштаба траек-

тории при обработке шестигранных отверстий к траектории при обработке квадратных отверстий. Такой коэффициент масштаба будет равен  $k_{ГР} = 0,4074$ .

Умножим рассматриваемое параметрическое уравнение траектории на этот коэффициент и проверим адекватность полученной траектории. Для этого построим шестиугольник, впишем в него фигуру постоянной ширины и обкатаем по полученной траектории (рис. 4).

Как видно из рис. 4, данная траектория подходит для обработки таких отверстий.

Таким же способом были получены масштабы траектории для обработки пяти- и семигранных отверстий (рис. 5).

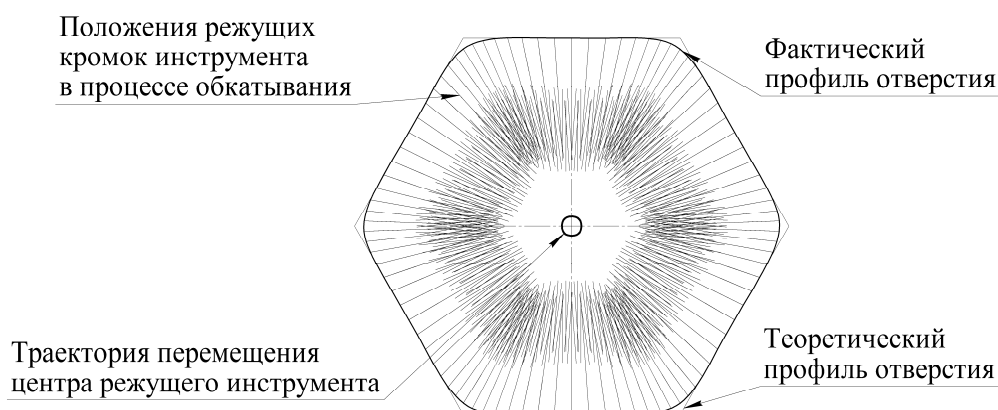


Рис. 4. Формирование шестигранного отверстия методом обката

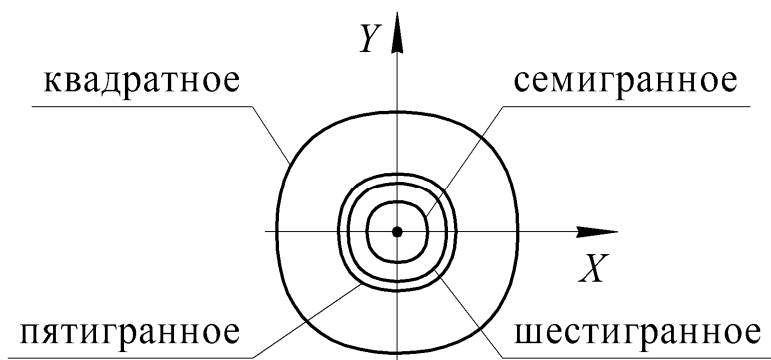


Рис. 5. Траектория движения центра инструмента при формировании гранных отверстий

Еще одним отличием обработки отверстий любой гранности, помимо масштаба траектории, будет количество полных проходов по траектории для формирования полного профиля вершиной инструмента. Для того чтобы получить квадратное отверстие, инструменту необходимо пройти по траектории 3 раза. Количество проходов

всегда на единицу меньше количества граней у обрабатываемого отверстия.

Таким образом, универсальное уравнение траектории движения инструмента, в основе которого лежат фигуры постоянной ширины, для формирования отверстий любой «гранности» будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \left( \left( \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left( d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) \right) \cdot \cos 45^\circ - \right. \\ \left. - \left( \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left( d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) - \sin 45^\circ \right) \cdot \sin 45^\circ \right) \cdot k_{зр}; \\ y = \left( \left( \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left( d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) \right) \cdot \sin 45^\circ + \right. \\ \left. + \left( \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left( d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) - \sin 45^\circ \right) \cdot \cos 45^\circ \right) \cdot k_{зр}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $k_{зр}$  – коэффициент масштаба, зависящий от количества граней обрабатываемого отверстия. Для квадратных отверстий  $k_{зр} = 1$ , для пятигранных отверстий  $k_{зр} = 0,4862$ , для шестигранных  $k_{зр} = 0,4074$ , для семигранных  $k_{зр} = 0,2507$ .

### Универсальный инструмент для формирования гранных отверстий

Имея универсальное уравнение траектории движения инструмента, возмож-

но рассмотреть вопрос об изготовлении универсального инструмента для формирования отверстий любой гранности с одинаковым диаметром вписанной окружности  $d_{ВП}$  (рис. 6).

Проведя теоретические исследования над четырех-, пяти-, шести- и восьмигранными отверстиями, выявили возможность изготовления универсального инструмента (рис. 7). Количество режущих кромок инструмента не зависит от количества граней у обрабатываемого отверстия.

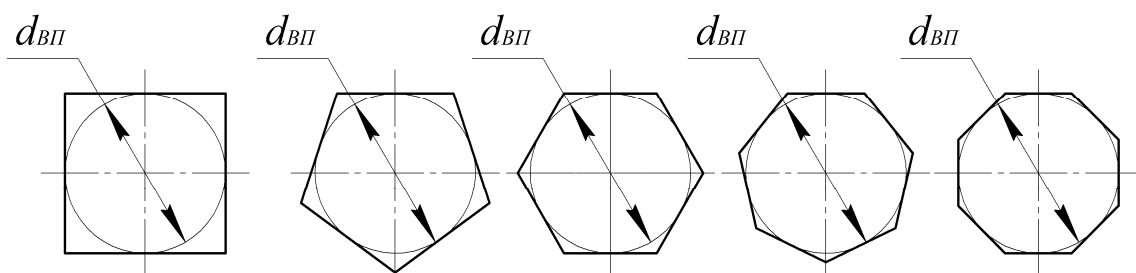


Рис. 6. Виды гранных отверстий с количеством граней, равным четырем, пяти, шести, семи и восьми, и одинаковым диаметром вписанной окружности  $d_{ВП}$

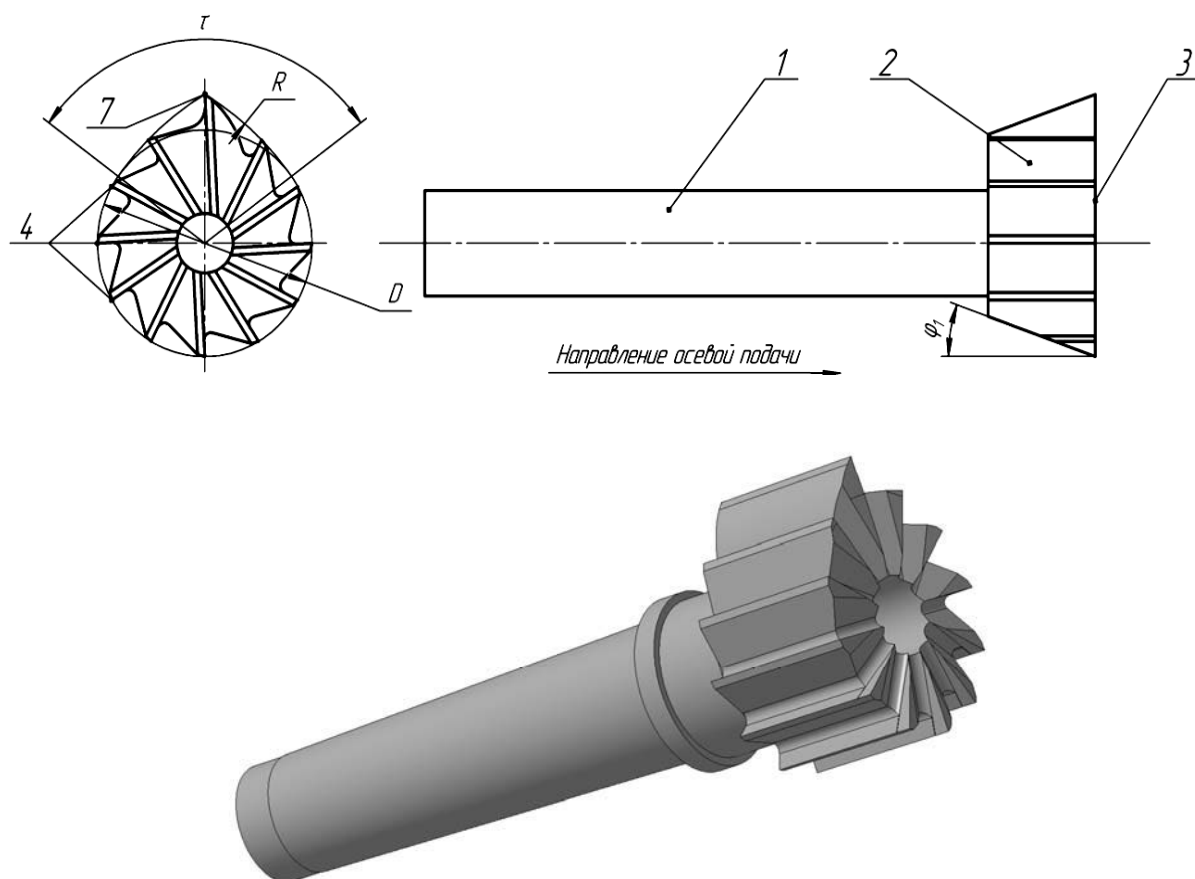


Рис. 7. Универсальный инструмент для формирования гранных отверстий

Осевой инструмент состоит из присоединительной части 1 и рабочей части 2. В данном случае присоединительная часть 1 выполнена в виде цилиндра.

Рабочая часть 2 инструмента содержит режущие зубья с вершинами зуба 4, формирующие режущую кромку, предназначенную для снятия обрабатываемого материала. Торцовая поверхность 3 рабочей части 2 имеет специфическую форму, у которой радиус дуг  $R$ , формирующий основной режущий зуб 7, равен диаметру вписанной окружности гранного отверстия  $d_{ВП}$ , диаметр инструмента  $D = 0,76d_{ВП}$ . Значение вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  находится в пределах от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , а значение контактного угла  $\tau$  – в пределах от  $105^\circ$  до  $110^\circ$ .

### **Принцип формирования гранных отверстий с использованием станков с ЧПУ**

При разработке управляющей программы необходимо учесть то, что задать перемещение инструмента по траектории, представленной в виде системы уравнений достаточно сложно, а для станков с ЧПУ первых поколений невозможно. Таким образом, для получения гранных отверстий на станках с ЧПУ любого поколения предлагается заменить траекторию перемещения оси инструмента дугами окружности, которые можно повторить путем круговой интерполяции.

Как пример далее приведена программа получения квадратных отверстий с размером сторон  $a = 16$  мм

на станке с ЧПУ с приводным инструментом.

D1 T1  
 G17 G95 F24,03 S33,52 M3  
 G0 X0 Y0 Z5  
 G1 X0 Y0 Z-0,1  
 G3 X0,2662 Y0,0171 R1,9754  
 G3 X0,5261 Y0,0762 R1,4367  
 G3 X0,7670 Y0,1898 R1,0763  
 G3 X0,9683 Y0,3637 R0,9172  
 G3 X1,1121 Y0,5876 R0,9707  
 G3 X1,1970 Y0,8401 R1,2328  
 G3 X1,2335 Y1,1043 R1,6856  
 G3 X1,2335 Y1,3711 R2,1947  
 G3 X1,1970 Y1,6352 R1,6856  
 G3 X1,1121 Y1,8878 R1,2328  
 G3 X0,9683 Y2,1117 R0,9706  
 G3 X0,7670 Y2,2856 R0,9172  
 G3 X0,5261 Y2,3991 R1,0763  
 G3 X0,2662 Y2,4582 R1,4367  
 G3 X0 Y2,4754 R1,9754  
 G3 X-0,2662 Y2,4582 R1,9754  
 G3 X-0,5261 Y2,3991 R1,4367  
 G3 X0,7670 Y2,2856 R1,0763  
 G3 X0,9683 Y2,1117 R0,9172  
 G3 X1,1121 Y1,8878 R0,9706  
 G3 X1,1970 Y1,6352 R1,2328  
 G3 X1,2335 Y1,3711 R1,6856  
 G3 X1,2335 Y1,1043 R2,1947  
 G3 X1,1970 Y0,8401 R1,6856  
 G3 X1,1121 Y0,5876 R1,2328  
 G3 X0,9683 Y0,3637 R0,9707  
 G3 X0,7670 Y0,1898 R0,9172

G3 X0,5261 Y0,0762 R1,0763  
 G3 X0,2662 Y0,0171 R1,4367  
 G3 X0 Y0 R1,9754  
 ...  
 G0 X0 Y0 Z5  
 M05  
 M30

### Выводы

Существующие методы получения гранных отверстий имеют ряд недостатков, среди которых дороговизна используемого оборудования и электроэнергии, невозможность обработки глухих отверстий, необходимость нескольких технологических переходов, необходимость индивидуального инструмента под каждый тип отверстий и др. [9].

Предложенный в статье вариант получения гранных отверстий осевым инструментом имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в некоторой универсальности получения отверстий любой гранности одним и тем же инструментом. Однако предлагаемый способ также имеет свою особенность, выражающуюся в том, что углы между гранями сопрягаются по дуге определенного радиуса, который напрямую зависит от диаметра вписанной в фигуру окружности.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубков, Н. Н.** Получение гранных отверстий методом качающейся прошивки / Н. Н. Зубков, А. В. Ломакин // *Технология машиностроения*. – 2008. – № 7. – С. 13–15.
2. **Радемахер, Г.** Кривые постоянной ширины / Г. Радемахер, О. Тёплиц // *Числа и фигуры. Опыты математического мышления: пер. с нем.* / Г. Радемахер, О. Тёплиц; под ред. И. М. Яглома. – Москва: Физматлит, 1962. – С. 195–211.
3. **Яглом, И. М.** Фигуры постоянной ширины / И. М. Яглом, В. Г. Болтянский // *Выпуклые фигуры* / И. М. Яглом, В. Г. Болтянский. – Москва; Ленинград: ГТТИ, 1951. – С. 90–105.
4. Особенности формирования гранных отверстий сверлением / А. П. Сериков [и др.] // 55 студенч. науч.-техн. конф., Могилев, 3–4 мая 2019 г.: тез. докл. – Могилев, 2019. – С. 61.
5. **Raviraj D. Gohil.** Design of cam geometry for minimization of fillet radius effect in square hole drilling operation / Raviraj D. Gohil, Manhar S. Kagthara, Piyush J. Mandaliya // *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*. – 2014. – Vol. 1, iss. 5. – P. 4470.
6. **Smith, S.** Drilling Square Holes / S. Smith // *The Mathematics Teacher*. – Reston: National Council of Teachers of Mathematics, 1993. – Vol. 86, № 7. – P. 579–583.
7. **Полторацкий, С. Г.** Особенности кинематики процесса сверления квадратных отверстий / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материа-*

лы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 59.

8. **Куренков, Е. Д.** Динамика точек треугольника Рёло [Электронный ресурс] / Е. Д. Куренков, О. В. Починка // Огарев – online. – 2016. – № 20. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/dinamika-tochek-treugolnika-ryolo>. – Дата доступа: 01.04.2022.

9. **Полторацкий, С. Г.** Основные способы получения гранных отверстий в современном машиностроении / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование: сб. тр. – Брянск: БГТУ, 2022. – С. 65–71.

*Статья сдана в редакцию 16 апреля 2022 года*

**Сергей Григорьевич Полторацкий**, аспирант, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: poltos17@gmail.com.

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

**Siarhei Grigoryevich Paltaratski**, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: poltos17@gmail.com.

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

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_23

УДК 621.9.047:669:538.8

*М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева*

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ ОБРАБОТКОЙ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*M. A. Rabyko, V. M. Shemenkov, A. N. Eliseeva*

## STRUCTURAL PHASE MODIFICATION OF DIE STEELS BY GLOW DISCHARGE TREATMENT IN THE MAGNETIC FIELD

### Аннотация

Представлены результаты исследования структуры, фазового состава и глубины модифицированного слоя инструментальных штамповых сталей 4Х4ВМФС и Х12МФ промышленной плавки после непосредственной классической термической обработки и последующей обработки при различных энергетических характеристиках тлеющего разряда в магнитном поле.

### Ключевые слова:

тлеющий разряд, структура, фазовый состав, магнитное поле, модифицирующая обработка, поверхностный слой, сталь.

### Для цитирования:

Рабыко, М. А. Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.

### Abstract

The paper presents the results of a research into the structure, phase composition and depth of a modified layer of 4X4VMFC and X12MF tool die steels of industrial melting after direct classical heat treatment and subsequent processing at various energy characteristics of a glow discharge in the magnetic field.

### Keywords:

glow discharge, structure, phase composition, magnetic field, modifying treatment, surface layer, steel.

### For citation:

Rabyko, M. A. Structural phase modification of die steels by glow discharge treatment in the magnetic field / M. A. Rabyko, V. M. Shemenkov, A. N. Eliseeva // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 23–31.

### Введение

Штамповая оснастка, используемая для придания телу или объекту необходимой формы и размеров, работает в сложных условиях. Несмотря на вид обработки (холодная или горячая), вся оснастка, особенно при обработке изделий из металлов и их сплавов, испытывает колоссальные контактные давления на рабочие поверхности. Указанное

воздействие зачастую приводит к поверхностному схватыванию материалов изделия и штампа, вызывая тем самым интенсивный износ активных поверхностей инструментальной оснастки.

Как правило, используемые графитсодержащие, минеральные и силиконовые смазки при всех их положительных эффектах не решают полностью проблему интенсивного износа формообразующих поверхностей штам-

повой оснастки.

Учитывая определяющую роль стоимости штамповой оснастки в себестоимости выпускаемой с ее использованием продукции, на производстве постоянно внедряют технологии, позволяющие повысить ее износостойкость.

В последнее время в практике разработки мероприятий по повышению износостойкости инструментальной оснастки преобладают два основных подхода.

Первый подход связан с разработкой материалов с новыми физико-металлическими свойствами, методами их получения. Как пример, это функционально-градиентные материалы, полученные при помощи послойного синтеза. Однако данный подход характеризуется большими затратами, связанными с получением исходных материалов высокого качества. Кроме этого, он предполагает использование специального технологического оборудования (к примеру, 3D-принтеры).

Второй подход – классический, но вместе с тем не утративший своей перспективности. Он связан с разработкой различных методов создания барьерных поверхностных слоев с повышенными физико-механическими свойствами по сравнению с основным материалом инструментальной оснастки.

В рамках второго подхода отделены способы, основанные на ионно-плазменной модификации поверхностных слоев, которые положительно себя зарекомендовали. Неоспоримым преимуществом указанных способов является их универсальность, позволяющая осуществлять обработку не только, к примеру, штамповых сталей, но и всего спектра инструментальных материалов. Кроме этого, способы отличаются относительной дешевизной и хорошей повторяемостью результатов [1].

Как отмечалось в [2–5], использование тлеющего разряда в качестве источника ионизации остаточных газов при модифицирующей обработке раз-

личных материалов весьма перспективно и позволяет получить достаточно неплохие результаты.

С точки зрения интереса науки, дальнейшее развитие этого направления может быть связано с разработкой новых подходов к управлению энергетическими характеристиками тлеющего разряда, т. к. данные параметры в большей степени влияют на эффективность процесса модифицирования.

Из практики реализации катодного распыления известно, что на вольт-амперную характеристику тлеющего разряда в значительной мере оказывает влияние давление в камере между анодом и катодом, а также внешнее магнитное поле, инициируемое в области катодного падения потенциала разряда.

Кроме этого, плазма вакуумного разряда практически полностью ионизована, и на основании проведенных исследований установлено, что даже слабые магнитные поля (на уровне 0,2 мТл) оказывают существенное влияние на характеристики разряда [6].

Исходя из полученных результатов исследования в данной области был предложен способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвёрдого материала, сущность которого заключается в том, что изделия размещают на столе-катоде, расположенном в силовых линиях постоянного магнитного поля, и обрабатывают поверхности изделий плазмой тлеющего разряда, возбужденного в вакууме [7].

В качестве источника, создающего прикатодное магнитное поле, в предложенном способе может выступать кольцевая катушка индуктивности, которая позволяет сформировать прикатодное магнитное поле с необходимой магнитной индукцией (рис. 1).

Целью работы являлось изучение влияния модифицирующей обработки тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем на структурные и фазовые превращения, протекающие в поверхностном слое штамповых сталей.



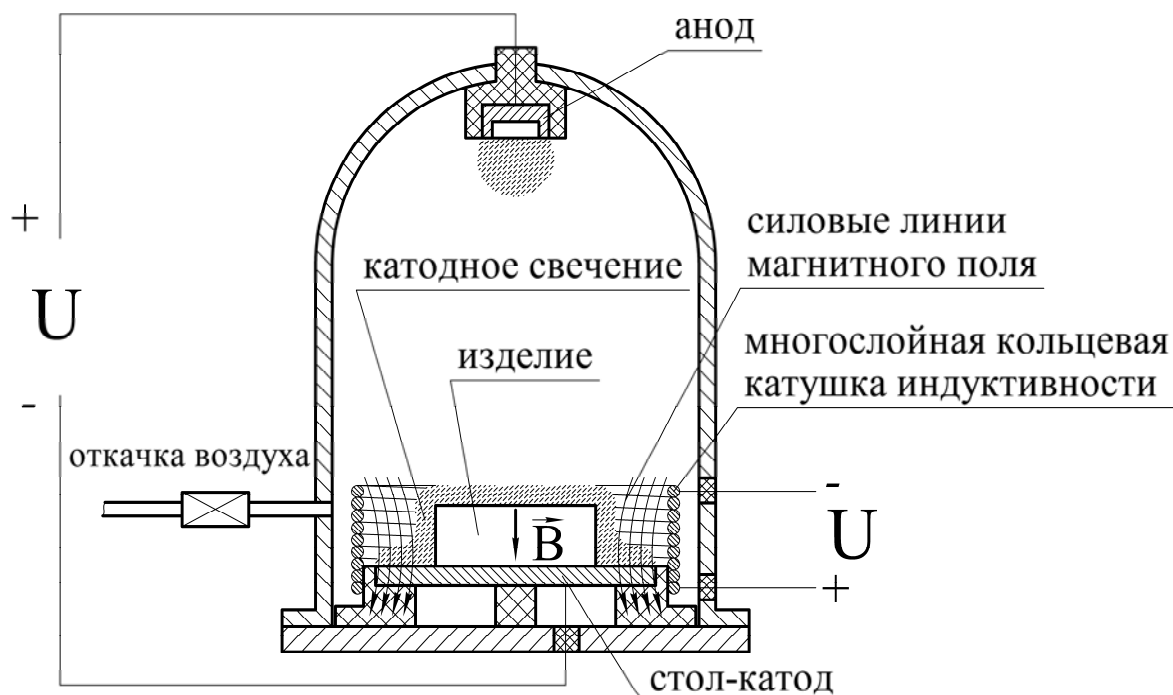


Рис. 1. Схема установки для реализации процесса

Исследования проводились на высококачественной износостойкой инструментальной штамповой стали 4X4BMФС (ДИ-22) и высокохромистой инструментальной полутеплостойкой стали высокой твердости с повышенной износостойкостью X12MФ. Выбор указанных марок обусловлен заинтересованностью в установлении влияния обработки тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем на инструментальные стали, используемые как для холодной, так и горячей штамповки.

Образцы из исследованных сталей предварительно подвергались классической термической обработке:

- сталь 4X4BMФС (ДИ-22) ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в масле с 1130 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском при 550 °С в течение 2 ч;

- сталь X12MФ ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в масле с 970 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим

отпуском при 180 °С в течение 1,5 ч.

### Методика исследования

В работе применялись электронно-микроскопический и рентгеноструктурный методы анализа структуры и фазового состава материалов. Для определения твердости поверхностного слоя использовался дюрометрический метод.

Электронно-микроскопический анализ поверхности образцов проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 2SBA с применением стандартного детектора вторичных электронов. Подготовка образцов для металлографических исследований осуществлялась по стандартной методике. В качестве реактива для травления использовался 5-процентный раствор азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) в спирте ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Травление осуществлялось в течение 40...45 с при температуре раствора 343 К [8].

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на автоматизированном

рентгеновском комплексе, на базе дифрактометра ДРОН-3М с применением монохроматизированного  $\text{CoK}\alpha$ -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  $2\theta$ , равном 40...125 град.

Физическое уширение дифракци-

онных линий определялось методом аппроксимации с помощью программного обеспечения HighScore++ (Panalytical, Нидерланды). В качестве эталона использовался образец отожженной стали 10 ГОСТ 1050–88 [9, 10].

Измерение микротвердости рабочей поверхности образцов проводилось на микротвердомере Zwick Roell ZHV 1M при действии нагрузки 0,98 Н.

Обработка образцов тлеющим разрядом осуществлялась по трем основным режимам, указанным в табл. 1. Время обработки по всем режимам составило 30 мин.

Табл. 1. Режимы обработки образцов в тлеющем разряде

Режим обработки	Напряжение горения тлеющего разряда $U$ , В	Плотность тока $J$ , $\text{mA}/\text{m}^2$	Магнитная индукция прикатодного магнитного поля $B$ , мТл
1	1000	0,125	40...60
2	2000	0,250	
3	3000	0,375	

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты металлографического анализа поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС до обработки указывают на то, что структура стали соответствует классической мартенситной структуре с карбидными включениями (рис. 2, а).

Обработка тлеющим разрядом приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 70 мкм (рис. 2, б–г). Наиболее ярко этот эффект наблюдается при обработке по режимам 1 и 2.

На основании рентгеноструктурного анализа установлено, что в исходном состоянии сталь содержит мартенсит ( $\alpha\text{-Fe}$ ), остаточный аустенит ( $\gamma\text{-Fe}$ ) и незначительное количество кар-

бида хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (рис. 3).

Параметр кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы (табл. 2) существенно превышает параметр решетки феррита вследствие присутствия атомов углерода в междоузлиях объемно-центрированной кубической решетки мартенситной фазы, что указывает на формирование пересыщенного твердого раствора углерода и легирующих элементов в мартенсите ( $\alpha\text{-Fe}$ ).

Уменьшение физического уширения дифракционных линий (220) после обработки свидетельствует о снижении плотности дефектов кристаллического строения. Особенно ярко эта картина наблюдается при обработке стали по режиму 1, где, помимо уменьшения уширения дифракционных линий (220), такая же тенденция прослеживается и с дифракционной линией (110).

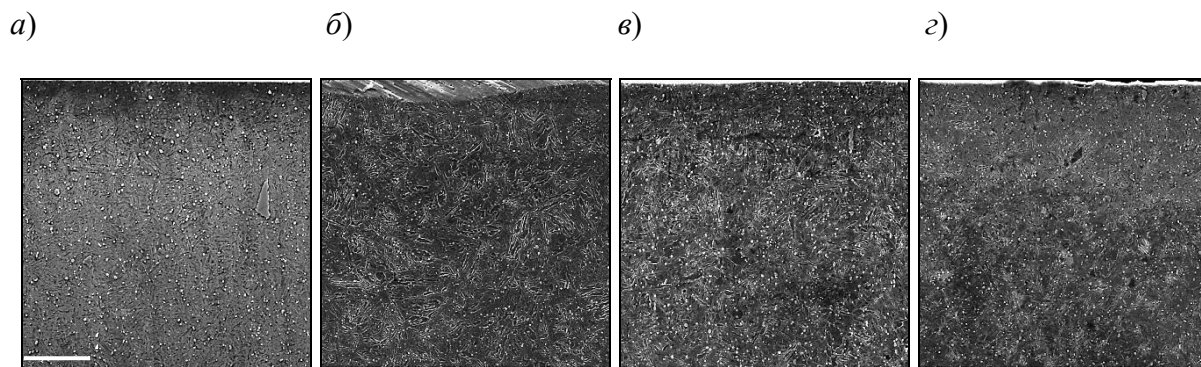


Рис. 2. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4X4VMFC: а – в состоянии поставки; б – после обработки по режиму 1; в – после обработки по режиму 2; з – после обработки по режиму 3

Табл. 2. Фазовый состав, количество остаточного аустенита  $A_{ост}$ , параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и плотность дислокаций  $\rho$  стали 4X4VMFC

Образец (режим обработки)	Фазовый состав	$A_{ост}$ , %	$a_{\alpha-Fe}$ , нм		$\beta_{110}$ , $10^{-3}$ рад	$\beta_{220}$ , $10^{-3}$ рад	$\rho$ , $см^{-2}$ , $\times 10^{12}$
			Эксперимент	Эталон [9]			
Исходный	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_{23}C_6$	4,2	0,2878	0,28664	7,9946	48,3751	3,22
Режим 1	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_{23}C_6$	4,1	0,2877		7,2771	37,4280	1,92
Режим 2	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_{23}C_6$	4,1	0,2876		7,4437	42,3989	4,94
Режим 3	$\alpha-Fe, \gamma-Fe, Cr_{23}C_6$	4,0	0,2877		8,2766	40,0274	4,41

В совокупности со снижением плотности дислокаций, определенной по линии (220), данный эффект может свидетельствовать об уменьшении напряжений в стали, вызванном протеканием процесса отпуска при ее обработке тлеющим разрядом.

На основании металлографического анализа поверхностного слоя стали X12MФ установлено, что структура стали состоит из мартенсита и избыточных карбидов (рис. 4, а). Исходя из особенностей производства высокохромистой инструментальной полутеплостойкой стали высокой твердости с повышенной износостойкостью видно, что входящий в ее состав хром приводит к получению неоднородностей, выражающихся в образовании полосчатых структур, ориентированных в направле-

нии деформации.

Обработка стали X12MФ тлеющим разрядом в прикатодном магнитном поле приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 80 мкм (рис. 4, б–з). Также наблюдается изменение формы карбидных включений с пластинчатой на сферическую.

Рентгеноструктурный анализ выявил, что в исходном состоянии фазовый состав стали X12MФ включает в себя мартенсит ( $\alpha-Fe$ ), остаточный аустенит ( $\gamma-Fe$ ) и карбиды  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3C$  (рис. 5). Параметр решетки мартенсита ( $\alpha-Fe$ ) существенно превышает параметр решетки феррита вследствие присутствия в ней большого количества легирующих элементов (табл. 3).

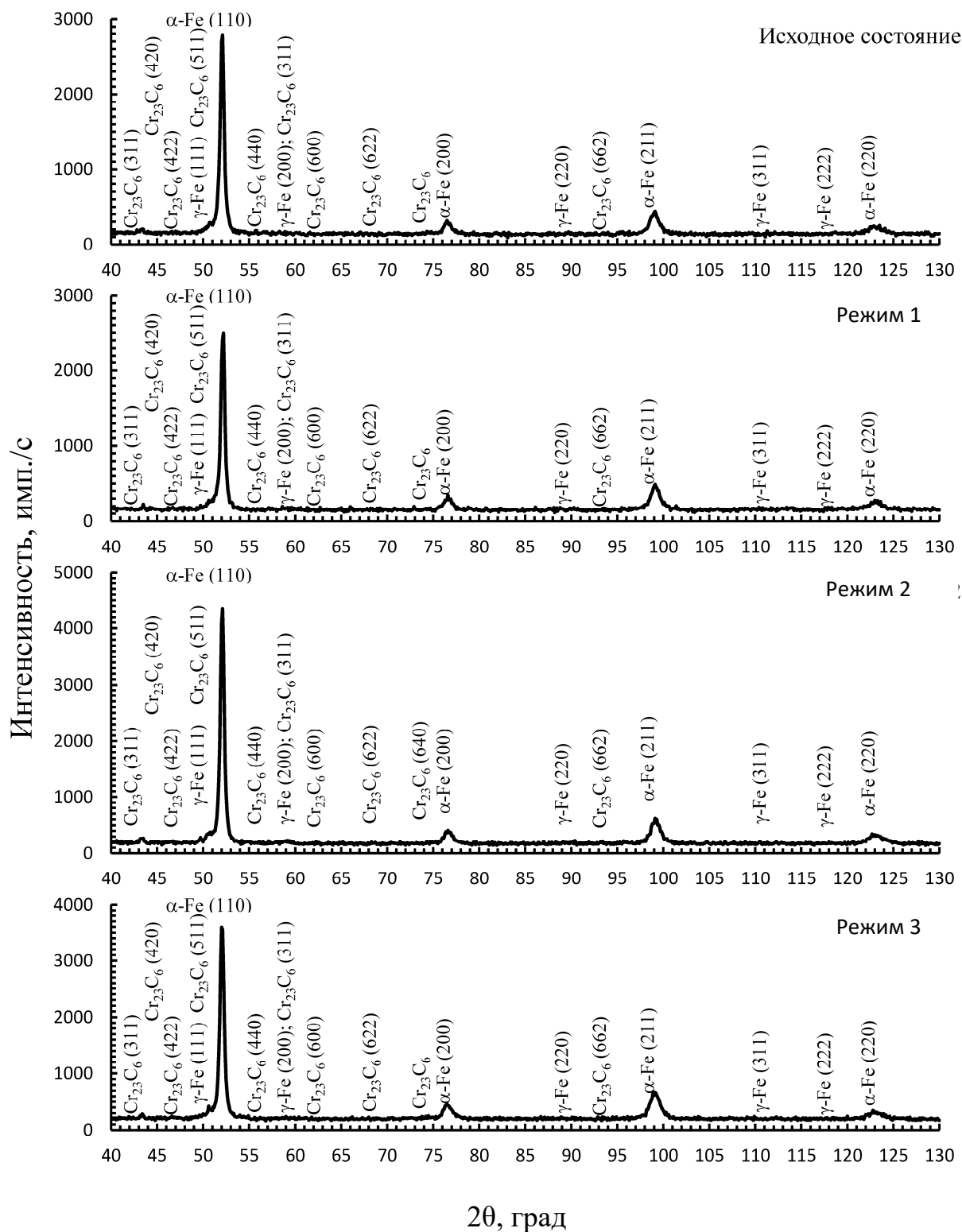


Рис. 3. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4Х4ВМФС в исходном состоянии и после обработки тлеющим разрядом с различными режимами

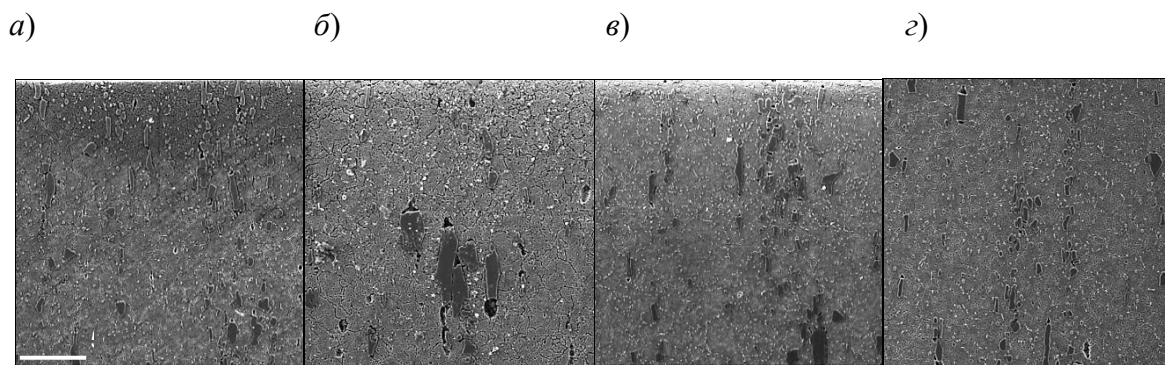


Рис. 4. Структура стали X12MF: *a* – в состоянии поставки; *b* – после обработки по режиму 1; *v* – после обработки по режиму 2; *z* – после обработки по режиму 3

Табл. 3. Фазовый состав, количество остаточного аустенита  $A_{ост}$ , параметр решетки  $a$ , физическое уширение  $\beta$  дифракционных линий и плотность дислокаций  $\rho$  стали X12MF

Образец (режим обработки)	Фазовый состав	$A_{ост}$ , %	$a_{\alpha-Fe}$ , нм		$\beta_{110}$ , $10^{-3}$ рад	$\beta_{220}$ , $10^{-3}$ рад	$\rho$ , см <sup>-2</sup> , $\times 10^{12}$
			Эксперимент	Эталон [9]			
Исходный	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C	17,0	0,2874	0,28664	6,8172	38,2383	2,00
Режим 1	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C	9,7	0,2877		11,8842	44,0573	2,67
Режим 2	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C	13,1	0,2876		9,4168	39,4680	4,27
Режим 3	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C	12,5	0,2877		10,4655	39,1005	4,20

Физическое уширение дифракционных линий от мартенситной фазы имеет достаточно высокие значения ( $38,24 \cdot 10^{-3}$  рад) (см. табл. 2), что может быть обусловлено высокой плотностью дефектов кристаллического строения, что является характерным для мартенсита в сталях.

Содержание карбидной фазы после обработки по режимам 2 и 3 снижается по сравнению с исходным состоянием. Такое понижение может быть связано с выделением в процессе обработки из твердого раствора легирующих элементов и образованием ими карбидов, в результате чего происходит превраще-

ние  $\gamma$ -Fe  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe.

После всех режимов обработки регистрируется существенное снижение в стали остаточного аустенита. Максимальное понижение количества остаточного аустенита регистрируется после обработки стали по режиму 1.

Обработка тлеющим разрядом в магнитном поле приводит к увеличению уширения дифракционных линий. Наиболее ярко выраженное возрастание уширения линий  $\alpha$ -Fe обнаружено после обработки по режиму 1. Максимальное количество дислокаций регистрируется после обработки по режимам 2 и 3.

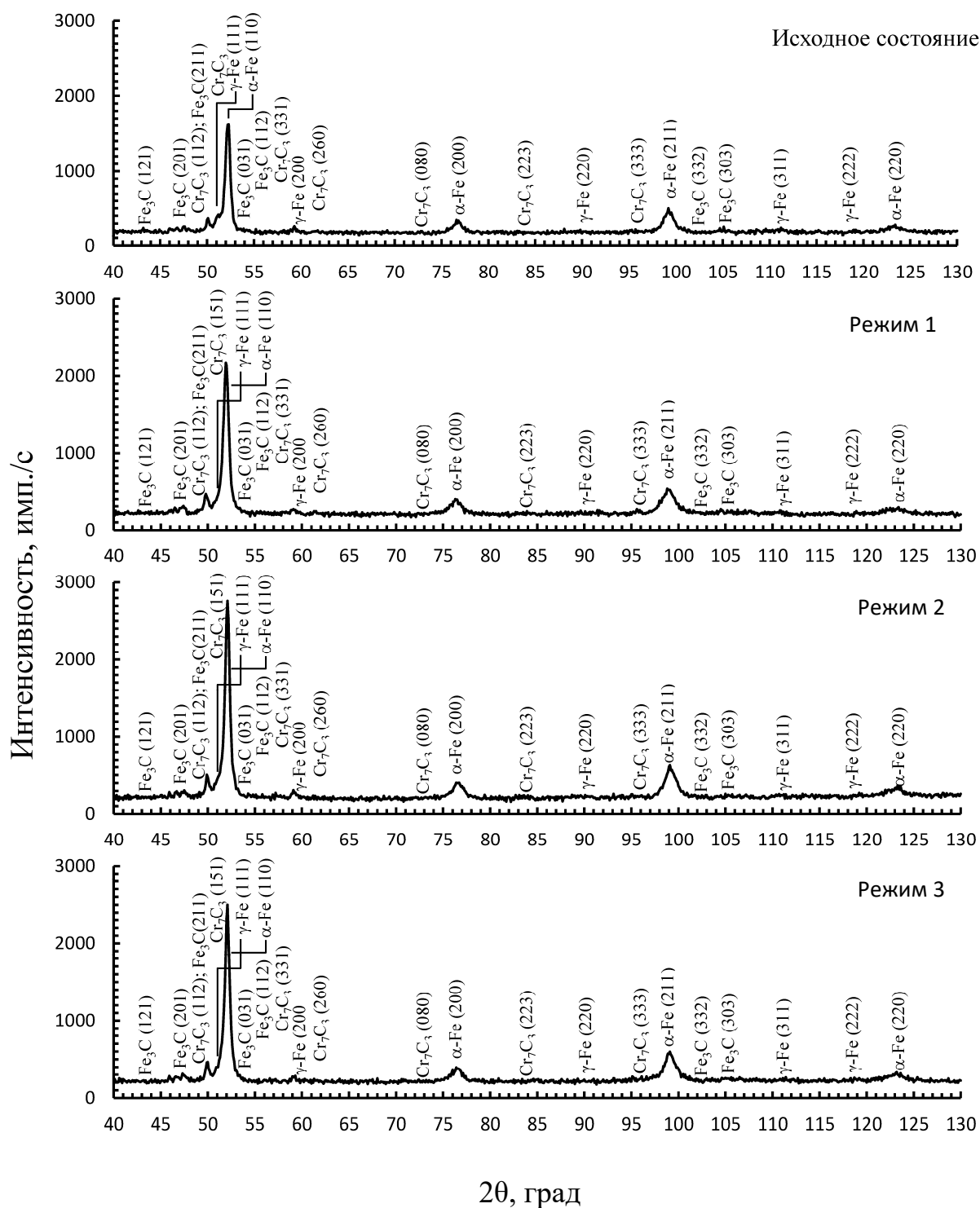


Рис. 5. Фрагменты дифрактограмм стали X12МФ до и после модифицирующей обработки в тлеющем разряде с различными параметрами горения

### Выводы

Обработка образцов из стали 4Х4ВМФС приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы, снижению плотности дефектов кристаллического строения в поверхностном слое глубиной до 70 мкм.

Обработка образцов из стали Х12МФ приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы, снижению остаточного аустенита и протеканию полиморфного превращения  $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$  в поверхностном слое глубиной до 80 мкм.

### 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. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость сталей, подвергнутых химико-термической обработке / В. М. Шеменков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 100–113.
3. **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. – № 4. – С. 118–127.
4. **Шеменков, В. М.** Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость инструментальных штамповых сталей / В. М. Шеменков, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова, О. В. Обидина // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 28–38.
5. **Белая, М. А.** Влияние технологических факторов обработки тлеющим разрядом на твердость и износостойкость сталей 5Х3В3МФС и Х12 / М. А. Белая // Новые материалы и технологии: материалы V Рос.-Казахстанской молодежной науч.-техн. конф. – Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2017. – С. 42–48.
6. **Духопельников, Д. В.** Влияние магнитного поля на вольт-амперную характеристику вакуумного дугового разряда / Д. В. Духопельников, Д. В. Кириллов // Наука и Образование. – 2015. – № 11. – С. 124–135.
7. Способ упрочнения изделий из металла, или сплава, или сверхтвердого материала: пат. ВУ 19126 / В. М. Шеменков, М. А. Белая. – Опубл. 30.04.2015.
8. **Анисович, А. Г.** Практика металлографического исследования материалов: монография / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 221 с.: ил.
9. **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.
10. **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 17 мая 2022 года

**Марина Александровна Рабыко**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: belay-marina@yandex.by.

**Анна Николаевна Елисеева**, ассистент, Белорусско-Российский университет. E-mail: anuta994@mail.ru.

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

**Marina Aleksandrovna Rabyko**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: Belay-marina@yandex.by.

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

**Anna Nikolaevna Eliseeva**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: anuta994@mail.ru.

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_32

УДК 629.3

*В. П. Тарасик*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ «РЫВОК РУЛЯ» ПРИ ОЦЕНКЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ

*V. P. Tarasik*

## SIMULATION OF THE «STEERING WHEEL JERK» TEST MODE WHEN ASSESSING VEHICLE STEERABILITY AND STABILITY

### Аннотация

Предложена методика имитационного моделирования и исследования процесса движения автомобиля при выполнении маневра «рывок руля». Исследования выполнены на примере грузового автомобиля категории  $N_3$ . Приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение параметров и характеристик, позволяющих оценить управляемость и устойчивость движения автомобиля при выполнении маневра.

### Ключевые слова:

автомобиль, рулевое колесо, маневр «рывок руля», боковой увод колес, боковое скольжение, кривизна траектории, характеристика траекторной управляемости, характеристика времени 90-процентной реакции автомобиля.

### Для цитирования:

Тарасик, В. П. Моделирование режима испытаний «рывок руля» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 32–40.

### Abstract

A technique for simulation modeling and research on the process of vehicle movement during a «steering wheel jerk» maneuver is proposed. The research was carried out based on a truck of the  $N_3$  category. The resulting graphs are presented, illustrating the change in parameters and characteristics, which make it possible to assess vehicle steerability and stability while performing this maneuver.

### Keywords:

car, steering wheel, «steering wheel jerk» maneuver, wheel slipping, sidewise skidding, trajectory curvature, trajectory control characteristic, time characteristic of 90 per cent vehicle response

### For citation:

Tarasik, V. P. Simulation of the «steering wheel jerk» test mode when assessing vehicle steerability and stability / V. P. Tarasik // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 32–40.

Эффективность использования автомобиля для выполнения транспортной работы в реальных условиях определяется его потенциальными физическими свойствами и степенью полноты их реализации. Среди множества свойств автомобиля управляемость и устойчи-

вость представляют особую значимость, поскольку связаны с обеспечением безопасности движения при реализации высокой скорости и производительности выполнения транспортной работы.

Методы определения характеристик и параметров оценки функцио-



нальных свойств управляемости и устойчивости автомобиля подробно рассмотрены в [1–3]. Технические требования к управляемости и устойчивости автотранспортных средств изложены в ГОСТ 31507–2012 [4]. Показатели и характеристики исследуемых свойств определяются в критических (нештатных) режимах движения автомобиля, подвергаемого испытаниям, с выполнением соответствующих маневров: смена полосы движения («переставка»), вход в поворот, рывок руля и др.

В статье изложена методика имитационного моделирования тестового режима испытаний «рывок руля» и приведен пример ее использования.

### Цель исследования

На основе математического моделирования на начальной стадии проектирования автомобиля оценить возможности прогнозирования параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения на режиме «рывок руля».

### Методика исследования

Исследования выполнялись с учетом предписаний стандарта [4]. Имитация поворота рулевого колеса производится с угловой скоростью  $\omega_{p0}$  не менее 400 град/с, и затем оно удерживается в конечном положении до окончания эксперимента. Опыты выполняются при различных конечных значениях угла поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ . В каждом последующем опыте значение  $\alpha_{pk}$  увеличивают ступенчато до достижения бокового ускорения автомобиля  $a_y$  для АТС категорий  $M_1$ ,  $M_2$  и  $N_1$  не менее  $4,5 \text{ м/с}^2$ , для АТС категорий  $M_3$ ,  $N_2$  и  $N_3$  не менее  $2,5 \text{ м/с}^2$ . Предельное значение  $a_y$  ограничивается условиями сцепления колес с опорной поверхностью дороги или отрыва колес от дороги.

Для моделирования режима испытаний «рывок руля» используются динамическая и математическая модели, разработанные для исследования управляемости и устойчивости автомобиля при выполнении маневра «переставка» [5]. Исследования проведены на примере грузового автомобиля МАЗ-5337 (категория  $N_3$ ). Параметры автомобиля приведены в [5].

Предельные углы поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ , град, для автомобилей  $N_3$  определяются по формулам [1–4]:

$$\alpha_{p \min} = \frac{180(0,72L + 0,2)u_p}{100\pi}; \quad (1)$$

$$\alpha_{p \max} = \frac{180(0,72L + 2,6)u_p}{100\pi}, \quad (2)$$

где  $L$  – база автомобиля, м;  $u_p$  – передаточное число рулевого привода.

У автомобиля МАЗ-5337  $L = 4,75$  м,  $u_p = 23,6$ , в результате  $\alpha_{p \min} = 48,949$  град,  $\alpha_{p \max} = 81,401$  град.

При испытаниях измеряют и регистрируют изменения во времени угла поворота рулевого колеса  $\alpha_p = f(t)$ , скорости автомобиля  $v_a = f(t)$ , угловой скорости его вращения  $\omega_z = f(t)$  относительно вертикальной оси  $Cz$ , бокового ускорения центра масс автомобиля  $a_y = f(t)$ .

При моделировании маневра «рывок руля» имитация скорости поворота руля  $\omega_p = f(t)$  выполнялась на основе выражения

$$\omega_p = \begin{cases} \omega_{p0} & \text{при } 0 \leq \alpha_p \leq \alpha_{pk}; \\ 0 & \text{при } \alpha_p > \alpha_{pk}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega_p$  – изменение угловой скорости вращения рулевого колеса в процессе осуществления маневра «рывок руля», рад/с;  $\omega_{p0}$  – значение угловой скорости

вращения рулевого колеса во время совершения рывка, рад/с;  $\alpha_p$  – текущее значение угла поворота рулевого колеса в период рывка, рад;  $\alpha_{pk}$  – конечное значение угла поворота, рад.

Функция изменения угла поворота рулевого колеса во времени  $\alpha_p = \int \omega_p dt$ .

При моделировании маневра «рывок руля» для исследуемого автомобиля МАЗ-5337 осуществлялось варьирование конечного значения угла поворота  $\alpha_{pk}$  в пределах 10...80 град с шагом 10 град при соответствующем контроле изменения параметров, характеризующих качество процесса управления и устойчивость движения автомобиля. Угловая скорость поворота рулевого колеса принималась  $\omega_{p0} = 450$  град/с. Рассмотр-

рим ряд полученных при моделировании графиков, отображающих изменение исследуемых характеристик движения.

На рис. 1, а представлены графики изменения во времени угловой скорости вращения автомобиля  $\omega_z = f(t)$  относительно вертикальной оси  $Cz$ , на рис. 1, б – курсового угла поворота продольной оси  $\gamma = f(t)$ , на рис. 1, в – изменения бокового ускорения автомобиля  $a_y = f(t)$  при трех значениях угла поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ : 30, 60 и 75 град. Графики, полученные при этих значениях  $\alpha_{pk}$ , обозначены соответственно 1, 2 и 3. Очевидно, что  $\omega_z$ ,  $a_y$  и  $\gamma$  существенно зависят от величины рывка руля  $\alpha_{pk}$ .

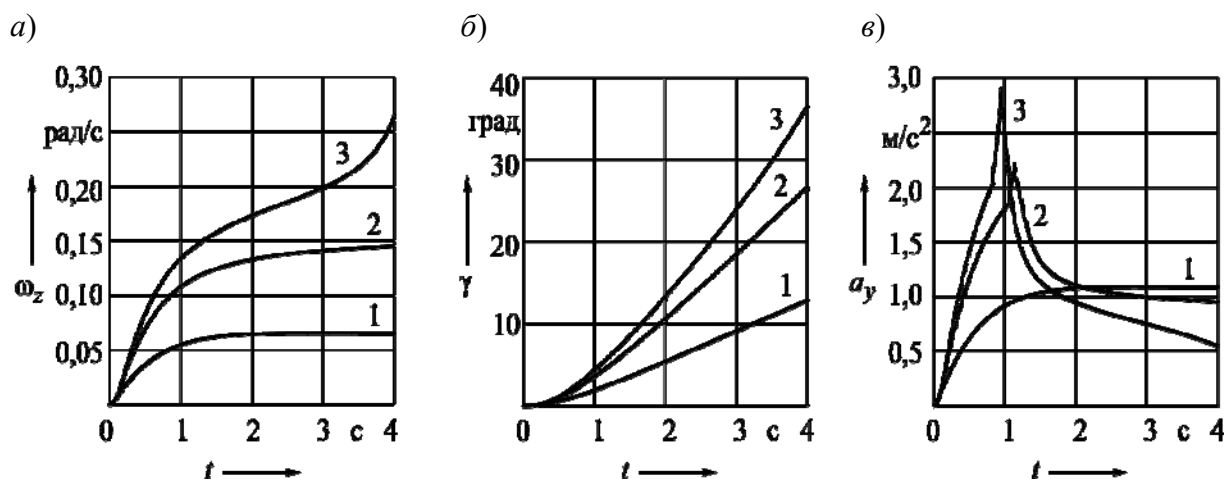


Рис. 1. Изменение угловой скорости вращения автомобиля  $\omega_z = f(t)$  (а), курсового угла поворота продольной оси  $\gamma = f(t)$  (б) и бокового ускорения автомобиля  $a_y = f(t)$  (в)

Согласно полученным результатам моделирования, при  $\alpha_{pk} \leq 70$  град достигается устойчивая конечная скорость вращения автомобиля. Превышение отмеченной величины  $\alpha_{pk}$  приводит к нарушению устойчивости параметров движения: угловая скорость вращения  $\omega_z$  при  $\alpha_{pk} = 75$  град не стабили-

зируется (см. рис. 1, а, график 3), на графиках ускорений  $a_y$  возникают пиковые всплески значений (см. рис. 1, в, графики 2 и 3). Причина этого заключается в возрастании бокового увода и скольжения колес автомобиля.

На рис. 2, а–в приведены графики изменения во времени углов бокового

увода передних и задних колес  $\delta_{yв1}$  и  $\delta_{yв2}$ , а на рис. 3, а, б – соответствующие им графики бокового скольжения

колес  $\lambda_{s1}$  и  $\lambda_{s2}$  при различных углах рывка руля.

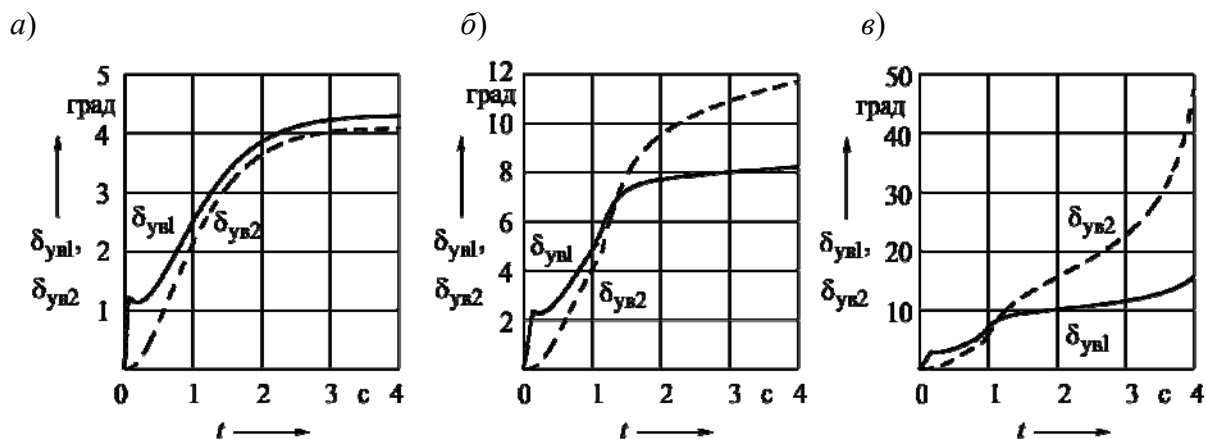


Рис. 2. Изменение углов бокового увода передних и задних колес  $\delta_{yв1}$  и  $\delta_{yв2}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

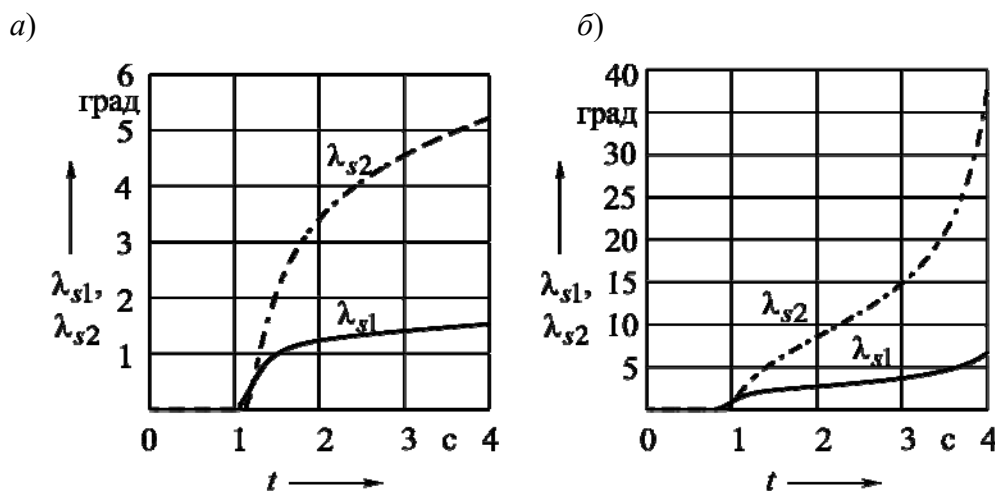


Рис. 3. Изменение бокового скольжения колес  $\lambda_{s1}$  и  $\lambda_{s2}$  при углах рывка руля 60 град (а) и 75 град (б)

Отметим, что углы увода  $\delta_{yвi}$  содержат две составляющие, обусловленные упругой деформацией колес  $\delta_{yвi}$  под воздействием боковой силы  $F_{yi}$  и скольжением колес относительно опорной поверхности  $\lambda_{si}$ , т. е.  $\delta_{yвi} = \delta_{yвi} + \lambda_{si}$ .

При  $\alpha_{рк} \leq 40$  скольжение колес незначительное, поэтому  $\omega_z$  и  $a_y$  плавно нарастают после осуществления рывка руля. При больших значениях  $\alpha_{рк}$  с увеличением ускорения  $a_y$ , примерно при  $t \approx 1$  с, начинается резкое нараста-

ние скольжения  $\lambda_{si}$ , а на графике ускорения возникает всплеск. Это отражается и на изменении протекания всех остальных исследуемых характеристик движения автомобиля. Значения  $\lambda_{si}$  определялись по уравнению регрессии, приведенному в [5].

На рис. 4, а–в показаны графики изменения кривизны траектории поворота

та автомобиля  $K_{tr} = f(t)$  вследствие рывка руля при  $\alpha_{рк}$ , равном соответственно 30, 60 и 75 град. При  $\alpha_{рк} = 75$  град кривизна траектории нарастает так интенсивно, что в результате автомобиль начинает раскручиваться на ограниченной площадке и происходит потеря устойчивости движения.

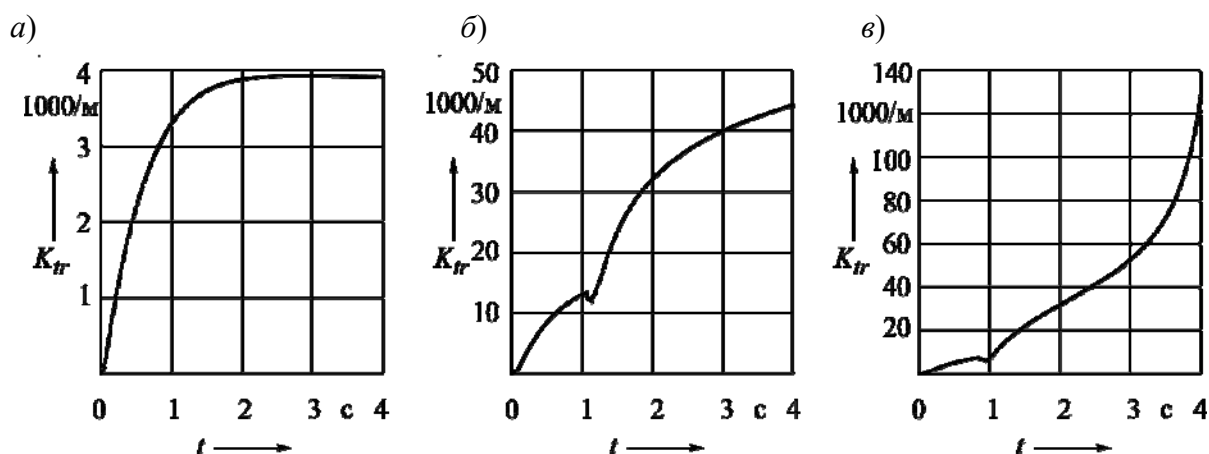


Рис. 4. Изменение кривизны траектории поворота автомобиля  $K_{tr}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

Вследствие рывка руля возникает крен кузова автомобиля, что приводит к перераспределению значений нормальных реакций между внутренними и внешними по отношению к центру поворота колес  $R_{z1в}$ ,  $R_{z1н}$ ,  $R_{z2в}$ ,  $R_{z2н}$ . На рис. 5, а–в приведены графики изменения угла крена  $\lambda_{кр}$  и скорости крена кузова  $\omega_{кр}$ , а на рис. 6, а–в – нормальных реакций на колеса. Значения нормальных реакций внутренних колес  $R_{z1в}$  и  $R_{z2в}$  существенно снижаются, и возможны условия, при которых может произойти их отрыв от дороги. Поэтому необходим их контроль в процессе моделирования. Значения нормальных реакций колес и бокового ускорения центра масс – основные источники информации, используемой в

автоматической системе стабилизации устойчивости движения автомобиля на виражах. На основе контроля за их изменением осуществляется управление ограничением скорости движения автомобиля.

Стандартом [4] предписано получение по результатам испытаний «рывок руля» характеристик траекторной управляемости  $K_{tr} = f(\alpha_p)$ , заброса угловой скорости автомобиля  $\Delta\omega_z = f(a_y)$  над установившимся значением и времени 90-процентной реакции автомобиля  $\Delta t_{90\%} = f(a_y)$ . Для определения этих характеристик и ряда других физических величин, существенных при оценке устойчивости и управляемости автомобиля, фиксировались значения следующих параметров при всех варьи-

руемых углах рывка руля  $\alpha_{рк}$ : боковое ускорение  $a_y$ ; конечная скорость вращения автомобиля  $\omega_{зк}$ ; момент времени  $t_\omega$  при  $0,9\omega_{зк}$ ; момент времени  $t_\alpha$  при  $0,5\alpha_{рк}$ ; конечные зна-

чения кривизны траектории  $K_{tr}$ , углов увода колес  $\delta_{уб1}$ ,  $\delta_{уб2}$  и бокового их скольжения  $\lambda_{s1}$ ,  $\lambda_{s2}$ , а также угла крена кузова  $\lambda_{кр}$ .

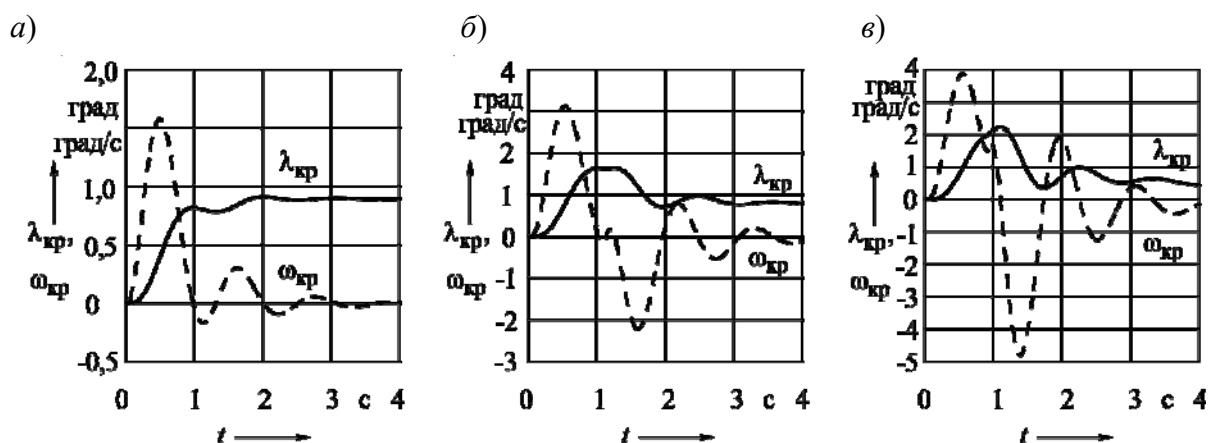


Рис. 5. Изменение угла крена кузова автомобиля  $\lambda_{кр}$  и скорости крена  $\omega_{кр}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

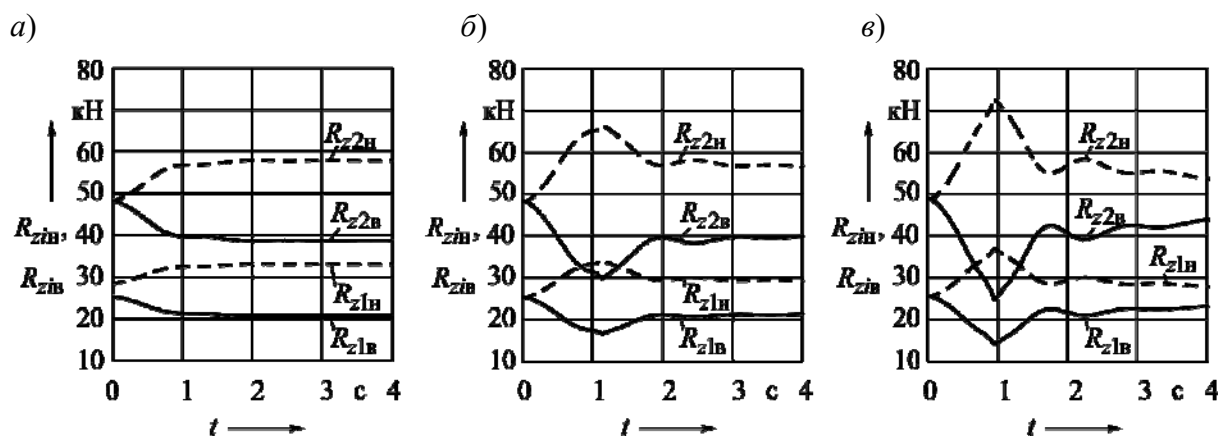


Рис. 6. Изменение нормальных реакций дороги на колеса  $R_{z1б}$ ,  $R_{z1н}$ ,  $R_{z2б}$ ,  $R_{z2н}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

Координаты характеристики  $\Delta t_{90\%} = f(a_y)$  вычислялись по формуле [2, 3]

$$\Delta t_{90\%} = t_\omega - t_\alpha. \quad (4)$$

Полученные значения искомых параметров приведены в табл. 1. Значения  $K_{tr}$  умножены на 1000.

Представим результаты выполненных исследований в виде графиков.

На рис. 7, а приведена характеристика траекторной управляемости  $K_{tr} = f(\alpha_p)$ , а на рис. 7, б – характеристика времени 90-процентной реакции

$\Delta t_{90\%} = f(a_y)$  моделируемого автомобиля МАЗ-5337. Получение этих характеристик предусмотрено стандартом [4].

Табл. 1. Результаты моделирования маневра «рывок руля»

Параметры	Значение параметров									
	10	20	30	40	50	60	70	75	80	
$\alpha_{pk}$ , град	10	20	30	40	50	60	70	75	80	
$a_y$ , м/с <sup>2</sup>	0,362	0,724	1,086	1,430	1,856	2,217	2,637	2,903	3,205	
$\omega_{zk}$ , рад/с	0,0217	0,0435	0,0653	0,0882	0,1140	0,1433	0,1909	0,228	0,350	
$t_{\omega}$ , с	1,177	1,202	1,213	1,276	1,449	1,736	2,751	2,912	2,619	
$t_{\alpha}$ , с	0,012	0,023	0,036	0,045	0,056	0,068	0,078	0,084	0,090	
$\Delta t_{90\%}$ , с	1,165	1,179	1,181	1,231	1,393	1,668	2,673	2,729	2,829	
$K_{tr}$ , 1/м	1,304	2,607	3,920	6,250	11,580	28,080	50,0	100,0	1093,0	
$\delta_{ув1}$ , град	1,423	2,854	4,283	5,597	6,682	8,218	11,020	15,45	52,150	
$\delta_{ув2}$ , град	1,354	2,716	4,078	5,597	7,741	11,650	21,630	45,0	345,0	
$\lambda_{s1}$ , град	0	0	0	0,210	0,685	1,518	3,377	10,0	37,0	
$\lambda_{s2}$ , град	0	0	0	0,469	2,010	5,205	14,030	36,0	325,0	
$\lambda_{кр}$ , град	0,304	0,608	0,911	1,213	1,372	1,639	2,026	2,23	2,450	

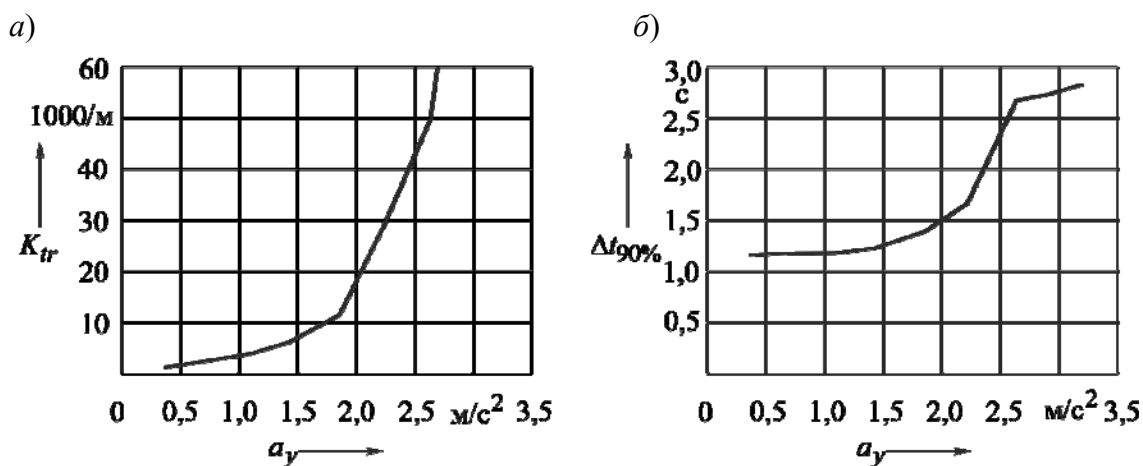


Рис. 7. Характеристики траекторной управляемости (а) и времени 90-процентной реакции автомобиля (б)

Из графика на рис. 7, а видно, что с увеличением бокового ускорения  $a_y$  кривизна траектории движения автомобиля  $K_{tr}$  быстро возрастает, а при  $a_y > 2,5$  автомобиль раскручивается на опорной поверхности, т. е. происходит

потеря устойчивости и управляемости движения.

Время  $\Delta t_{90\%}$  в интервале боковых ускорений 2...4 м/с<sup>2</sup> для автомобилей категории  $N_3$ , к которой принадлежит МАЗ-5337, не должно превы-

шать 2 с. Предельное допустимое его значение 3 с [4]. Из рис. 7, б видно, что в целом эти требования у данного автомобиля выполняются.

Непосредственное влияние на кривизну траектории  $K_{tr}$  и характеристику  $\Delta t_{90\%}$  оказывает величина угла поворота руля  $\alpha_{рк}$ . На рис. 8, а, б отображены их зависимости от  $\alpha_{рк}$ . С уве-

личением  $\alpha_{рк}$  кривизна траектории прогрессивно возрастает, и при  $\alpha_{рк} > (70...75)$  град автомобиль теряет устойчивость управления и начинает раскручиваться на опорной поверхности (см. рис. 8, а и 4, в). Зависимость же  $\Delta t_{90\%}$  от  $\alpha_{рк}$  плавная и некритичная (см. рис. 8, б).

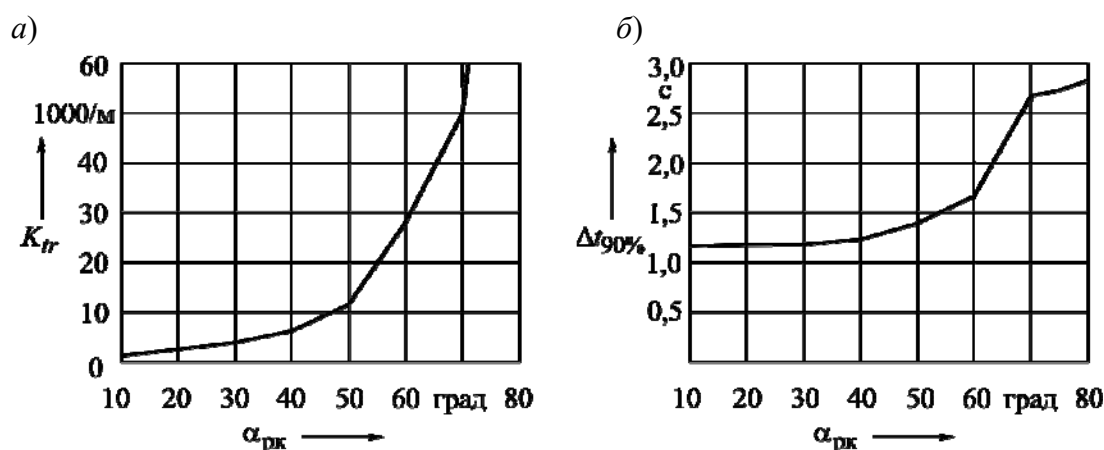


Рис. 8. Зависимости кривизны траектории (а) и времени 90-процентной реакции автомобиля (б) от угла заброса руля

Величина заброса угловой скорости вращения автомобиля  $\Delta\omega_z = f(a_y)$  над установившимся значением  $\omega_k$  не определялась, т. к. в использованной динамической модели не учитывались упругие свойства рулевого привода управляемых колес. Поэтому получаемые графики переходного процесса угловой скорости  $\omega_z = f(t)$  носили аperiодический характер.

Как отмечалось выше, причиной потери устойчивости движения при больших значениях угла заброса руля является значительное увеличение углов увода колес  $\delta_{ув1}$  и  $\delta_{ув2}$  и их бокового скольжения  $\lambda_{с1}$  и  $\lambda_{с2}$ . На рис. 9, а представлены графики зависимости уг-

лов увода колес, а на рис. 9, б – бокового скольжения от угла заброса руля.

При увеличении угла заброса  $\alpha_{рк} > 70$  град углы увода и скольжение колес катастрофически возрастают и происходит потеря устойчивости движения на повороте.

Рассмотренная методика исследования процесса выполнения маневра «рывок руля» позволяет выявить параметры, оказывающие существенное влияние на управляемость и устойчивость движения автомобиля, и подобрать наилучшее сочетание их проектных значений.

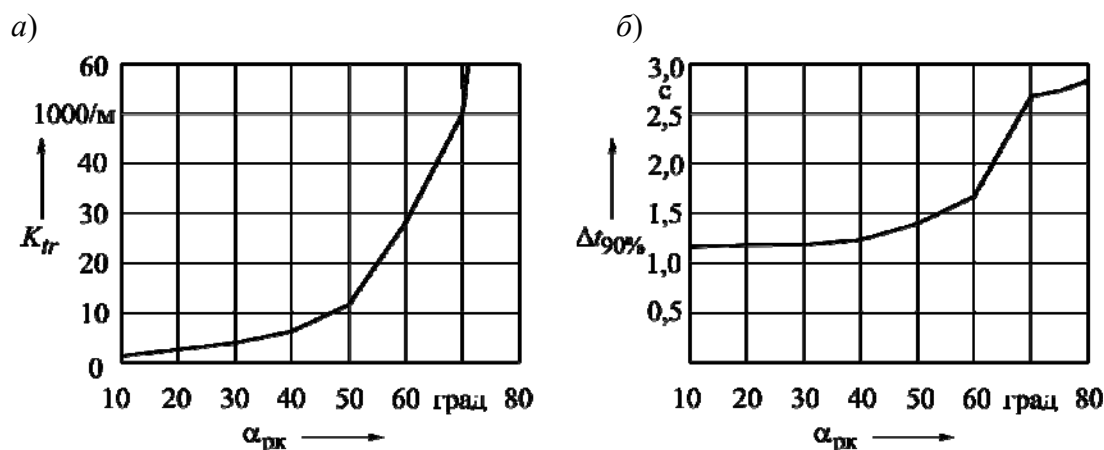


Рис. 9. Зависимости углов увода колес (а) и бокового скольжения (б) от угла заброса руля

### Заключение

1. Разработана методика моделирования и исследования процесса движения автомобиля при выполнении маневра «рывок руля», предназначенная для определения параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения при заданных параметрах рулевого управления.

2. Приведены результаты моделирования движения грузового автомобиля

категории  $N_3$  при выполнении маневра «рывок руля», рассмотрено влияние параметров управления на характеристики движения при выполнении маневра.

3. Предлагаемая методика предназначена для использования на начальной стадии проектирования автомобиля при определении параметров, обеспечивающих выполнение технических требований на показатели управляемости и устойчивости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, Г. А. Теория движения колёсных машин: учебник для вузов / Г. А. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Ларин, В. В. Теория движения полноприводных колёсных машин : учебник для вузов / В. В. Ларин. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
3. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. ГОСТ 31507–2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 42 с.
5. Тарасик, В. П. Моделирование режима испытаний «переставка» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 76–86.

Статья сдана в редакцию 11 апреля 2022 года

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-291-85-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-291-85-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.



DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_41

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль*

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦИКЛОВОГО КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ЛИФТА

*A. S. Koval*

## ON DETERMINING CYCLE EFFICIENCY OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR OF THE FREQUENCY-CONTROLLED ELEVATOR DRIVE

### Аннотация

На основе использования выражений рывка (синусоидальный закон изменения рывка), ускорения и скорости при пуске и торможении для оптимальной  $S$ -тахограммы изменения скорости лифта приведен пример расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе, энергии, преобразуемой в механическую работу и потребляемой из сети электродвигателем за цикл работы, а также циклового КПД двигателя.

### Ключевые слова:

асинхронный двигатель с короткозамкнутым (к. з.) ротором, электропривод лифта, управляемые электромагнитные переменные потери, оптимальная  $S$ -тахограмма изменения скорости лифта.

### Для цитирования:

Коваль, А. С. К вопросу определения циклового КПД асинхронного двигателя частотно-регулируемого привода лифта / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 41–48.

### Abstract

The paper presents the calculation of controlled electromagnetic losses in the electric motor, as well as the energy converted into mechanical work and consumed by the motor from the mains during its cycle of operation, and the cycle efficiency, based on using the expressions of jerk (the sinusoidal law of change in jerk), acceleration and speed during elevator starting and braking for the optimal  $S$ -tachogram of speed change.

### Keywords:

asynchronous motor with a squirrel-cage (short circuit) rotor, elevator electric drive, controlled electromagnetic variable losses, optimal  $S$ -tachogram of elevator speed change.

### For citation:

Koval, A. S. On determining cycle efficiency of an asynchronous motor of the frequency-controlled elevator drive / A. S. Koval // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 41–48.

В настоящее время массово используется редукторный частотно-регулируемый асинхронный электропривод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым (к. з.) ротором. Актив-

но внедряются в практику лифты с безредукторной лебедкой на основе высокомоментных тихоходных лифтовых двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе (СДПМ).

Возможно использование асинхронных тихоходных высокомоментных лифтовых двигателей [1]. В связи с этим актуальны исследование энергетических характеристик лифтовых редукторных и безредукторных лебедок и разработка аналитических способов оценки их эффективности. Общепринята характеристика энергетических процессов с помощью КПД [2]. Этот показатель характеризует в первую очередь процесс преобразования, не меняющийся во времени. В цикле работы привода лифта присутствуют разные режимы работы (двигательный, генераторный) при различ-

ных временных интервалах. Для циклических процессов уместно говорить о циклическом КПД [2] в виде

$$N_u = \frac{A_1}{A_2}, \quad (1)$$

где  $A_1$  – электроэнергия, преобразуемая за цикл в механическую работу;  $A_2$  – электроэнергия, потребляемая электродвигателем за цикл.

Потребляемая электродвигателем за цикл энергия определяется [2] по формуле

$$A_2 = \int_0^{t_u} |M(t) \cdot \omega(t)| dt + \int_0^{t_{nm}} \Delta P_1(t) dt + \int_0^{t_c} \Delta P_{ycm}(t) dt, \quad (2)$$

где  $\Delta P_1(t)$  – управляемые электромагнитные потери в двигателе в пускотормозных режимах работы;  $\Delta P_{ycm}(t)$  – управляемые электромагнитные потери в двигателе в установившемся режиме работы;  $t_u$  – время работы за цикл;  $t_{nm}$  – время пускотормозных режимов за цикл;  $t_c$  – время работы в установившемся режиме за цикл;  $\omega(t)$  – частота вращения вала двигателя;  $M(t)$  – электромагнитный момент двигателя.

Для асинхронного двигателя управляемые электромагнитные потери в двигателе  $\Delta P_1(t)$  складываются из потерь в сердечнике двигателя (потери на

гистерезис и потери от вихревых токов) и омических потерь в обмотках статора и ротора [3]. При использовании в лифтах частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением и формировании оптимальной S-образной тахограммы (синусоидальный закон изменения рывка) разгона и торможения кабины лифта [4] управляемые электромагнитные потери в пускотормозных режимах с учетом потерь в сердечнике от вихревых токов, зависящих от частоты в квадратичной зависимости, могут быть вычислены для двигательных и генераторных режимов работы [5, 6]:

$$P_{pot.торм.дв.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 \left[ (A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

$$P_{pot.торм.ген.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 \left[ (A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

$$P_{pot.мус.ген.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right];$$

$$P_{pot.нuc.дв.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $k_1 = \frac{3}{2} \left( \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right)$ ;  $k_2 = 3 \frac{R_s}{\eta L_{12}^2}$ ;  
 $k_3 = \frac{3}{2 \eta^2} \left( \frac{R_r}{L_r^2} + \frac{R_s}{L_{12}^2} \right)$ ;  $k_4 = \frac{2}{3 p^2} \left( \frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right)$ ;  
 $\eta = \frac{R_r}{L_r}$ ;  $P_{pot.торм.дв.}$  – управляемые элект-

ромагнитные потери при торможении в двигательном режиме работы;  $P_{pot.торм.ген.}$  – управляемые электромагнитные потери при торможении в генераторном режиме работы;  $P_{pot.нuc.дв.}$  – управляемые электромагнитные потери при пуске в двигательном режиме работы;  $P_{pot.нuc.ген.}$  – управляемые электромагнитные потери при пуске в генераторном режиме работы;  $R_s$  – сопротивление статора;  $R_r$  – сопротивление ротора;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность;  $L_r$  – индуктивность ротора;  $\Psi_r$  – потокосцепление ротора;  $R_f$  – потери в железе;  $i_{sd}, i_{sq}$  – составляющие тока статора по осям  $d$  и  $q$ ;  $p$  – число пар полюсов;  $\omega$  – частота вращения двигателя;  $J$  – приведенный момент инерции к валу двигателя;  $M_s$  – статический момент нагрузки.

Коэффициенты  $A_0, A_1^*$ , присутствующие в выражении (3), определяются следующим образом:

$$A_0 = \frac{A_0^*}{R_{шк}}; \quad A_0^* = \frac{r_m}{\Omega}; \quad A_1^* = \frac{V}{R_{шк}},$$

где  $R_{шк}, r_m, V$  – радиус шкива лебедки, рывок и скорость перемещения кабины лифта соответственно;  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $T$  – время пуска и торможения кабины лифта.

Управляемые электромагнитные потери в установившемся режиме работы (перемещение кабины лифта с постоянной скоростью) при постоянном моменте нагрузки определяются из об-

щего выражения управляемых электромагнитных потерь для асинхронного двигателя с к. з. ротором [6]:

$$P_{pot} = k_1 \Psi_r^2 + k_2 \Psi_r \left( \frac{d\Psi_r}{dt} \right) + k_3 \left( \frac{d\Psi_r}{dt} \right)^2 + k_4 \frac{M_d^2}{\Psi_r^2}. \quad (4)$$

В установившемся режиме работы для привода с векторным управлением при постоянстве потокосцепления ротора момент двигателя  $M_d = M_s$  и  $\frac{d\Psi_r}{dt} = 0$ .

Соответственно, выражение (4) имеет вид:

$$\Delta P_{ycm} = k_1 \Psi_r^2 + k_4 \frac{M_s^2}{\Psi_r^2},$$

где  $k_1 = \frac{3}{2} \left( \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right)$ ;

$$k_4 = \frac{2}{3 p^2} \left( \frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right).$$

Энергия, преобразуемая в механическую работу:

$$A_1 = \int_0^{t_u} |M(t) \cdot \omega(t)| dt - \int_0^{t_u} \Delta P_{мex}(t) dt. \quad (5)$$

Механические потери в двигателе  $\Delta P_{мex}(t)$  могут быть определены [2] по формуле

$$\Delta P_{мex}(t) = \Delta P_{мex.ном} \cdot \alpha^2(t), \quad (6)$$

где  $\Delta P_{мex.ном}$  – номинальные механические потери электродвигателя;

$$\alpha(t) = \frac{\omega_1(t)}{\omega_{ном}}; \omega_1(t) - \text{текущее значение}$$

частоты вращения двигателя;  $\omega_{ном}$  – номинальное значение частоты вращения двигателя.

Механическая работа  $M(t) \cdot \omega(t)$  двигателя складывается из механической работы при пуске, торможении и движении кабины лифта с номинальной скоростью.

При пуске привода лифта с оптимальной  $S$ -тахограммой разгона и торможения (синусоидальный закон изменения рывка при пуске и торможении) известны [5] выражения скорости и ускорения.

При пуске линейная скорость кабины лифта меняется по закону  $V(t) = A_0^* \cdot t - A_1^* \cos(\Omega t)$ , ускорение –  $a(t) = A_0^* (1 - \cos(\Omega t))$ .

При торможении

$$V(t) = V_0 - A_0^* t + A_1^* \sin(\Omega t);$$

$$a(t) = \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1),$$

где  $V_0$  – линейная скорость перемещения кабины лифта.

Для безредукторного электропривода лифта с диаметром канатоведущего шкива  $D$  закон изменения частоты вращения вала двигателя определяется через радиус канатоведущего шкива

$$R_{шк} = \frac{D}{2} \text{ как } \omega(t) = \frac{V(t)}{R_{шк}}.$$

При известном законе изменения скорости и ускорения при пуске и, например, генераторном режиме работы привода лифта механическая работа двигателя может быть определена следующим образом:

$$P_{мех.пус}(t) = \omega_n(t) \cdot M(t) =$$

$$= \omega_n(t) \cdot (M_s - J \cdot a_n(t)) =$$

$$= \omega_n(t) \cdot (M_s - J \cdot A_0^* (1 - \cos(\Omega t))), \quad (7)$$

где  $\omega_n(t)$  – закон изменения скорости при пуске;  $a_n(t)$  – закон изменения ускорения при пуске.

При торможении и генераторном режиме работы привода лифта

$$P_{мех.тор}(t) = \omega_{тор}(t) \cdot M =$$

$$= \omega_{тор}(t) \cdot (M_s - J \cdot a_{тор}(t)) =$$

$$= \omega_{тор}(t) \cdot (M_s - J \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1)), \quad (8)$$

где  $\omega_{тор}(t)$  – закон изменения скорости при торможении;  $a_{тор}(t)$  – закон изменения ускорения при торможении.

При работе привода в двигательном режиме механическая работа двигателя при пуске лифта может быть вычислена следующим образом:

$$P_{мех.пус}(t) = \omega_n(t) \cdot M(t) =$$

$$= \omega_n(t) \cdot (M_s + J \cdot a_n(t)) =$$

$$= \omega_n(t) \cdot (M_s + J \cdot A_0^* (1 - \cos(\Omega t))). \quad (9)$$

При торможении лифта и двигательном режиме работы привода лифта

$$\begin{aligned}
 P_{\text{мех.тор}}(t) &= \omega_{\text{тор}}(t) \cdot M = \\
 &= \omega_{\text{тор}}(t) \cdot (M_s + J \cdot a_{\text{тор}}(t)) = \\
 &= \omega_{\text{тор}}(t) \cdot (M_s + J \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1)). \quad (10)
 \end{aligned}$$

В установившемся режиме работы при перемещении кабины лифта с номинальной скоростью и постоянным моментом нагрузки  $M_s$  механическая работа двигателя определяется как

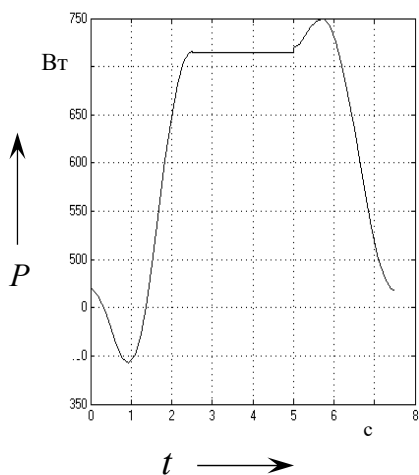
$$P_{\text{мех.уст}}(t) = \omega_{\text{ном}} \cdot M_s. \quad (11)$$

В качестве примера с помощью приведенных выражений (1)–(3), (7)–(10) для высокомоментного лифтового асинхронного двигателя (табл. 1, пассажирский лифт со скоростью перемещения 1 м/с) при перемещении, например, пустой кабины лифта вверх (время рабочего цикла 7,51 с в генераторном режиме работы привода) были рассчитаны управляемые электромагнитные потери в двигателе, изменение КПД двигателя в течение времени цикла, энергия, преобразуемая электродвигателем за цикл в механическую работу, и энергия, потребляемая из сети (рис. 1–4).

Табл. 1. Параметры двигателя для моделирования

$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$R_1$ , Ом	$M_{\text{ном}}$ , Н·м	$I_{\text{ном}}$ , А	$P_{\text{ном}}$ , Вт	$L_{12}$ , Гн	$L_1$ , Гн	$R_2$ , Ом	$D$ , м	$\omega_{\text{ном}}$ , с <sup>-1</sup>	$r_m$ , м/с <sup>2</sup>
4,5	2,47	336	11,87	4071	0,639	0,694	1,87	0,32	6,09	1

а)



б)

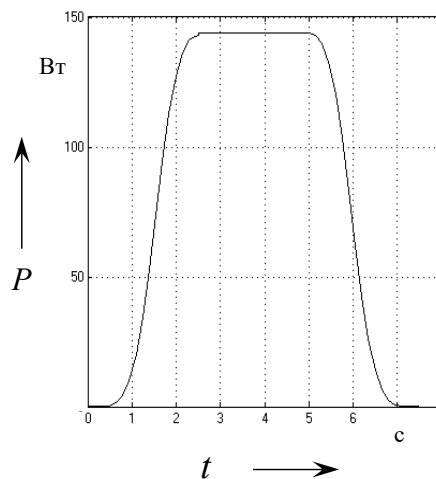
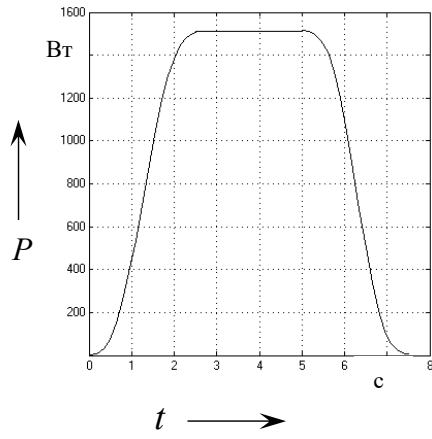


Рис. 1. Управляемые электромагнитные (а) и механические (б) потери в двигателе за цикл работы

a)



б)

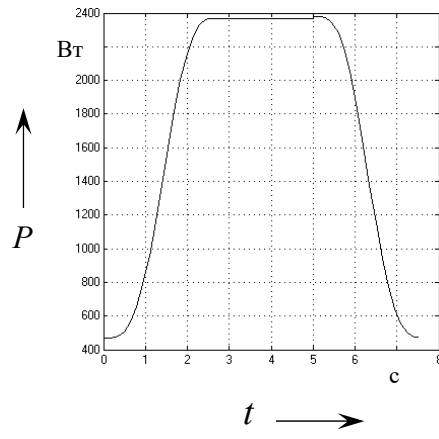
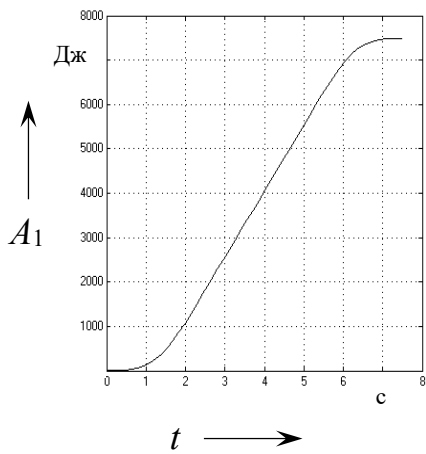


Рис. 2. Мощность за цикл: преобразуемая в механическую работу (a) и потребляемая (б)

a)



б)

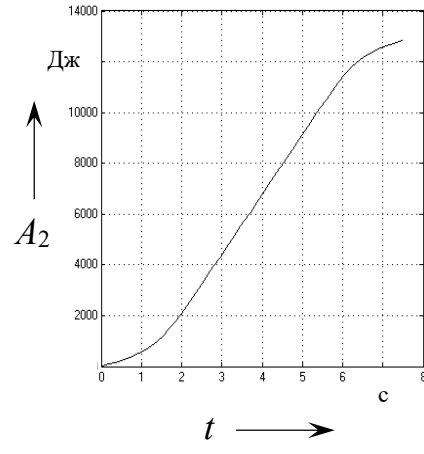


Рис. 3. Энергия за цикл: преобразуемая в механическую работу (a) и потребляемая (б)

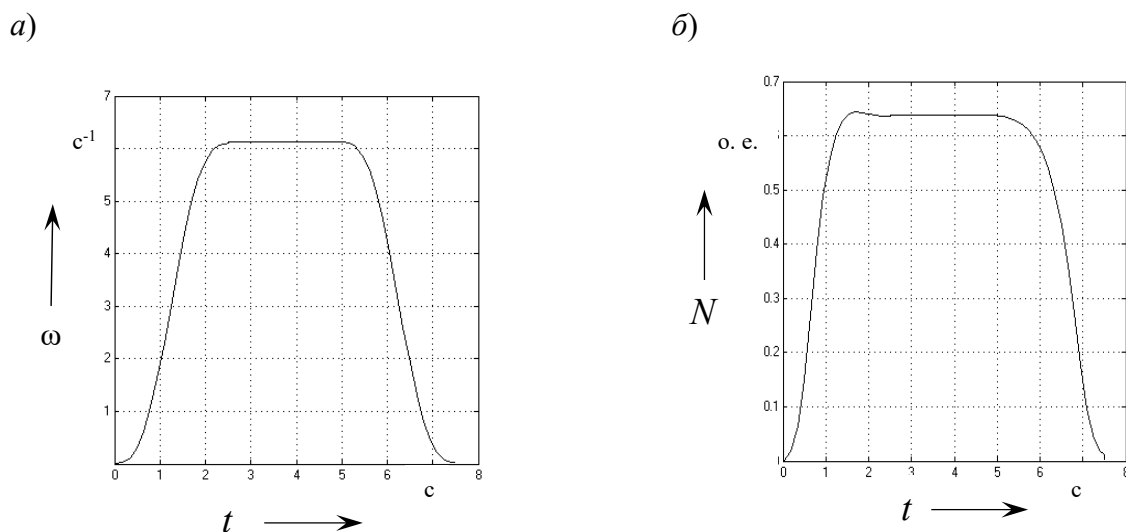


Рис. 4. Тахограмма частоты вращения двигателя привода лифта (а) и изменение КПД двигателя (б) за цикл работы

На рис. 3 приведены расчетные графики энергии потребляемой  $A_2$  и энергии  $A_1$ , преобразуемой в механическую работу за рассматриваемый цикл работы ( $A_1 = 7550$  Дж;  $A_2 = 12750$  Дж).

Значение циклового КПД двигателя за рассматриваемый цикл работы:

$$N_{\text{ц}} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{7550}{12750} = 0,59.$$

КПД в установившемся режиме работы этого двигателя – 0,68 [1].

### Выводы

Для лифтов характерен циклический вероятностный режим работы. Одна из энергетических характеристик электрического двигателя и электропривода при циклическом режиме работы – циклический КПД. Для обеспечения комфортных условий поездки в кабине привод пассажирских лифтов формирует S-тахограмму изменения скорости при пуске и торможении,

например, при синусоидальном изменении рывка (оптимальная тахограмма). Для этого случая с помощью методики расчета основных управляемых электромагнитных потерь в пускотормозных режимах в асинхронном двигателе электропривода лифта с векторным управлением [5] получены выражения для расчета циклового КПД асинхронного двигателя в асинхронном частотно-регулируемом безредукторном приводе лифта. Приведен пример расчета циклового КПД высокомоментного лифтового асинхронного двигателя для цикла длительностью 7,51 с, в котором двигатель работает в режиме рекуперативного торможения. Цикловой КПД асинхронного двигателя для рассматриваемого цикла работы – 0,59 при его значении в установившемся режиме 0,68, что соответствует оценке возможных значений цикловых КПД асинхронных высокомоментных двигателей для безредукторных лифтовых лебедок [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кругликов, О. В.** Асинхронные частотно-регулируемые электродвигатели для привода безредукторных лифтовых лебедок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / О. В. Кругликов; НИУ МЭИ. – Москва, 2015. – 22 с.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. **Борисевич, А. В.** Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями / А. В. Борисевич. – Москва: ИНФРА-М, 2017. – 102 с.
4. **Чупрасов, В. В.** Реализация близкого к оптимальному закона движения скоростного пассажирского лифта с электроприводом переменного тока / В. В. Чупрасов, А. В. Шинянский // Тр. Моск. энерг. ин-та. – 1980. – Вып. 477. – С. 89–96.
5. **Коваль, А. С.** К вопросу расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе в пуско-тормозных режимах работы регулируемого асинхронного электропривода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1. – С. 49–55.
6. **Stumper, J.-F.** Loss Minimization of Induction Machines in Dynamic Operation / J.-F. Stumper, A. Dotlinger, R. Kennel // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – Vol. 28 (3). – P. 726–735.

*Статья сдана в редакцию 2 февраля 2022 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

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



---

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

---

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_49

УДК 534.86

*В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко*

**АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХПЛАСТИНЧАТОГО КРУГЛОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

---

*V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko*

**ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A DUAL-PLATE CIRCULAR PIEZOELECTRIC TRANSDUCER**

---

**Аннотация**

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения двухпластинчатого круглого акустического пьезоэлектрического преобразователя, содержащего круговую и кольцевую пьезопластины. Показано, что такой преобразователь позволяет проводить аподизацию генерируемого акустического пучка за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых круглой и кольцевой пьезопластинами, что дает возможность расширить информативность неразрушающего акустического контроля материалов и изделий.

**Ключевые слова:**

акустическое поле, фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, ближняя зона, акустическая волна, акустическое давление, аподизация, полуширина акустического пучка, центральный лепесток диаграммы направленности.

**Для цитирования:**

Борисов, В. И. Акустическое поле излучения двухпластинчатого круглого пьезоэлектрического преобразователя / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 49–56.

**Abstract**

The method of numerical analysis is used to calculate the acoustic radiation field of a dual-plate circular acoustic piezoelectric transducer, containing circular and annular piezoplates. It is shown that this transducer makes it possible to perform apodization of a generated acoustic beam due to changing initial phases and amplitudes of acoustic waves emitted by the circular and annular piezoelectric plates, which expands the information content of non-destructive acoustic testing of materials and products.

**Keywords:**

acoustic field, phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, near zone, acoustic wave, acoustic pressure, apodization, acoustic beam half-width, central lobe of radiation pattern.

**For citation:**

Borisov, V. I. Acoustic radiation field of a dual-plate circular piezoelectric transducer / V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 49–56.

---

Фазированные акустические решетки (ФАР) состоят из ряда элементарных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), каждый из которых может генерировать акустические волны с изменяемыми амплитудами и фазами. Это позволяет проводить динамическое управление характеристиками акустического поля излучения-приема ФАР, что расширяет информационные и метрологические возможности неразрушающего акустического контроля мате-

риалов и технических изделий [1–3].

Приведены результаты численного расчета акустического поля излучения пьезоакустического преобразователя, работающего в непрерывном режиме возбуждения акустических волн, состоящего из двух пьезопластин, одна из которых представляет собой круг, а вторая – кольцо, окружающее круг.

Расчетная схема пьезопреобразователя приведена на рис. 1.

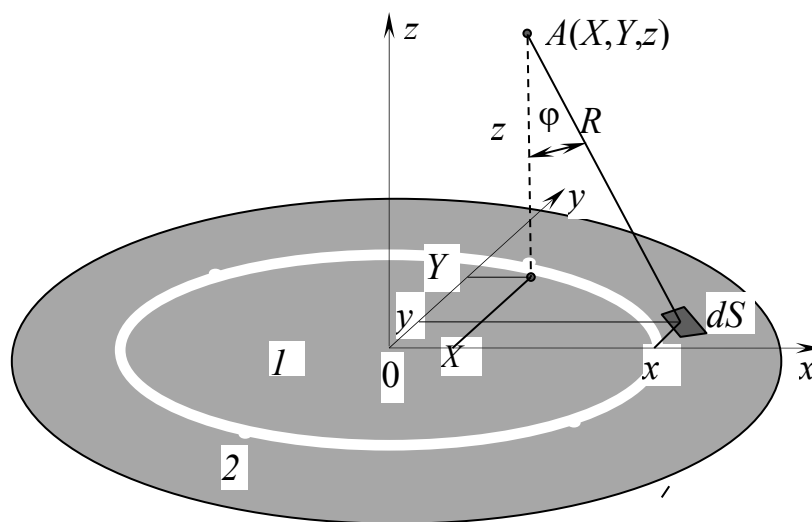


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля двухпластинчатого кольцевого пьезопреобразователя

Расчеты акустического поля излучения проводились для нагруженных на стальное изделие пьезопластин, центральная круглая из которых имеет диаметр 10 мм, а кольцевая – ширину 5 мм и отстоит от центральной пьезопластины на 0,5 мм. Расчеты проводились для частоты возбуждения 5 МГц, что соответствует длине продольных волн в стали 1,2 мм. В целом излучающая область двухпластинчатого ПЭП представляет собой круг диаметром 21 мм.

Результирующее давление акустических волн в выбранной точке пространства  $A(X, Y, z)$  определялось путем

суммирования давления от всех элементарных площадок  $dS$ , расположенных на круглой 1 и кольцевой 2 пьезопластинах, по методике, приведенной в [4].

На рис. 2 приведено распределение давления  $P$  акустических волн, генерируемых круглым двухпластинчатым ПЭП, в направлении акустической оси  $z$  для трех случаев возбуждения акустических волн пьезопластинами. Сплошной линией на рис. 2 показана зависимость, когда акустические волны, генерируемые элементарными излучателями на обеих пьезопластинах, имеют одинаковую амплитуду и начальную фазу. Пунктирной линией

обозначена зависимость давления акустических волн при возбуждении толь-

ко круглой пьезопластины, а штриховой – только кольцевой.

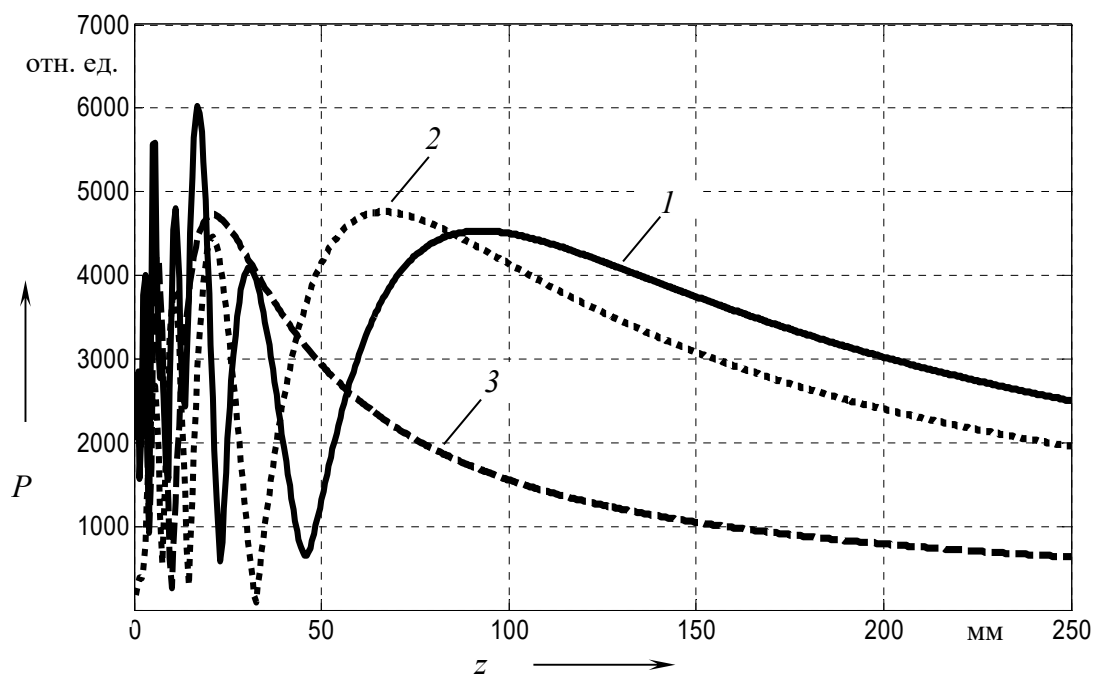


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль акустической оси, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, при разных режимах возбуждения пьезопластин: 1 – при одновременном возбуждении круглой и кольцевой пьезопластин; 2 – при возбуждении круглой пьезопластины; 3 – при возбуждении кольцевой пьезопластины

Видно, что при каждом режиме возбуждения пьезопластин наблюдаются ближняя, средняя и дальняя зоны ПЭП с характерным режимом изменения давления акустических волн. При одновременном возбуждении круглой и кольцевой пьезопластин последний максимум, после которого наблюдается монотонное уменьшение давления акустических волн, находится на расстоянии 93,3 мм от ПЭП; при возбуждении только круглой пьезопластины – 67 мм, а при возбуждении только кольцевой – 20,5 мм.

На рис. 3 приведена трехмерная картина акустического поля излучения в плоскости, перпендикулярной акустической оси ПЭП, в области максимума, на расстоянии 93,3 мм от одновременно возбуждаемых пьезопластин. Расчет

акустического поля проводился для случая равенства амплитуд и начальных фаз акустических волн, генерируемых кольцевой и круглой пьезопластинами.

Из рис. 3 видно, что наблюдается осесимметричный акустический пучок, направленный вдоль акустической оси ПЭП. Кроме основного максимума, в распределении акустического поля наблюдается дополнительный – величиной 40 % от основного, расположенный рядом с основным. Диаметр основного пучка по половинному от максимального значения давления (полуширина) составляет 8,3 мм. Такой характер акустического поля обусловлен различием фаз акустических волн, приходящих от разных элементарных пьезоплощадок в выбранную точку на оси ПЭП.

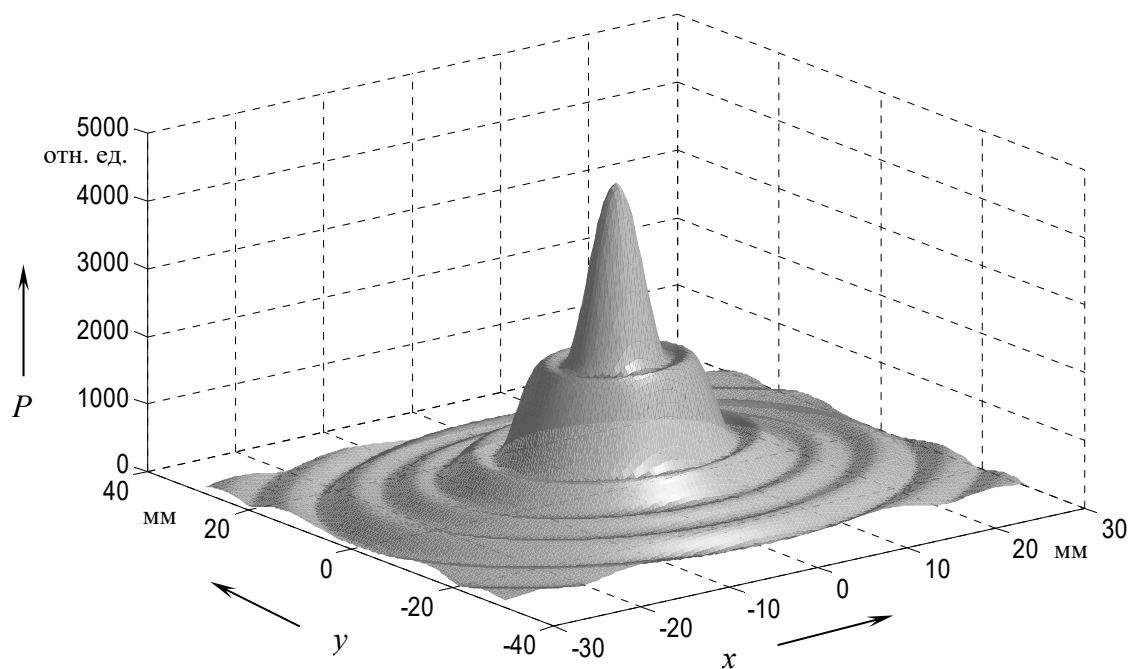


Рис. 3. Вид акустического поля излучения кольцевого двухпластинчатого ПЭП на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин

Двухпластинчатая конструкция ПЭП позволяет уменьшить разброс фаз акустических волн, приходящих в выбранную точку пространства, путем изменения начальных фаз акустических волн, генерируемых на круговой пьезопластине, по отношению к начальным фазам волн, генерируемых на кольцевой пластине. Расчет показал, что акустические волны, генерируемые элементарными пьезоплощадками, расположенными в центре кольцевой пьезопластины на расстоянии 13 мм от центра круговой пьезопластины, приходят в точку на оси ПЭП, расположенную на расстоянии 93,3 мм, с запаздыванием по фазе на 1,8 рад относительно волн, генерируемых в центре круглой пьезопластины и приходящих в эту же точку.

Рассматриваемая конструкция ПЭП, кроме изменения фазовых характеристик акустических волн, генерируемых на круговой и кольцевой пьезопластинах, также позволяет изменять

амплитуду генерируемых волн, что дает возможность учесть разную площадь круговой и кольцевой пьезопластины. Так, для рассматриваемой конструкции ПЭП площадь кольцевой пьезопластины в 3,2 раза больше площади круговой пьезопластины, поэтому увеличение амплитуды акустических волн, генерируемых круглой пьезопластинкой, в 3,2 раза по отношению к амплитуде акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластинкой, позволяет выравнять вклад обеих пьезопластин в результирующее давление акустических волн.

На рис. 4 приведен вид акустического поля излучения двухпластинчатого ПЭП для случая, когда начальная фаза акустических волн, излучаемых кольцевой пьезопластинкой, опережает начальную фазу волн, излучаемых круговой пьезопластинкой, на 1,8 рад, а волны, генерируемые на обеих пьезопластинах, имеют одинаковую амплитуду.

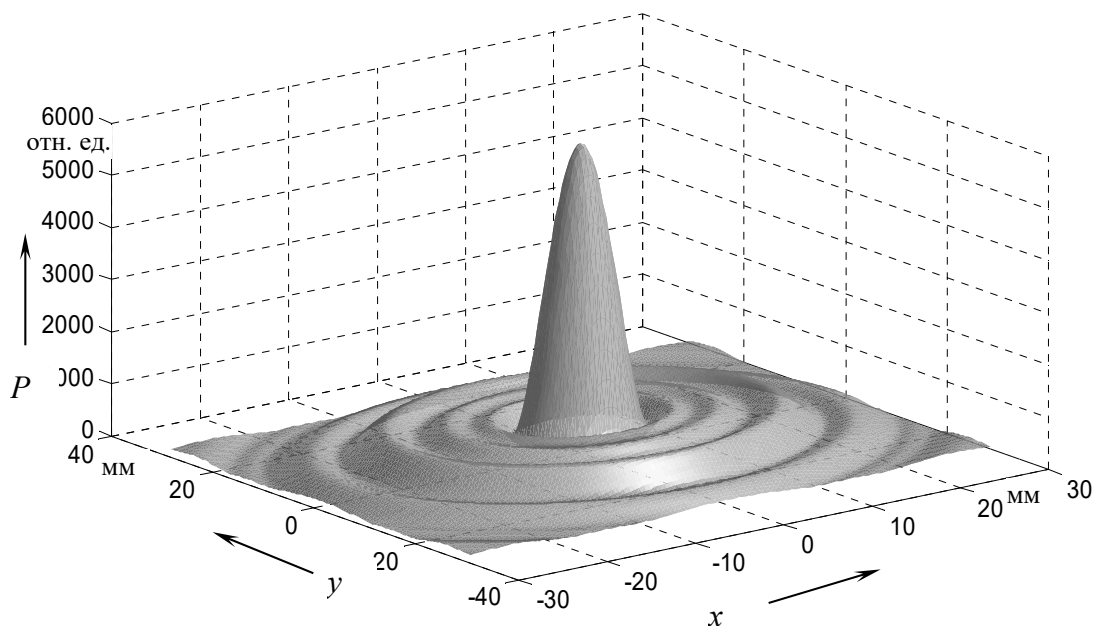


Рис. 4. Распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, вдоль оси  $z$  на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при опережающей начальной фазе волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, 1,8 рад

Из рис. 4 видно, что в этом случае вдоль акустической оси ПЭП наблюдается гладкий акустический пучок без дополнительного максимума. Это сглаживание дополнительного максимума, по аналогии с оптикой, можно считать акустической аподизацией. Полуширина аподизированного акустического пучка меньше полуширины неаподизированного и составляет 7,7 мм.

Характер изменения давления акустических волн на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин в плоскости, перпендикулярной пьезопластинам, проходящей через акустическую ось ПЭП, при увеличении вклада акустических волн, генерируемых круговой пьезопластиной, с учетом разной площади круглой и кольцевой пьезопластин, представлен на рис. 5, а на рис. 6 приведены аналогичные зависимости на расстоянии от пьезопластин 65 (см. рис. 6, а) и 175 мм (см. рис. 6, б).

На рис. 5 и 6 сплошной линией 1 изображена зависимость давления акустических волн для случая равенства начальных фаз и амплитуд волн, генерируемых круглой и кольцевой пьезопластинами, а пунктирной линией 2 – зависимость давления для случая равенства амплитуд волн, генерируемых круглой и кольцевой пьезопластинами, и опережающей начальной фазе 1,8 рад акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной. Штриховой линией 3 показана зависимость давления для случая, когда амплитуда волн, генерируемых круглой пьезопластиной, превышает амплитуду волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, в 3,2 раза, а начальная фаза волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, опережает начальную фазу акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, на 1,8 рад.

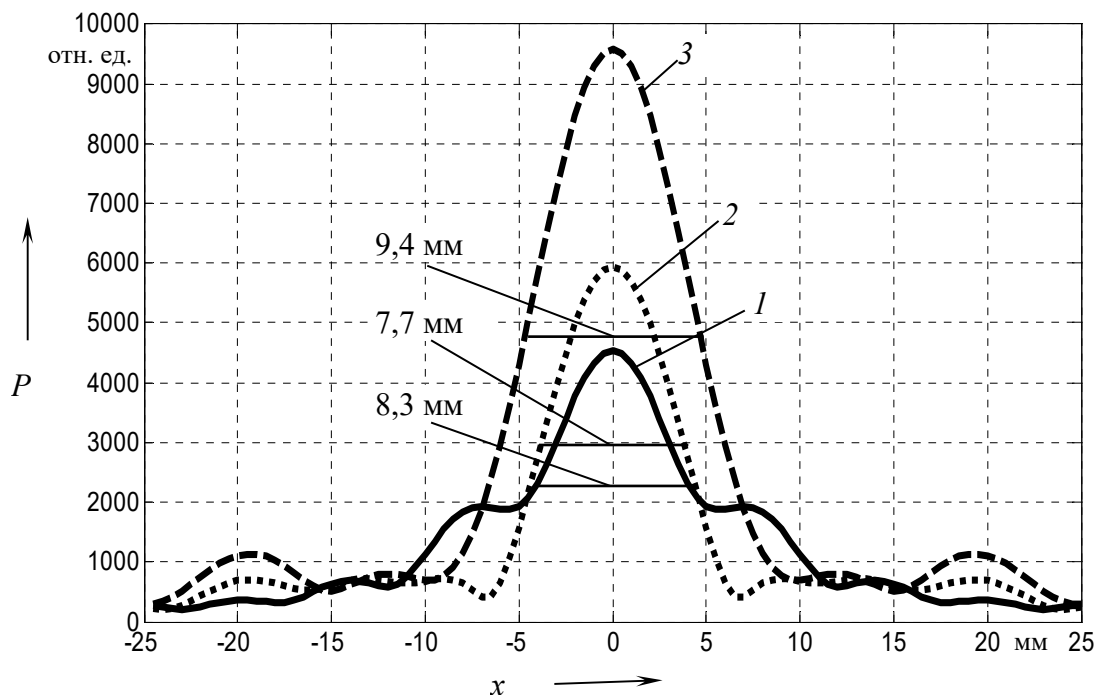


Рис. 5. Поперечное распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при разных начальных фазах и амплитудах на круговой и кольцевой пластинах

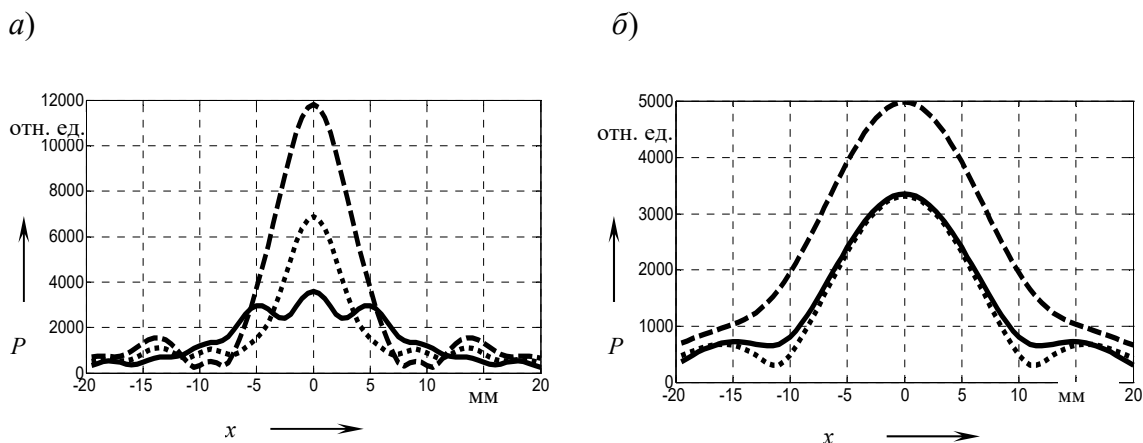


Рис. 6. Поперечное распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 65 (а) и 175 мм (б) от пьезопластин при разных начальных фазах и амплитудах на круговой и кольцевой пластинах

Из рис. 5 видно, что гладкая структура акустического пучка вблизи акустической оси ПЭП наблюдается в случае опережающего сдвига начальной фазы акустических волн, генерируемых

кольцевой пьезопластинкой, как для случая равенства амплитуд волн на обеих пластинах, так и в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластинкой. При этом

полуширина акустического пучка в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, увеличивается и составляет 9,4 мм.

Зависимости, приведенные на рис. 6, демонстрируют динамику изменения вышерассмотренных акустических пучков на разных расстояниях от плоскости, в которой располагаются пьезопластины. Видно, что при изменении этого расстояния от 65 до 175 мм аподизация акустических пучков наблюдается для случая опережающей фазы акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, как при равных амплитудах волн, генерируемых обеими пьезопластинами, так и при увеличенной амплитуде волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной. При увеличении расстояния от пьезопластин более 175 мм для акусти-

ческого пучка в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, появляются боковые максимумы, как для зависимости 1 на рис. 5, но для двух остальных пучков наблюдается аподизация.

При изменении величины начальной фазы акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, по сравнению с начальной фазой волн, генерируемых круговой пьезопластиной, наблюдается заметное изменение формы генерируемого акустического пучка. К примеру, на рис. 7 приведено поперечное распределение давления акустических волн  $P$ , генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при запаздывающей начальной фазе волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, 1,9 рад.

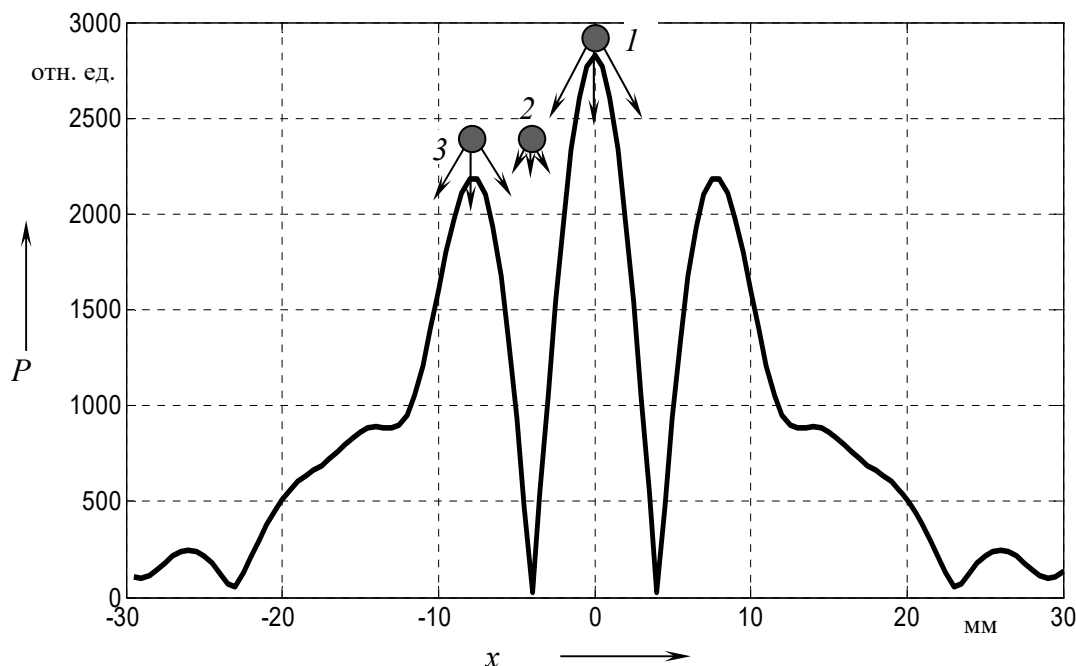


Рис. 7. Распределение давления акустических волн, генерируемых ПЭП, вдоль оси  $x$  на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при запаздывающей начальной фазе на кольцевой пьезопластине 1,9 рад и равных амплитудах волн, генерируемых круговой и кольцевой пьезопластинами

Из рис. 7 видно, что вдоль акустической оси ПЭП распространяется глад-

кий акустический пучок, окруженный кольцевым пучком со сравнимыми зна-

чениями максимального давления. При этом полуширина центрального пучка составляет 5,5 мм, а минимум между пучками практически равен нулю. Такая структура двойного акустического пучка может быть полезна при контроле изделий с одиночными локальными дефектами с размерами порядка 1...2 мм. При сканировании такого дефекта амплитуда отраженного от дефекта акустического сигнала увеличивается при сканировании областью максимума пучка и уменьшается при сканировании областью минимума, как это видно из рис. 7, где цифрами 1–3 обозначены локальные дефекты, а стрелками – амплитуды отраженных акустических пучков.

Сканирование таким пучком объекта контроля с локальными дефектами дает возможность оценить размеры таких дефектов.

Таким образом, расчеты показали, что двухпластинчатая круглая схема ПЭП позволяет проводить аподизацию генерируемого акустического пучка за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых круглой и кольцевой пьезопластинами. Описанные возможности перестройки акустического поля излучения ПЭП позволяют расширить информативность неразрушающего акустического контроля материалов и изделий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалькевич, С. А. Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. Реука, С. В. Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток / С. В. Реука. – Санкт-Петербург: СПГЭТУ ЛЭТИ, 2011. – 210 с.
3. Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2 (71). – С. 58–67.
4. Борисов, В. И. Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 4 (48). – С. 102–108.

*Статья сдана в редакцию 18 апреля 2022 года*

**Василий Иванович Борисов**, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
**Сергей Сергеевич Сергеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: sss.bru@tut.by.  
**Елена Николаевна Прокопенко**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: enprokopenko@yandex.ru.

**Vasily Ivanovich Borisov**, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.  
**Sergey Sergeevich Sergeev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: sss.bru@tut.by.  
**Elena Nikolayevna Prokopenko**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: enprokopenko@yandex.ru.



---

ФИЗИКА

---

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_57

УДК 530:372.8

*А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова, А. В. Хомченко*

**ВЫВОД ЗАКОНА ОМА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

---

*A. I. Lyapin, E. V. Pivovarova, A. V. Khomchenko*

**DERIVATION OF OHM'S LAW IN INTEGRAL FORM FOR A NONUNIFORM SECTION OF DC CIRCUIT**

**Аннотация**

Показано, что при наличии в цепи гальванического элемента следует учитывать различие в локализации полей «сторонней» и электрической сил. В источнике ЭДС «сторонняя сила» совершает работу по переносу заряда «против» силы созданного ею электрического поля. В ненагруженном источнике указанная работа, отнесенная к перенесенному заряду, определяет ЭДС. Выражения, полученные существующим методом, относятся к разным электрическим цепям. В то же время предложенный подход приводит к аналогичным формулам, описывающим два участка одной цепи. ЭДС определена как сумма напряжения между электродами источника и падения потенциала на его внутреннем сопротивлении.

**Ключевые слова:**

методика преподавания, неоднородный участок электрической цепи, гальванический элемент, закон Ома для неоднородной цепи, различие между ЭДС и разностью потенциалов.

**Для цитирования:**

Ляпин, А. И. Вывод закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи постоянного тока / А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова, А. В. Хомченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 57–66.

**Abstract**

It is shown that in the presence of a galvanic cell in the circuit, the difference in the localization of fields of «external» and electrical forces should be taken into account. In the EMF source, the «external force» performs the work of transferring the charge against the force of the electric field created by it. In an unloaded source, the specified work divided by the amount of charge transferred determines the EMF. The formulas obtained by the existing method refer to different electrical circuits. At the same time, the proposed approach leads to similar formulas describing two sections of the same chain. EMF is defined as the sum of the voltage between the source electrodes and the potential drop across its internal resistance.

**Keywords:**

teaching techniques, nonuniform section of electrical circuit, galvanic cell, Ohm's law for nonuniform circuit, EMF and potential difference.

**For citation:**

Lyapin, A. I. Derivation of Ohm's law in integral form for a nonuniform section of dc circuit / A. I. Lyapin, E. V. Pivovarova, A. V. Khomchenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 57–66.

### Введение

В ходе изложения основ теории электричества используют закон Ома в дифференциальной или интегральной формах. В то же время при текущей аттестации студентов нередко обнаруживается непонимание различия между указанными законами. Например, вопрос, касающийся закона Ома в интегральной либо дифференциальной форме, у большинства обучающихся вызывает затруднение, но, когда предлагает-

ся записать любую известную формулу закона Ома, большинство приводит выражение

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

В методических пособиях, посвященных закону Ома, можно встретить упрощенные рисунки для однородного (рис. 1, а) и неоднородного (рис. 1, б) участков электрической цепи.



Рис. 1. Однородный (а) и неоднородный (б) участки электрической цепи

Однако используемое упрощение не облегчает понимания изучаемого материала. На приведенных рисунках имеется «логический разрыв», т. к. из них непонятно, чем создана разность потенциалов и почему имеется ток, если цепь разомкнута. Если для однородного участка не важна природа разности потенциалов, то на неоднородном участке разность потенциалов может быть создана как исследуемым, так и внешним источником. В лучшем случае обучающийся мысленно достроит эти рисунки до некоторой замкнутой цепи или, вероятнее всего, будет искать ответ в глобальной сети.

Авторы большинства учебников вначале рассматривают закон Ома для участка цепи, который не содержит источник ЭДС, не называя его при этом однородным, а произведение силы тока и сопротивления называют напряжением [1, 2]. Также во всех учебниках при рассмотрении закона Ома для неоднородного участка цепи напряжение на

участке определяется суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда. В некоторых учебных пособиях для вузов [1, 2] при рассмотрении законов Ома вообще не приводятся электрические схемы. Более того, в [1] не упоминается о законе Ома в интегральной форме, хотя формулу закона получают интегрированием.

Следует отметить разночтение терминов «разность потенциалов» и «напряжение». В литературе последних лет потенциал (разность потенциалов) определяется как работа по перемещению единичного заряда в электрическом поле (часто говорится об электростатическом поле). Большинство авторов отождествляют понятия разности потенциалов и электрического напряжения [3, 4].

В [5] разность потенциалов определяется как мера изменения электрической потенциальной энергии электрона, когда он движется между двумя точка-

ми цепи, при этом изложение материала ограничивается только разностью потенциалов и электродвижущей силой. Автор уточняет, что термин «напряжение» чаще применяется к электрическим цепям с током. Отметим в связи с этим, что разность потенциалов и напряжение количественно определяются работой по перемещению единичного электрического заряда и в обоих случаях имеет место движение заряда в электрическом поле, т. е. ток.

В Оксфордском словаре [6] напряжением (voltage) называют ЭДС и разность потенциалов, выраженные в вольтах. В [7] используется образное выражение «exertion» и отмечается, что в электрических цепях потенциал и разность потенциалов часто называют термином «voltage».

Подходы в определении ЭДС также разнятся. В Физической энциклопедии [8, с. 518] в статье «Электродвижущая сила» отмечено, что ЭДС как феноменологическая характеристика источника тока была введена Омом в 1827 г. для цепей постоянного тока. Через 30 лет (в 1857 г.) Кирхгоф определил ЭДС как работу «сторонних сил» при переносе единичного электрического заряда вдоль замкнутого контура. Автор [5] отмечает неудачность термина ЭДС, поскольку эта величина не является силой. ЭДС определяется изменением потенциальной энергии заряда при его движении по цепи. В [7] также отмечается неудачность термина, но ЭДС определяется как влияние (действие), которое движет заряд от низкого потенциала к высокому (несмотря на то, что электрическое поле действует в обратном направлении). Количественно же ЭДС – это разность потенциалов между электродами идеального источника независимо от тока через него. В [8] ЭДС – это наибольшая разность потенциалов, которую может генерировать источник электрического тока. На практике это может наблюдаться на нагруженном источнике. Автор рабо-

ты [6] определяет ЭДС через энергию, сообщаемую заряду, когда он проходит через источник.

Целью работы является попытка разработать дидактический материал, лишенный указанных неточностей.

### **Классический вывод закона Ома в интегральной форме для участка цепи**

Попыткой математически определить различие между рассматриваемыми понятиями является вывод обобщенного закона Ома для неоднородного участка цепи [1, 2, 9]. Авторы работы [9] вначале рассматривают цепь с гальваническим элементом, замкнутым на внешнее сопротивление, и получают законы Ома для однородного и неоднородного участков. Затем обобщают понятие ЭДС для случая, когда она действует в любой точке цепи. Полагая, что в любой точке некоторой цепи на заряд действуют сила электростатического поля  $\vec{f}_{эл} = e \cdot \vec{E}_{эл}$  и сторонняя сила  $\vec{f}_{стор}$ , записывают формулу для ускорения заряда

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{\vec{f}_{эл} + \vec{f}_{стор}}{m} = \frac{e \cdot \vec{E}_{эл} + \vec{f}_{стор}}{m} = \\ &= \frac{e \cdot \left( \vec{E}_{эл} + \frac{\vec{f}_{стор}}{e} \right)}{m}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса частицы, участвующей в электрическом токе;  $\vec{E}_{эл}$  – напряженность электростатического поля.

Введя обозначение напряженности поля сторонней силы  $\vec{E}_{стор} = \vec{f}_{стор}/e$ , формулу (1) можно представить в виде

$$\vec{a} = \frac{e \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор})}{m}. \quad (2)$$

Затем, повторяя рассуждения, приводимые при выводе закона Ома в дифференциальной форме, получают следующую формулу этого закона:

$$\vec{j} = \sigma \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность, которая зависит и от массы частицы.

Умножением (3) на элемент  $\Delta l$  трубки тока и суммированием по всем элементам замкнутой трубки тока получают закон Ома для замкнутой цепи, в котором ЭДС определяется как циркуляция напряженности поля сторонней силы. В более поздних работах используются те же допущения и рассуждения, но суммирование заменяется интегрированием.

В [2] рассмотрен участок цепи, где действует ЭДС и к концам которого приложена разность потенциалов. Используя закон сохранения и превращения энергии, получают закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) \pm \varepsilon}{R}.$$

Замыкая концы рассматриваемого участка, получают закон для замкнутой цепи, а приравняв ЭДС нулю, – для однородного участка цепи. То есть, рассматривая один участок цепи, выводят два выражения для разных цепей.

Рассмотрим существующий вывод [1] обобщенного закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи постоянного тока. Авторы выбирают неоднородный участок электрической цепи, к концам которого приложена разность потенциалов. Закон Ома в дифференциальной форме (3) записывают в виде

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление рас-

сматриваемого участка.

Здесь следует уточнить, что рассуждения авторов были формально корректны до тех пор, пока не была выбрана конкретная цепь. А из описания не ясно, чем создано электрическое поле: это может быть поле «внешней» разности потенциалов (от внешнего источника) либо разности потенциалов между электродами источника. И в каждом рассматриваемом случае мы получим разный результат.

Выражение (4) определяет плотность тока в точке проводника, в которой известна напряженность полей. Чтобы получить выражение для рассматриваемого участка, сначала умножают скалярно обе части уравнения (4) на вектор  $d\vec{l}$ , численно равный бесконечно малому элементу  $dl$  длины проводника и совпадающий по направлению с вектором плотности тока:

$$\vec{j} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (5)$$

Так как плотность постоянного тока  $j = I/S_{\perp}$  и скалярное произведение векторов  $\vec{j}$  и  $d\vec{l}$  одного направления равно произведению их модулей, то формулу (5) записывают в виде

$$I \cdot \frac{dl}{S_{\perp}} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (6)$$

Затем выражение (6) интегрируют от сечения 1 до сечения 2 и получают формулу закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи:

$$I \cdot \int_1^2 \frac{\rho \cdot dl}{S_{\perp}} = \int_1^2 \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}. \quad (7)$$

Подынтегральное выражение в левой части формулы (7) определяет электрическое сопротивление элемента  $dl$ , а сам интеграл выражает электрическое

сопротивление цепи на рассматриваемом участке «1–2»:

$$\int_1^2 \frac{\rho \cdot dl}{S_{\perp}} = R_{1-2}. \quad (8)$$

При этом сопротивление  $R_{1-2}$  включает в себя как сопротивление  $R$  проводника (внешнее сопротивление), так и сопротивление  $r$  промежутка цепи между электродами источника тока (внутреннее сопротивление источника):

$$R_{1-2} = R + r. \quad (9)$$

Первое слагаемое в правой части (7) выражает работу сил электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда из точки с потенциалом  $\varphi_1$  в точку с потенциалом  $\varphi_2$ . Как известно, этой работой определяется разность потенциалов на рассматриваемом участке:

$$\int_1^2 \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (10)$$

Второе слагаемое в выражении (7) отличается от первого только индексом при  $\vec{E}$ , поэтому оно также определяет работу, но работу сторонней силы по перемещению единичного положительного заряда. Указанной работой определяется электродвижущая сила:

$$\int_1^2 \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l} = \varepsilon. \quad (11)$$

На основе выражения (11) дается определение ЭДС: электродвижущей силой на участке цепи называется физическая величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке. С учетом введенных обозначений выражение (7) записывается в виде

$$I \cdot R_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon. \quad (12)$$

При расчетах с помощью формулы (12) учитывается знак ЭДС: если направление переноса зарядов в источнике совпадает с направлением тока в цепи, то ЭДС считается положительной; если указанные направления не совпадают, то ЭДС считается отрицательной. Изложенное здесь означает, что разность потенциалов на рассматриваемом участке создается дополнительным источником.

Выражение (12) также определяют как математическую формулировку обобщенного закона Ома, т. к. она справедлива для однородного участка и неразветвленной замкнутой цепи с ЭДС.

Закон Ома для однородного участка получают из (12), полагая, что ЭДС и внутреннее сопротивление равны нулю:

$$I \cdot R = (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (13)$$

В данном случае непонятно, как выражение (13) связано с рассматриваемым участком.

Если замкнуть концы рассматриваемого участка цепи проводником (в формуле (12) разность потенциалов приравнивают нулю), то получают закон Ома для неразветвленной замкнутой цепи с источником ЭДС:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (14)$$

Из последнего выражения также следует, что указанная разность потенциалов не связана с рассматриваемым источником. Следовательно, приведенному выводу формулы (7) должна соответствовать схема с дополнительным источником (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что выражение (13) мы получим, замкнув электроды исследуемого источника, а для получения формулы (14) нужно замкнуть клеммы внешнего источника.

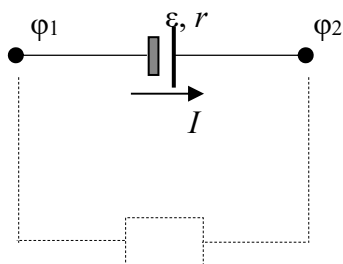


Рис. 2. Предполагаемая схема при выводе закона Ома для неоднородного участка цепи

Таким образом, формулы (13) и (14) соответствуют разным цепям, а не различным участкам одной цепи.

Авторы определяют напряжение  $(I \cdot R_{1-2})$  суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль участка цепи. Это определение, формально вытекающее из (12), скорее усложняет понимание материала, чем передает различия между указанными тремя величинами.

Предполагалось, что рассмотренный закон Ома в интегральной форме позволяет математически строго обосновать существующие определения разности потенциалов, напряжения и ЭДС. Однако, как показывает анализ, приведенный вывод требует уточнений, а неоднозначность некоторых результатов связана, на наш взгляд, с формализмом в исходных предпосылках. Исходя из изложенного, следует признать, что затронутые вопросы требуют методической доработки.

#### **Уточнение исходных допущений при выводе закона Ома для неоднородного участка цепи**

В учебной литературе при обсуждении работы гальванического элемента часто встречается утверждение о том, что в источнике за счет «сторонней силы» происходит перенос электронов от электрода с меньшим потенциалом к электроду с большим потенциалом. Для выяснения справедливости этого утвер-

ждения рассмотрим принцип работы источника на примере гальванического элемента Даниеля.

Избыточные заряды на электродах элемента и создаваемые ими разности потенциалов между электродами и электролитом (электрохимические потенциалы) возникают в результате растворения цинкового электрода (ухода иона  $Zn^{++}$  в электролит) и осаждения иона  $Cu^{++}$  из электролита на медном электроде. Таким образом, цинковый электрод заряжается отрицательно, а медный – положительно. Разность потенциалов между электродами гальванического элемента практически равна разности названных электрохимических потенциалов. «Сторонней силой» в данном случае выступает сила межмолекулярного взаимодействия, которая приводит к растворению (осаждению) ионов материала электрода и появлению разности потенциалов между электродами.

При отсутствии электрической нагрузки в элементе устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся равенством скоростей осаждения и растворения ионов материалов электродов. Этому соответствует равенство напряженностей полей сторонней и электрической сил. Максимальная (равновесная) разность потенциалов между электродами элемента определяет его ЭДС.

При подключении нагрузки избыточные электроны с цинкового электрода по внешней цепи переходят на мед-

ный электрод, уменьшая межэлектродную разность потенциалов. Это приводит к нарушению указанного выше равновесия и дополнительным переходам ионов  $Zn^{++}$  в электролит и  $Cu^{++}$  на электрод. Таким образом, количество избыточных зарядов на электродах источника, создаваемая ими разность потенциалов и электронный ток во внешней цепи поддерживаются непрерывной работой «сторонней силы» по перемещению ионов в межэлектродном промежутке. То есть в случае гальванического элемента электронный ток во внешней цепи замыкается ионным током в источнике. При этом сторонняя сила перемещает заряды (ионы) против «электрической силы» созданной ею разности потенциалов.

Отметим также, что межмолекулярное взаимодействие имеет электромагнитную природу, а следовательно, такой же является природа и «сторонней силы» в гальваническом элементе. Кроме того, «поле сторонней силы» и электрическое поле разности потенциалов, созданной этой силой, отличаются локализацией. Если первое действует (и совершает работу по перемещению иона) в приэлектродной области, то «поле разности потенциалов» присутствует и действует в любой точке

рассматриваемой электрической цепи, включая сам источник. «Неоднородным» является источник ЭДС. Поэтому при изучении неоднородного участка цепи следует рассматривать поля «сторонней силы» и «разности потенциалов на электродах исследуемого источника». Включение дополнительных источников усложняет понимание изучаемого материала.

Последнее обобщение означает, что приведенные выше формулы следует записывать для ионного тока и приэлектродных областей в источнике. При этом следует учитывать удельные сопротивления электролита и электродов. В гальваническом элементе электрическое поле одновременно существует с полем «сторонней силы» в пределах источника. Соответственно, пределы интегрирования в (11) должны быть ограничены расстоянием между электродами источника.

### **Уточненный вывод закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи**

Рассмотрим неразветвленную замкнутую цепь с источником ЭДС, к которому подключена нагрузка с сопротивлением  $R$  (рис. 3).

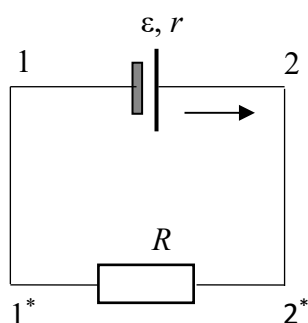


Рис. 3. Неразветвленная замкнутая цепь с источником ЭДС

В данном случае имеют место неоднородный «1–2» и однородный «1\*–2\*» участки цепи. На неоднородном

участке (в источнике) одновременно существуют электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_{эл}$  и поле «сторонней

силы» с напряженностью  $\vec{E}_{стор}$ . На однородном участке «1\*–2\*» существует только электрическое поле. Работа «сторонней силы» при перемещении электрического заряда в электрическом поле отрицательна, но изменение потенциальной энергии является положительным.

Закон Ома в дифференциальной форме для неоднородного участка имеет следующий вид:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (15)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление рассматриваемого участка.

Умножив скалярно обе части (15) на элемент  $d\vec{l}$  и выразив плотность тока через силу тока  $I$  и площадь электрода  $S$ , получим

$$I \cdot \frac{dl}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (16)$$

Проинтегрируем (16) в пределах расстояния  $l$  между электродами источника:

$$I \cdot \int_0^l \frac{\rho \cdot dl}{S} = \int_0^l \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \int_0^l \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}. \quad (17)$$

Обратим внимание на то, что внешне формулы (17) и (7) совпадают за исключением физического смысла величин.

В этом случае интеграл в левой части (17) будет определять внутреннее сопротивление источника:

$$\int_0^l \frac{\rho \cdot dl}{S} = r. \quad (18)$$

Первый интеграл правой части (17) определяет ту часть работы сторонней силы, которая идет на переме-

щение единичного положительного заряда в электрическом поле между электродами. В стационарном электрическом поле эта работа равна изменению потенциала со знаком «минус»:

$$\int_0^l \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} = -(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (19)$$

В (19) работа «сторонней силы» по перемещению заряда в рассматриваемом электрическом поле отрицательна, т. к. изменение потенциальной энергии заряда положительно.

Второй интеграл правой части (17) определяет полную работу сторонней силы по перемещению единицы заряда, т. е. ЭДС источника:

$$\int_0^l \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l} = \varepsilon. \quad (20)$$

С учетом формул (18)–(20) выражение (17) можно записать в виде

$$I \cdot r = \varepsilon - (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (21)$$

или

$$I \cdot r + (\varphi_2 - \varphi_1) = \varepsilon. \quad (22)$$

Из (22) следует, что «сторонние силы» совершают работу по преодолению внутреннего сопротивления и электрического поля, определяемого разностью потенциалов на электродах источника, т. е. электродвижущая сила определяется суммой разности потенциалов между электродами источника и падения потенциала на внутреннем сопротивлении. Другими словами, разность потенциалов на электродах нагруженного источника меньше ЭДС на значение падения потенциала на внутреннем сопротивлении:

$$(\varphi_2 - \varphi_1) = \varepsilon - I \cdot r. \quad (23)$$



Нередко разность потенциалов на электродах нагруженного источника называют напряжением на его зажимах. Из (23) следует, что в рассмотренном случае напряжение равно разности ЭДС и падения потенциала на внутреннем сопротивлении. Если же источник не нагружен  $I = 0$ , то указанная разность потенциалов равна ЭДС, т. е. максимальна.

Теперь рассмотрим однородный участок «1\*–2\*» (см. рис. 3). Исключив в (15)  $\vec{E}_{стор}$  и повторив приведенный вывод, получим формулировку закона Ома для однородного участка:

$$I \cdot R = (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (24)$$

Очевидно, что разности потенциалов на рассматриваемых участках «1–2» и «1\*–2\*» равны. Поэтому, приравняв (23) и (24) и выразив  $I$ , получим формулу закона Ома для неразветвленной замкнутой цепи постоянного тока с источником ЭДС:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (25)$$

Это же выражение можно также получить интегрированием по замкнутому контуру «1–2–2\*–1\*–1».

Обратим внимание на то, что все формулы мы получили, рассматривая два участка одной электрической цепи. В то же время в существующем классическом выводе эти же формулы получают для двух разных цепей.

### Заключение

Показано, что при наличии в цепи гальванического элемента следует учитывать различие в локализации полей «сторонней» и электрической сил. В источнике ЭДС «сторонняя сила» совершает работу по переносу заряда против сил созданного ею электрического поля. В ненагруженном источнике указанная работа, отнесенная к перенесенному заряду, определяет ЭДС. Под нагрузкой электродвижущая сила равна сумме напряжения на зажимах источника и падения потенциала на его внутреннем сопротивлении. Выражения, полученные существующим методом, относятся к разным электрическим цепям, в то же время предложенный вывод приводит к аналогичным формулам, описывающим два участка одной цепи.

Формальное определение напряжения суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль участка цепи скорее усложняет понимание материала, чем передает различия между указанными тремя величинами.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Детлаф, А. А.** Курс физики: учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2004. – 607 с.
2. **Трофимова, Т. И.** Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Академия, 2007. – 560 с.
3. **Калашников, С. Г.** Электричество / С. Г. Калашников. – Москва: Наука, 1964. – 668 с.
4. **Орир, Дж.** Физика : учебник: пер. с англ. / Дж. Орир. – Москва: КДУ, 2010. – 752 с.: ил.
5. **Bowen-Jones, M.** IB Physics Course Book / M. Bowen-Jones, D. Homer. – Oxford University Press, 2014. – 710 p.
6. A Dictionary of Physics: edited by Jonathan Law and Richard Rennie. – Oxford University Press, 2015. – 666 p.
7. **Young, H. D.** College Physics / H. D. Young. – 9th ed. – Addison Wesley, 2011. – 1151 p.
8. Физическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. А. М. Прохорова. – Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. – Т. 5. – 760 с.

9. **Фриш, С. Э.** Курс общей физики / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Ленинград: Физматгиз, 1962. – Т. 2. – 516 с.

*Статья сдана в редакцию 3 марта 2022 года*

**Али Ибрагимович Ляпин**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: ali\_lyapin@tut.by.

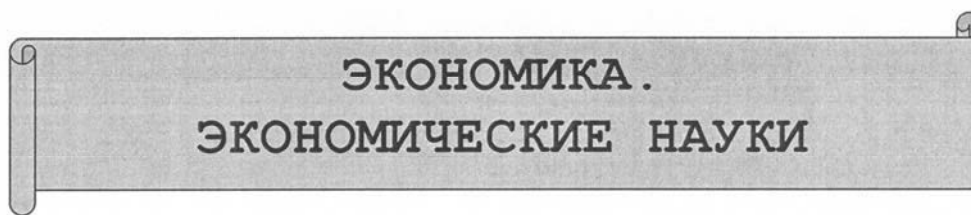
**Елена Валентиновна Пивоварова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: h-v-pivovarova@yandex.ru.

**Александр Васильевич Хомченко**, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: avkh@bru.by.

**Ali Ibragimovich Lyapin**, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: ali\_lyapin@tut.by.

**Helena Valentinovna Pivovarova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: h-v-pivovarova@yandex.ru.

**Alexandr Vasilievich Khomchenko**, DSc (Physics & Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: avkh@bru.by.



DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_67

УДК 339.564

*Л. А. Климова*

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ВЫБОР ЭКСПОРТНЫХ СТРАТЕГИЙ  
ДЛЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ ОАО «МОГИЛЕВСКИЙ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

*L. A. Klimova*

**DEVELOPMENT OF A MODEL AND SELECTION OF EXPORT STRATEGIES  
FOR MAIN TYPES OF PRODUCTS OF JSC «MOGILEV METALLURGICAL  
PLANT»**

**Аннотация**

Разработана модель выбора наиболее оптимальной экспортной стратегии для основных видов продукции открытого акционерного общества «Могилевский металлургический завод», позволяющая принять экономически обоснованное решение о качестве выпускаемой продукции и назначаемой цене на внешних рынках. На основании разработанной модели предложены экспортные стратегии для дроби технической, труб стальных и литья чугунного, оценен возможный прирост суммарных объемов экспорта по всем видам продукции.

**Ключевые слова:**

экспорт, экспортная стратегия, модель, качество, цена, издержки, прибыль.

**Для цитирования:**

Климова, Л. А. Разработка модели и выбор экспортных стратегий для основных видов продукции ОАО «Могилевский металлургический завод» / Л. А. Климова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 67–75.

**Abstract**

A model has been developed for choosing the most optimal export strategy for the main types of products of the Open Joint Stock Company «Mogilev Metallurgical Plant», which allows making an economically sound decision on the quality of products and the assigned price in foreign markets. Based on the developed model, export strategies for technical shot, steel pipes and cast-iron casting are proposed, and a possible increase in total export volumes for all types of products is estimated.

**Keywords:**

export, export strategy, model, quality, price, costs, profit.

**For citation:**

Klimova, L. A. Development of a model and selection of export strategies for main types of products of JSC «Mogilev metallurgical plant» / L. A. Klimova // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 67–75.

## Введение

Открытое акционерное общество «Могилевский металлургический завод» является одним из крупнейших производителей стального и чугунного литья в Европе. Предприятие производит широкую номенклатуру продукции: трубы стальные электросварные прямошовные, трубы стальные водогазопроводные, трубы стальные профильные, трубы стальные сварные общего назначения, оцинкованные трубы, профили полые сварные конструкционные, дробь техническую чугунную литейную и колотую, дробь чугунную литейную балластную, заполнители для изготовления противовесов, люки и дождеприемники чугунные для смотровых и ливневочных колодцев, оси черновые вагонные для железнодорожного подвижного состава, поковки из конструкционных и легированных сталей, малые архитектурные формы (оборудование для благоустройства территорий дворов, садово-парковое и спортивное оборудование для открытых площадок), товары народного потребления [1].

Основными видами продукции, выпускаемой предприятием, являются трубы стальные, дробь техническая и литье чугунное. Область применения труб стальных электросварных – машиностроение, строительство, изготовление трубопроводов и конструкций различного назначения; дробь технической чугунной и стальной – машиностроение, судостроение, строительство (изготовление тяжелых бетонов), добыча и обработка гранитов; люков чугунных – инженерные городские коммуникации, водопроводные сети, канализация.

Ежегодно более 80 % производимой продукции экспортируется более чем в 20 стран мира. Основными потребителями продукции являются машиностроительные, вагоностроительные и станкостроительные предприятия, литейные производства, инструментальные заводы, строительные организации

и другие предприятия Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Литвы, Польши, Прибалтики, Германии, Австрии, Чехии и др.

Стратегическое направление предприятия – увеличение объемов экспорта и прибыли от реализации продукции за счёт обеспечения роста объемов производства продукции, снижения затрат на производство единицы продукции, расширения рынков сбыта путём улучшения качества существующих и создания новых конкурентоспособных видов продукции, повышения качества аналитической работы специалистов управления внешнеэкономических связей, точности прогнозирования рыночной конъюнктуры.

Разрабатываемая для открытого акционерного общества «Могилевский металлургический завод» модель позволит выбрать наилучшую из нескольких возможных экспортных стратегий, оценить перспективы этой стратегии в результате изменения каких-либо факторов внешней и внутренней среды предприятия. Данная модель основана на принятии экономически обоснованного решения о качестве выпускаемой продукции и назначаемой цене.

## Основная часть

Построение модели выбора экспортной стратегии будет осуществляться на основании методики В. Г. Барановской [2].

Для построения модели необходимы следующие данные:

$n$  – объем продаж на внутреннем рынке в натуральном выражении, т;

$m$  – объем продаж на внешнем рынке в натуральном выражении, т;

$C_l$  – издержки на производство единицы продукции низкого качества, долл. США;

$C_h$  – издержки на производство единицы продукции высокого качества, долл. США;

$P_l$  – цена единицы продукции низ-

кого качества, долл. США;

$Ph$  – цена единицы продукции высокого качества, долл. США;

$s$  – величина импортной пошлины, %;

$F$  – инвестиции по выходу на внешний рынок (создание сбытовой сети, формирование маркетинговых коммуникаций), долл. США.

Механизм действий покупателей в рамках данной модели следующий:

– если покупатель думает, что качество продукции высокое, то он приобретает эту продукцию и по высокой, и по низкой цене (во втором случае он даже получает дополнительную пользу);

– если покупатель думает, что качество продукции низкое, то он приобретает ее только по низкой цене.

Для экспортера это означает, что если цена продукции низкая, то продукция будет раскуплена вся, если же цена высокая, то продукция будет приобретена только теми покупателями, которые верят, что ее качество высокое (т. е. теми покупателями, которые доверяют фирме).

Поскольку покупатели имеют разную степень доверия к фирме-производителю, то требуется ввести

еще два параметра модели:

$bi$  – доля отечественных покупателей, которые полагают, что качество продукции фирмы высокое;

$be$  – доля иностранных покупателей, которые полагают, что качество продукции фирмы высокое.

Данная модель предполагает, что в первом периоде покупатели получают возможность приобрести продукцию и определить ее качество, в следующие периоды предприятие будет выпускать продукцию того качества, которое было представлено покупателям в первом периоде, по соответствующей этому качеству цене. Маркетологами предприятия в рамках данной модели могут быть выбраны следующие стратегии. Поскольку есть только два уровня качества (высокое и низкое) и два уровня цены (высокая и низкая), то предприятие может избрать одну из четырех экспортных стратегий. Для сравнения будут рассмотрены стратегии, предполагающие продажи только внутри страны. Таким образом, всего необходимо рассмотреть восемь стратегий.

В табл. 1 приведено краткое описание этих стратегий.

Табл. 1. Описание возможных стратегий для предприятия

Стратегия	Качество (В – высокое, Н – низкое)	Цена в первом периоде	Экспорт	Цена во втором и последующих периодах
Стратегия 1	В	$Ph$	Да	$Ph-Pl$
Стратегия 2	В	$Ph$	Нет	$Ph-Pl$
Стратегия 3	В	$Pl$	Да	$Ph$
Стратегия 4	В	$Pl$	Нет	$Ph$
Стратегия 5	Н	$Ph$	Да	$Pl$
Стратегия 6	Н	$Ph$	Нет	$Pl$
Стратегия 7	Н	$Pl$	Да	$Pl$
Стратегия 8	Н	$Pl$	Нет	$Pl$

Стратегия 1 предполагает продажу продукции высокого качества по высокой цене на внутреннем и внеш-

нем рынках. В первом периоде не все покупатели купят продукцию, а лишь те, которые доверяют фирме. Эти по-

купатели определяют, что качество продукции является на самом деле высоким, поэтому во втором и последующих периодах будут приобретать продукцию по высокой цене. Остальным же покупателям предприятие будет предлагать продукцию низкого качества по соответствующей цене.

Объем реализации в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot (Ph - Ch) + m \cdot bi \cdot ((1 + s) \cdot Ph - Ch), \quad (1)$$

где  $Vr_1$  – объем реализации предприятия в первом периоде.

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot bi \cdot (Ph - Ch) + m \cdot bi \cdot ((1 + s) \cdot Ph - Ch) + n \cdot (1 - bi) \cdot (Pl - Cl) + m \cdot (1 - bi) \cdot ((1 + s) \cdot Pl - Cl), \quad (2)$$

где  $Vr_2$  – объем реализации во втором и последующих периодах.

Поскольку стратегия 2 отличается от стратегии 1 только отсутствием экспорта, то объем реализации предприятия определяется аналогично.

Объем реализации в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot bi \cdot (Ph - Ch). \quad (3)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot bi \cdot (Ph - Ch) + n \cdot (1 - bi) \cdot (Pl - Cl). \quad (4)$$

В рамках стратегии 3 компания в первом периоде предлагает продукцию высокого качества по низкой цене, поэтому все покупатели приобретают ее и убеждаются в ее высоком качестве.

Во втором и последующих периодах предприятие успешно продает продукцию высокого качества по высокой цене.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot (Pl - Ch) + m \cdot ((1 + s) \cdot Pl - Ch). \quad (5)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Ph - Ch) + m \cdot ((1 + s) \cdot Ph - Ch). \quad (6)$$

Для стратегии 4 расчет аналогичен, как и для стратегии 3, при этом отсутствует экспорт.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot (Pl - Ch). \quad (7)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Ph - Ch). \quad (8)$$

В рамках стратегии 5 предприятие предлагает в первом периоде продукцию низкого качества, но по высокой цене. Эту продукцию приобретают только те покупатели, которые доверяют фирме. Во втором и последующих периодах предприятие может предлагать на рынках только продукцию низкого качества по низкой цене, т. к. по высокой цене продукцию не купит никто.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot bi \cdot (Ph - Cl) + m \cdot bi \cdot ((1 + s) \cdot Ph - Cl). \quad (9)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Pl - Cl) + \\ + m \cdot ((1 + s) \cdot Pl - Cl). \quad (10)$$

Для стратегии 6 расчет аналогичен стратегии 5, при этом отсутствует экспорт.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot bi \cdot (Ph - Cl). \quad (11)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Pl - Cl). \quad (12)$$

В рамках стратегии 7 фирма постоянно продает на внешнем рынке продукцию низкого качества и по низкой цене.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot (Pl - Cl) + \\ + m \cdot ((1 + s) \cdot Pl - Cl). \quad (13)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Pl - Cl) + \\ + m \cdot ((1 + s) \cdot Pl - Cl). \quad (14)$$

Расчет для стратегии 8 аналогичен расчету для стратегии 7, при этом отсутствует экспорт.

Объем реализации предприятия в первом периоде составит:

$$Vr_1 = n \cdot (Pl - Cl). \quad (15)$$

Объем реализации предприятия во втором и последующих периодах

$$Vr_2 = n \cdot (Pl - Cl). \quad (16)$$

При расчете объемов реализации от различных стратегий неизбежно возникает проблема учета фактора времени, поэтому необходимо привести все денежные потоки к единому моменту времени. Для этого применяется методика дисконтирования.

Методика дисконтирования является универсальной методикой приведения будущих денежных потоков к настоящему моменту.

Формула дисконтированной текущей стоимости денежных потоков выглядит следующим образом:

$$PDV = \sum_{i=1}^N \frac{CF_i}{(1+r)^i}, \quad (17)$$

где  $PDV$  – дисконтированная текущая стоимость;  $CF_i$  – денежные потоки  $i$ -го периода;  $r$  – ставка дисконтирования;  $N$  – число периодов.

Также необходимо рассчитать чистую приведенную стоимость по каждой стратегии. Формула для расчета чистой приведенной стоимости выглядит следующим образом:

$$NPV = PDV - F, \quad (18)$$

где  $NPV$  – чистая приведенная стоимость;  $PDV$  – дисконтированная текущая стоимость;  $F$  – инвестиции по выходу на внешний рынок.

Далее с использованием формул (1)–(18) были построены модели выбора экспортных стратегий для основных видов продукции предприятия (дробь технической, труб стальных и литья чугунного).

В табл. 2 представлены исходные данные для расчета и выбора оптимальной экспортной стратегии по дробе технической.

В табл. 3 приведен расчет объемов реализации дробы технической по различным стратегиям.

Табл. 2. Исходные данные для расчета и выбора экспортной стратегии по дробе технической

<i>n</i>	<i>m</i>	<i>Ph</i>	<i>Pl</i>	<i>Ch</i>	<i>Cl</i>	<i>s</i>	<i>F</i>	<i>bi</i>	<i>be</i>	<i>N</i>	<i>r</i>
1 237	4 785	895	538	692	428	-0,1	10 000	0,4	0,6	12	10

Табл. 3. Расчет объемов реализации дробы по стратегиям

В тысячах долларов

Стратегия	<i>Vr<sub>1</sub></i>	<i>Vr<sub>2</sub></i>	<i>PDV</i>	<i>F</i>	<i>NPV</i>
Стратегия 1	317 683	560 676	3 599 371	10 000	3 589 371
Стратегия 2	100 444	182 086	1 166 458	10 000	1 156 458
Стратегия 3	-1 184 821	794 209	3 612 377	10 000	3 602 377
Стратегия 4	-190 498	251 111	1 309 530	10 000	1 299 530
Стратегия 5	953 607	404 987	3 258 202	10 000	3 248 202
Стратегия 6	231 072	136 070	1 013 505	10 000	1 003 505
Стратегия 7	404 987	404 987	2 759 457	10 000	2 749 457
Стратегия 8	136 070	136 070	927 139	10 000	917 139

Из табл. 3 следует, что наиболее прибыльной является экспортная стратегия 3 (реализация дробы высокого качества по низкой цене в первом периоде и по высокой цене в последующие периоды).

Экспорт дробы технической в 2021 г. в стоимостном выражении составил 2 712 364 долл. США.

В результате выбора предложенной стратегии экспорт дробы в 2022 г.

мог бы составить 3 602 377 тыс. долл. США, что превышает объемы экспорта в 2021 г. на следующую величину:

$$3\,602\,377 - 2\,712\,364 = 890\,013 \text{ долл. США.}$$

Исходные данные для расчета и выбора оптимальной экспортной стратегии по трубам стальным представлены в табл. 4.

Табл. 4. Исходные данные для расчета и выбора экспортной стратегии по трубам стальным

<i>n</i>	<i>m</i>	<i>Ph</i>	<i>Pl</i>	<i>Ch</i>	<i>Cl</i>	<i>s</i>	<i>F</i>	<i>bi</i>	<i>be</i>	<i>N</i>	<i>r</i>
3 993	43 708	623	531	477	406	-0,1	20 000	0,8	0,2	12	10

В табл. 5 приведен расчет объемов реализации труб стальных по различным стратегиям.

Из табл. 5 следует, что наиболее прибыльной будет стратегия 1 (реализа-

ция труб стальных высокого качества по высокой цене).

Экспорт труб стальных в 2021 г. в стоимостном выражении составил 25 777 075 долл. США.



Табл. 5. Расчет объемов реализации труб стальных по стратегиям

В тысячах долларов

Стратегия	$Vr_1$	$Vr_2$	$PDV$	$F$	$NPV$
Стратегия 1	3 393 070	4 121 416	27 419 926	20 000	27 399 926
Стратегия 2	466 382	566 207	3 767 210	20 000	3 747 210
Стратегия 3	254 959	4 241 338	25 275 189	20 000	25 255 189
Стратегия 4	215 622	582 978	3 638 272	20 000	3 618 272
Стратегия 5	6 102 487	3 641 730	27 050 678	20 000	27 030 678
Стратегия 6	693 185	499 125	3 577 302	20 000	3 557 302
Стратегия 7	3 641 730	3 641 730	24 813 626	20 000	24 793 626
Стратегия 8	499 125	499 125	3 400 884	20 000	3 380 884

В результате осуществления предприятия предлагаемой стратегии экспорт труб в 2022 г. составил бы 27 399 926 долл. США, что превышает объемы экспорта в 2021 г. на сумму

$$27\,399\,926 - 25\,777\,075 = \\ = 1\,622\,851 \text{ долл. США.}$$

Прибыльной является также экспортная стратегия 5, подразумевающая

продажу труб низкого качества по высоким ценам, но, основанная на «нечестной игре», она может испортить репутацию предприятия.

Исходные данные для расчета и выбора оптимальной экспортной стратегии по литью чугуна представлены в табл. 6.

В табл. 7 приведен расчет объемов реализации литья чугуна по стратегиям.

Табл. 6. Исходные данные для расчета и выбора экспортной стратегии по литью чугуна

$n$	$m$	$Ph$	$Pl$	$Ch$	$Cl$	$s$	$F$	$bi$	$be$	$N$	$r$
2 588	1 515	661	541	564	460	-0,12	10 000	0,5	0,5	12	0,1

Табл. 7. Расчет объемов реализации литья чугуна по стратегиям

В тысячах долларов

Стратегия	$Vr_1$	$Vr_2$	$PDV$	$F$	$NPV$
Стратегия 1	138 911	255 905	1 637 299	10 000	1 627 299
Стратегия 2	125 518	230 332	1 474 126	10 000	1 464 126
Стратегия 3	-192 723	277 821	1 465 219	10 000	1 455 219
Стратегия 4	-59 524	251 036	1 428 155	10 000	1 418 155
Стратегия 5	352 267	233 989	1 701 854	10 000	1 691 854
Стратегия 6	260 094	209 628	1 474 219	10 000	1 464 219
Стратегия 7	233 989	233 989	1 594 329	10 000	1 584 329
Стратегия 8	209 628	209 628	1 428 341	10 000	1 418 341

Из табл. 7 следует, что наиболее прибыльной является экспортная стратегия 5, подразумевающая продажу литя низкого качества по высоким ценам, но, так же как и в случае с трубами стальными, основанная на «нечестной игре», она может испортить репутацию предприятия.

Поэтому оптимальной будет стратегия 1 (реализация литя высокого качества по высоким ценам).

Экспорт литя чугунного в 2021 г. составлял 833 775 долл. США.

В результате осуществления предлагаемой стратегии экспорт литя мог бы составить в 2022 г. 1 627 299 долл. США, что превышает объемы экспорта в 2021 г. на сумму

$$1\ 627\ 299 - 833\ 775 = 793\ 524 \text{ долл. США.}$$

Общий прирост объемов экспорта основных видов продукции ОАО «Могилевский металлургический завод» в результате выбора наиболее прибыльных стратегий может составить

$$\begin{aligned} 890\ 013 + 1\ 622\ 851 + 793\ 524 = \\ = 3\ 306\ 388 \text{ долл. США.} \end{aligned}$$

Следует отметить, что по всем видам рассматриваемой продукции наилучшими являются инновационные экспортные стратегии, подразумевающие производство и реализацию продукции высокого качества с экономически обоснованным достаточно высоким

уровнем цен, отвечающей всем запросам зарубежных потребителей. Такие стратегии «представляют собой вариант выхода и закрепления на уже знакомый рынок с новыми товарами за счет направления средств стратегий на внедрение плана маркетинга по продвижению продукции и работу по разработке новых изделий, отличающихся уникальными характеристиками; при этом известность торговой марки на рынке позволяет более успешно предлагать новый товар потребителям, знакомым с другими промышленными изделиями производителя. Данный пример наиболее характерен для западноевропейского рынка, для которого важное значение имеют имя и опыт поставщика, качество продукции и возможность получения продукции, отличающейся улучшенными технологическими и экономическими характеристиками» [3].

### Заключение

Проведенное исследование показало, что предлагаемые модели выбора экспортных стратегий для основных видов продукции ОАО «Могилевский металлургический завод» (дробь технической, труб стальных и литя чугунного) являются экономически обоснованными и позволяют предприятию наращивать объемы экспорта, обеспечивать поступление валюты за счет производства и реализацию товаров высокого качества, отвечающих всем запросам зарубежных потребителей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Открытое акционерное общество «Могилевский машиностроительный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mmz.by>. – Дата доступа: 22.02.2022.
2. Барановская, В. Г. Построение модели выбора предприятием экспортной стратегии / В. Г. Барановская // Маркетинг: идеи и технологии. – 2007. – № 5. – С. 35–40.

3. Долгих, Р. Н. Формирование и реализация экспортной стратегии предприятий электротехнической промышленности: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Р. Н. Долгих; Сам. гос. экон. акад. – Самара, 2006. – 25 с.

*Статья сдана в редакцию 4 марта 2022 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).

---

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_76

УДК 519.86

*В. А. Ливинская, Т. М. Лобанова*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВВП СРЕДСТВАМИ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ПАНЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

---

*V. A. Livinskaya, T. M. Lobanova*

## MODELING GDP DYNAMICS USING REGRESSION ANALYSIS OF PANEL DATA

---

### Аннотация

Рассмотрен подход к анализу макроэкономических показателей с помощью панельного регрессионного анализа. Получены модели динамики ВВП на душу населения в трех группах стран, различающихся по уровню развития экономики в период после распада СССР. В качестве предикторов выбраны показатели: доля экспорта в ВВП, торговое сальдо на душу населения и уровень государственного управления. Предпринята попытка обоснования различия в динамике этих показателей. Даны оценка качества и критерий выбора возможных моделей для панельных данных (pooling model, fixed effect, random effects model). Продемонстрировано различие в фактических и модельных значениях по выбранным моделям для некоторых стран выбранных групп.

### Ключевые слова:

панельные данные, модели панельной регрессии, фиксированные эффекты, ВВП на душу населения, экспорт.

### Для цитирования:

Ливинская, В. А. Моделирование динамики ВВП средствами регрессионного анализа панельных данных / В. А. Ливинская, Т. М. Лобанова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 76–85.

### Abstract

The article considers an approach to the analysis of macroeconomic indicators using panel regression analysis. Models of dynamics of GDP per capita in three groups of countries differing in the level of economic development in the period after the collapse of the USSR are obtained. The share of exports in GDP, the trade balance per capita, and the level of Worldwide Governance Indicators were chosen as predictors. There was made an attempt to substantiate the difference in the dynamics of these indicators. An assessment of the quality and a criterion for choosing possible models for panel data (pooling model, fixed effect, random effects model) are given. The difference in actual and model values for the selected models for some countries of the selected groups is demonstrated.

### Keywords:

panel data, panel regression models, fixed effects, GDP per capita, exports.

### For citation:

Livinskaya, V. A. Modeling GDP dynamics using regression analysis of panel data / V. A. Livinskaya, T. M. Lobanova // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 76–85.

---

Изучение социально-экономических процессов на основе данных, опубликованных в открытой печати, стало возможным благодаря развитию

современных информационных технологий, которые способствовали возникновению и развитию новых методов в эконометрике. Одним из таких инстру-

ментов, применяемым в анализе межстрановой дифференциации, является анализ панельных данных. Под панельными данными подразумевается информация о динамике показателей для различных стран в один и тот же временной период. Так, обычно, экономическая ситуация сохраняет свою стабильность не очень продолжительное время, статистических данных по каждой стране не всегда достаточно для построения регрессионной модели для каждой из них отдельно. Анализ на основе панельных данных обеспечивает большую эффективность оценивания параметров эконометрической модели, возможность контроля над неоднородностью объектов и выявления ее степени, а также идентификацию эффектов, недоступных в анализе пространственных данных (cross-section data), что позволяет более полно учесть особенности объектов, попавших в выборку.

Целью данного исследования явилось моделирование зависимости ВВП на душу населения в выбранных группах с помощью панельного анализа для выявления сходства и различия развития экономики в выбранных группах стран, а также различия внутри самих групп.

В качестве исходной информации для анализа с помощью библиотек языка R с официального сайта Мирового банка [1] была извлечена выборка по 19 странам за период с 2002 г. по 2020 г. Представлялось интересным проанализировать динамику экономического развития стран, которые до мо-

мента распада СССР в 1992 г. имели схожую экономическую модель. Выбор периода анализа обусловлен некоторой стабилизацией в политическом и экономическом смысле во всех странах. Страны были разбиты на три группы с учетом схожести социально-экономических и политических условий существования. В группу 1 вошла часть стран бывшего Советского Союза, являющихся до 2008 г. членами Содружества Независимых Государств. Покинувшие Содружество Грузия (2008) и Украина (2014) продолжали торговлю со странами, оставшимися членами СНГ, используя географическое положение и налаженные экономические связи.

Группа 2 представлена странами Прибалтики, которые в своём развитии ориентированы на модель экономики стран ЕС.

В группу 3 вошли некоторые страны бывшего социалистического лагеря, демонстрирующие различные темпы экономического роста. Так, страны групп 2 и 3 стали членами Европейского Союза, получив при этом вполне ощутимую финансовую поддержку от Германии и Франции.

Основная цель исследования – выяснение различия в динамике роста показателя ВВП на душу населения в зависимости от индикаторов внешней торговой-экономической деятельности и эффективности институтов госуправления.

Группы и их состав представлены в табл. 1.

Табл. 1. Группировка стран для анализа

Группа	Страна
Группа 1	Армения (AM), Азербайджан (AZ), Беларусь (BY), Грузия (GE), Казахстан (KZ), Молдова (MD), Российская Федерация (RU), Украина (UA)
Группа 2	Эстония (EE), Литва (LT), Латвия (LV)
Группа 3	Болгария (BG), Чешская Республика (CZ), Венгрия (HU), Польша (PL), Румыния (RO), Словения (SI), Словацкая Республика (SK)

В качестве критерия роста экономики выступал ВВП на душу населения. Исследовалось влияние на данный показатель результативности внешнеэкономической деятельности и качества институтов государственного управления. Масштаб внешнеэкономической деятельности оценивался показателем доли экспорта в ВВП, а её качество – сальдо в расчёте на душу населения.

Описание данных показателей в соответствии с методологией Мирового банка приведено далее [1].

ВВП на душу населения – это валовой внутренний продукт, разделенный на среднегодовую численность населения. ВВП представляет собой сумму валовой добавленной стоимости всех производителей-резидентов в экономике плюс любые налоги на продукты и минус любые субсидии, не включенные в стоимость продуктов. Он рассчитывается без вычетов на амортизацию произведенных активов или истощение и деградацию природных ресурсов.

Экспорт товаров и услуг представляет собой стоимость всех товаров и других рыночных услуг, предоставляемых остальному миру. Они включают стоимость товаров, фрахт, страхование, транспорт, поездки, роялти, лицензионные сборы и другие услуги, такие как связь, строительство, финансовые, информационные, деловые, личные и государственные услуги. Они не включают оплату труда работников, инвестиционный доход и трансфертные платежи.

Чистая торговля товарами и услугами (сальдо) получается путем взаимозачета импорта товаров и услуг с экспортом товаров и услуг. Экспорт и импорт товаров и услуг включают все операции, связанные со сменой права собственности на товары и услуги между резидентами одной страны и остальным миром. Данные указаны в текущих долларах США.

Динамика показателя ВВП на душу населения в каждой группе стран представлена на рис. 1.

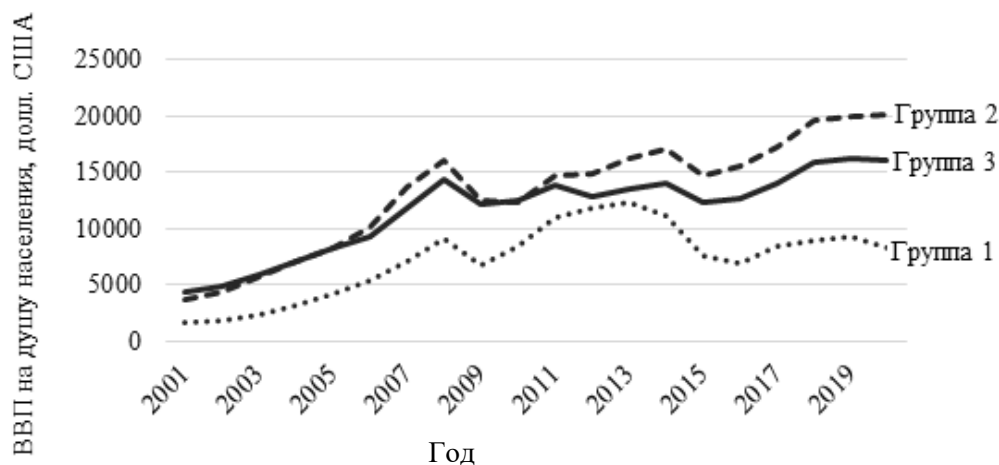


Рис. 1. Динамика среднего значения показателя ВВП на душу населения по группам стран

Рост ВВП на душу населения наблюдается по всем трём группам стран. При этом к концу анализируемого периода у прибалтийских и западноевропейских стран его значение

в 2,5–3,5 раза выше, чем в группе 1. На графике заметно влияние, которое оказали мировой финансовый кризис 2008 г. и локальный кризис 2014 г. При этом если к мировому кризису более чувств-

вительны оказались прибалтийские страны, то политическая ситуация в регионе в 2014 г. в большей мере сказалась на всём остальном постсоветском пространстве.

На рис. 2 представлено изменение положения стран на конец анализируемого периода по сравнению с их поло-

жением на начало. Диаметр круга пропорционален величине исследуемого показателя – ВВП на душу населения. Позиции стран на начало анализируемого периода обозначены светлой заливкой и сокращённым наименованием, а на конец периода – тёмной заливкой и полным наименованием стран.

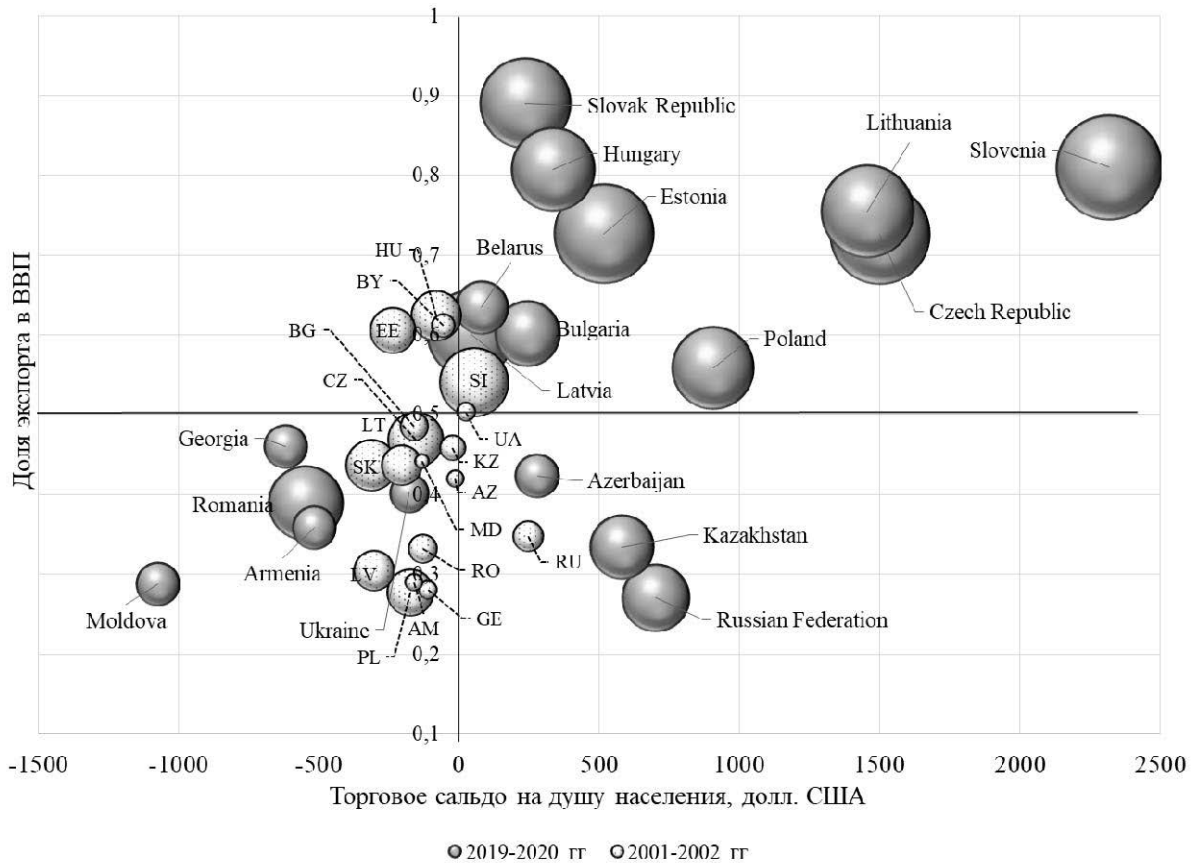


Рис. 2. Изменение показателей внешнеэкономической деятельности и ВВП на душу населения за анализируемый период

На начало анализируемого периода торговое сальдо у большинства стран (за исключением России, Словении и Украины) было отрицательное и находилось в пределах от –13 (у Азербайджана) до –300 долл./чел. (у Словакии). Что касается размера ВВП на душу населения, то здесь разброс между странами более существенный: от 540 (у Молдовы) до 11 128 долл. (у Словении). Ориентация стран на экспорт также была различна. У таких стран, как Грузия, Армения, Румыния, Польша,

Латвия, доля экспорта в ВВП составляла около 28 %...30 %, а максимальная величина в районе 60 % наблюдалась у Беларуси, Эстонии и Венгрии.

За два десятилетия страны проходили свой путь развития. Большинство сделали ставку на развитие внешнеторговой деятельности, что проявилось в наращивании доли экспорта в ВВП и выходе на положительное сальдо. Наибольшего прогресса в этом направлении удалось достичь Словении: на конец анализируемого периода

доля экспорта в ВВП составила 81 %, чистый экспорт – 2 317, а показатель ВВП на душу населения достиг 25 730 долл./чел., что является наилучшим значением среди всех стран. В то же время антирекорд принадлежит Молдове: отрицательное сальдо увеличилось с 132 до 1 172 долл./чел. Доля экспорта упала с 44 % до 28 %. ВВП на душу населения при этом вырос с 540 до 4 520 долл., однако это одно из наихудших значений среди всех стран.

Отдельно следует отметить группу стран-экспортёров энергоресурсов: Россию, Казахстан, Азербайджан. Доля экспорта в ВВП у них снижается, однако чистый экспорт на душу населения существенно вырос. Это можно объяснить тем, что экспорт товаров осуществляется с высокой маржой.

Наименьшее значение ВВП на душу населения среди всех стран наблюдается на Украине – 3700 долл.,

при этом имеет место ухудшение по всем направлениям внешнеэкономической деятельности. Из всех постсоветских стран только Украина, Грузия и Молдова не только не вышли на положительное сальдо, но и существенно нарастили преобладание импорта над экспортом.

В целом, можно отметить, что смещение вверх и вправо (наращивание доли экспорта и положительного сальдо внешней торговли) ведёт к увеличению диаметра круга, что пропорционально размеру ВВП на душу населения. Этот факт однозначно подтверждает положительное влияние внешней торговли на рост экономики.

Разные модели развития стран проявились в разной траектории изменения результирующего показателя (рис. 3). Не сложно заметить практически идентичность изменения ВВП на душу населения среди стран, входящих в одну и ту же группу.

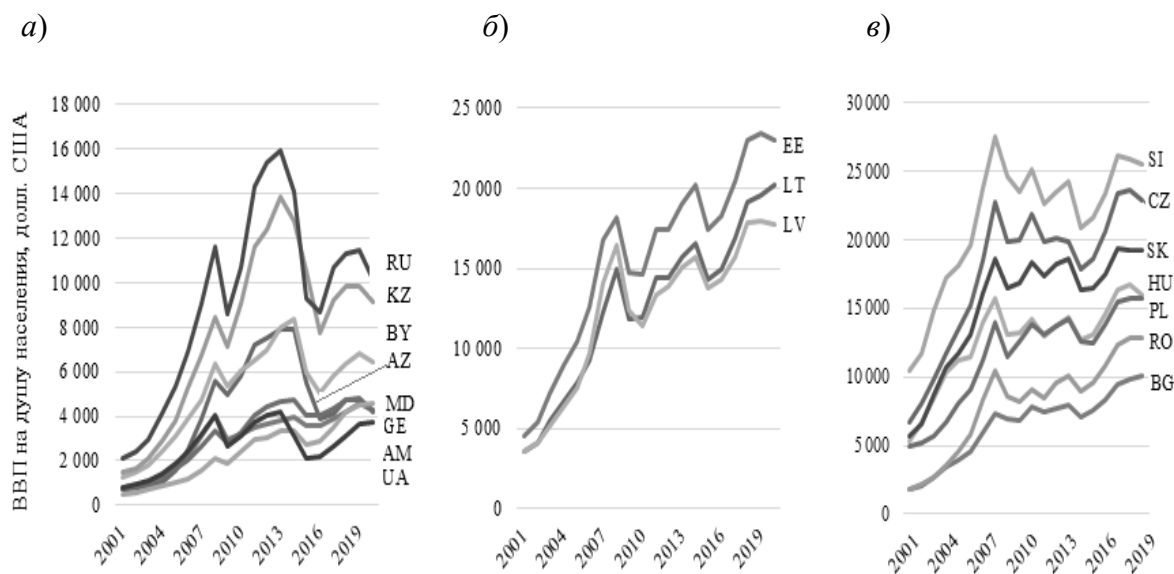


Рис. 3. Динамика ВВП на душу населения по группам стран: а – группа 1; б – группа 2; в – группа 3

Ещё одним немаловажным фактором, оказывающим существенное влияние на все, включая экономические, аспекты развития страны, является качество институциональной среды. Мето-

дология оценки показателей качества государственного управления (Worldwide Governance Indicators) была разработана группой Всемирного банка (World Bank Group) в 1990-е гг. [2].



Множество индикаторов объединено в шесть групп, отражающих различные стороны эффективности государственного управления.

1. Право голоса и подотчетность (Voice and Accountability).

2. Политическая стабильность и отсутствие насилия (Political Stability and Absence of Violence/Terrorism).

3. Эффективность правительства (Government Effectiveness).

4. Качество госрегулирования (Regulatory Quality).

5. Верховенство закона (Rule of Law).

6. Контроль коррупции (Control of Corruption).

Значение индикаторов вычисляется на основе обработки результатов опросов респондентов (согласно методологии оно находится в диапазоне от  $-2,5$  до  $2,5$ ), вследствие чего формируется интегральный показатель, характеризующий качество и эффективность государственного управления страны.

Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой связи между данным индикатором и уровнем ВВП на душу населения, поэтому в дальнейшем он также был включён в модель.

### ***Эконометрическое моделирование динамики ВВП на душу населения***

Моделирование влияния индикаторов ВЭД и эффективности госуправления на ВВП на душу населения осуществлялось с помощью построения эконометрических моделей на панельных данных. Данный инструмент является эффективным в случае, когда имеется информация об одном и том же множестве объектов за ряд последовательных периодов времени. Исходная выборка представляет собой 342 наблюдения в виде сбалансированных панелей, т. е. в которых все 18 стран наблюдаются одинаковое число (19) лет.

Для каждой группы стран оцени-

вались три эконометрические модели, которые могут быть подходящими для наборов панельных данных. Классическая модель множественной линейной регрессии (pooling model) использует метод наименьших квадратов для оценки коэффициентов. Она не учитывает индивидуальные различия в значении признаков по странам и по годам, что не всегда является корректным, т. к. чаще всего каждый объект наблюдения обладает определенными признаками, которые могут воздействовать на результирующий показатель, но плохо поддаются регистрации, т. е. являются латентными. Если их значения различны для разных объектов, но постоянны во времени, их влияние можно учесть, вводя в модель индивидуальные уровни для каждого объекта. Если ненаблюдаемые переменные коррелированы с регрессорами, то коэффициенты лучше будут оцениваться моделью с фиксированными эффектами (fixed effects, FE). В противном случае для панельных данных используют модели со случайными эффектами (random effects models, RE).

Выбор наилучшей модели осуществляется с помощью тестирования специальных гипотез. Так, критерий Вальда позволяет выбрать между моделями pooling и fixed. Нулевая гипотеза в модели с фиксированными эффектами: все индивидуальные эффекты равны нулю. Критерий проверки гипотезы имеет распределение Фишера.

Сравнение моделей с фиксированными и случайными индивидуальными эффектами осуществляется с помощью теста Бриша – Пэгана. Нулевая гипотеза проверяет гомогенность дисперсий специфических для наблюдений ошибок, используя асимптотическую тестовую статистику Хи-квадрат. Тест Хаусмана для сравнения моделей со случайным и фиксированным эффектами проверяет нулевую гипотезу о том, что корреляция между ошибками и регрессорами отсутствует (равна нулю).

Тест Хаусмана позволяет сравнить

качество моделей fixed и random. В случае принятия в качестве наиболее подходящей модели с фиксированными эффектами, может быть рассчитан эффект для каждой страны [3, 4].

Для анализа теоретически предполагаемой связи между ВВП на душу населения и выбранными факторами для каждой группы стран были оценены и выбраны наиболее адекватные модели панельной регрессии вида

$$Y_{i,t} = \beta_1 GE_{i,t} + \beta_2 ESH_{i,t} + \beta_3 SPC_{i,t} + f_i + u_i + \varepsilon_{i,t},$$

где  $Y_{i,t}$  – ВВП на душу населения (в текущих ценах, долл. США) в стране  $i$  за год  $t$ ;  $GE_{i,t}$  – эффективность гос-

управления в стране  $i$  за год  $t$ ;  $ESH_{i,t}$  – доля экспорта в процентах от ВВП в стране  $i$  за год  $t$ ;  $SPC_{i,t}$  – сальдо на душу населения в стране  $i$  за год  $t$ ;  $f_i$  – фиксированные эффекты (индивидуальные значения константы в уравнении для отдельных стран в модели с фиксированными эффектами);  $u_i$  – индивидуальное для каждой страны значение случайной ошибки;  $\varepsilon_{i,t}$  – случайные ошибки модели.

Для автоматизации расчётов была использована среда программирования R. Анализ и моделирование панельных данных проводились при помощи встроенного пакета plm(), версия 2.6-1.

В табл. 2 представлены результаты тестирования моделей с помощью соответствующих тестов.

Табл. 2. Результаты тестирования моделей

Группа стран	Тест Вальда	Тест Хаусмана	Тест Бриша – Пэгана
Группа 1	F = 22,074, df1 = 7, df2 = 141, p-value < 2,2e <sup>-16</sup>	chisq = 8,0733, df = 3, p-value = 0,04452	chisq = 205,23, df = 1, p-value < 2,2e <sup>-16</sup>
Группа 2	F = 6,182, df1 = 2, df2 = 51, p-value = 0,003945	–	chisq = 2,9541, df = 1, p-value = 0,08566
Группа 3	F = 27,724, df1 = 6, df2 = 123, p-value < 2,2e <sup>-16</sup>	chisq = 58,057, df = 3, p-value = 1,528e <sup>-12</sup>	chisq = 117,71, df = 1, p-value < 2,2e <sup>-16</sup>

Для группы 1 между полной регрессией и моделью с фиксированными эффектами выбор делается в пользу модели с фиксированными эффектами, дисперсия случайных ошибок равна нулю. Все коэффициенты статистически значимы на уровне значимости менее 0,001.

Для групп 2 и 3 лучшей может быть признана модель с фиксированными эффектами. Показатели эффективность госуправления и доля экспорта в ВВП положительно влияют на результирующий фактор, в то время как сальдо на душу населения демонстрирует отрицательную корреляцию с ним.

В табл. 3 представлены результаты

оценки регрессионных панельных моделей с фиксированными эффектами для каждой группы стран.

Фиксированные эффекты  $f_i$  для групп представлены в табл. 4.

На рис. 4 приведены результаты сравнения расчетных и фактических значений динамики ВВП на душу населения для отдельных представителей из каждой исследуемой группы стран.

Для большинства стран полученные модели довольно точно описывают динамику результирующего показателя. Однако следует отметить тот факт, что, несмотря на общепризнанное положительное влияние эффективной внешней

торговли на рост благосостояния страны, в каждой из рассматриваемых стран степень влияния экспорта как объясняющего фактора на рост ВВП на душу населения может различаться. В ряде стран в некоторые периоды заметно существенное расхождение между фактическими и теоретическими значениями результирующего показателя. Причём модель предсказывает в эти годы снижение ВВП, что может означать, что в эти периоды спада экспортных доходов

возрастала роль других, не включённых в модель факторов. Кроме того, в наиболее благополучные периоды страны создают резервы, которые используют для стабилизации макро- и микроэкономической ситуации в кризисные годы. Этим объясняется более стабильная, по сравнению с предсказанной, динамика ВВП на душу населения для наиболее чувствительных к кризисным явлениям стран.

Табл. 3. Оценка коэффициентов моделей для групп

Переменная	Статистическая модель		
	Группа 1 (FE)	Группа 2 (FE)	Группа 3 (FE)
Эффективность госуправления	3 7166,9*** (524,42)	164,53 (1 887,18)	9 031,20** (3 115,59)
Доля экспорта в ВВП	-12 438*** (2 197,3)	25 684,15*** (2 846,51)	26 609,09*** (5 144,45)
Сальдо на душу населения	2,97*** (0,33)	-0,47 (0,52)	-0,65 (0,64)
R <sup>2</sup>	0,47	0,51	0,64
<i>Примечание</i> – *** – для $p < 0,001$ ; ** – для $p < 0,01$ ; * – для $p < 0,05$			

Табл. 4. Значение фиксированных эффектов

Группа 1		Группа 2		Группа 3	
Страна	$f_i$	Страна	$f_i$	Страна	$f_i$
Армения	8 868,60	Эстония	-12 259,71	Болгария	-8304,02
Азербайджан	10 152,17	Латвия	-8 264,29	Чешская Республика	1 031,88
Беларусь	16 403,24	Литва	-11 505,78	Венгрия	-6 813,38
Грузия	8 657,75			Польша	616,40
Казахстан	12 064,22			Румыния	-783,23
Молдова	11 396,20			Словацкая Республика	-4 805,44
Россия	12 150,68			Словения	4 409,53
Украина	11 179,01				

Таким образом, был изучен инструмент, позволяющий при анализе коротких временных рядов снижать

зависимость между объясняющими переменными, уменьшать тем самым стандартные ошибки, что повышает

точность регрессионной модели. При этом модель панельной регрессии позволяет учесть индивидуальные осо-

бенности динамики каждого объекта в выборке.

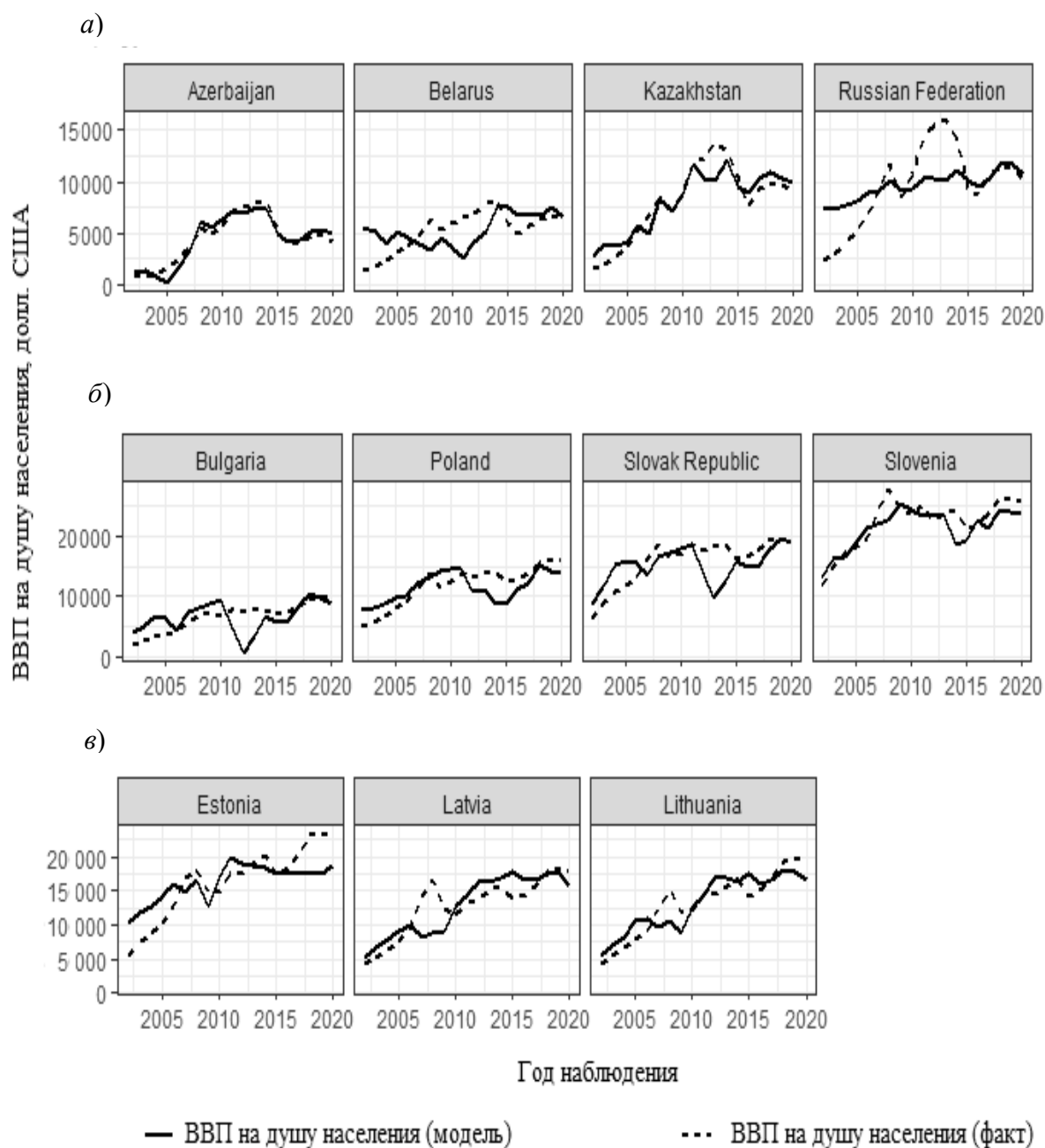


Рис. 4. Результаты сравнения фактических и расчётных значений результирующего показателя для отдельных стран: а – группа 1; б – группа 2; в – группа 3

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Открытые данные Мирового банка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.worldbank.org/>. – Дата доступа: 01.02.2022.

2. Worldwide Governance Indicators [Electronic resource]. – Mode of access: <http://info.worldbank.org/governance/wgi/>. – Date of access: 01.02.2022.

3. **Ратникова, Т. А.** Введение в эконометрический анализ панельных данных / Т. А. Ратникова // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2006. – Т. 10, № 2. – С. 267–316.

4. **Семерикова, Е. В.** Использование пространственных эконометрических моделей при прогнозе регионального уровня безработицы / Е. В. Семерикова, О. А. Демидова // Прикладная эконометрика. – 2016. – № 3 (43). – С. 29–51.

*Статья сдана в редакцию 28 марта 2022 года*

**Виктория Александровна Ливинская**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [viktorijalivinskaya@gmail.com](mailto:viktorijalivinskaya@gmail.com).

**Татьяна Михайловна Лобанова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [yatm@rambler.ru](mailto:yatm@rambler.ru).

**Viktoriya Aleksandrovna Livinskaya**, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: [viktorijalivinskaya@gmail.com](mailto:viktorijalivinskaya@gmail.com).

**Tatiana Mikhailovna Lobanova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: [yatm@rambler.ru](mailto:yatm@rambler.ru).

---

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_86

УДК 331.56

*В. А. Ливинская, М. А. Шалухова*

## АНАЛИЗ КОМПЕТЕНЦИЙ РЫНКА ТРУДА ИТ-СФЕРЫ

---

*V. A. Livinskaya, M. A. Shaluchova*

## ANALYSIS OF COMPETENCES OF LABOR MARKET IN THE IT SPHERE

---

### **Аннотация**

Рынок информационных технологий (ИТ) является одним из самых динамичных во всем мире. Традиционно к этому рынку относят сегменты вычислительной техники, компьютерной периферии, программного обеспечения и ИТ-услуг. Выпускники ИТ-профиля университета должны обладать широким спектром компетенций, являющихся универсальными для различных предметных областей. Одним из путей актуализации получаемых учащимися знаний является постоянный мониторинг компетенций, предъявляемых потенциальным специалистам в данной сфере, который может быть полезен разработчикам образовательных программ университетов, выпускающих специалистов в области информационных технологий.

В статье рассматривается анализ рынка труда ИТ-сферы современными средствами прикладной статистики. Результаты такого анализа могут использовать как потенциальные соискатели с опытом работы в соответствующей сфере, так и представители университетов (студенты, выбирающие наиболее интересное для них направление в ИТ, а также преподаватели).

### **Ключевые слова:**

рынок труда, прикладная статистика, анализ рынка, информационные технологии.

### **Для цитирования:**

Ливинская, В. А. Анализ компетенций рынка труда ИТ-сферы / В. А. Ливинская, М. А. Шалухова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 86–94.

### **Abstract**

The information technology (IT) market is one of the most dynamic in the world. Traditionally, this market includes such segments as computing equipment, computer peripherals, software and IT services. University IT graduates must have a wide range of competencies, which are universal for different subject areas. One of the ways to update knowledge acquired by students is constant monitoring of competencies required of potential specialists in this field, which can be useful to developers of educational programs for universities that graduate information technology specialists.

The article deals with the analysis of the IT-sphere labor market using modern tools of applied statistics. The results of such analysis can be used both by potential applicants with experience in the relevant field and by university representatives (students choosing the most interesting field for them in IT, as well as university teachers).

### **Keywords:**

labor market, applied statistics, market analysis, information technology.

### **For citation:**

Livinskaya, V. A. Analysis of competences of labor market in the IT / V. A. Livinskaya, M. A. Shaluchova // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 86–94.

---

## **Введение**

Цифровизация увеличивает потребность как в специалистах, создающих эти технологии, так и в специалистах, умеющих грамотно ими пользоваться. Как правило, для анализа социально-экономических индикаторов рынка труда используются статистические инструменты. В цифровой экономике все большее значение приобретает электронная обработка информации на базе пакетов прикладных программ.

Специфика IT-сферы позволяет квалифицированным специалистам иметь как высокую мобильность, так и широкие возможности удаленной работы. Тенденции развития основных технологий и методологий разработки, а также управления IT-проектами являются общими для всего рынка труда данной сферы независимо от локализации. Для выявления основных тенденций развития и актуализации программ подготовки актуальных компетенций у выпускающихся специалистов необходимо проводить периодический анализ рынка труда IT-сферы.

Статистический анализ специалистов, занятых в IT-сфере, вызывает определенные трудности. Разбиение на категории можно осуществлять по различным критериям. Так, к примеру, можно предложить следующую градацию:

– специалисты, разрабатывающие программное и техническое обеспечение, которые числятся в качестве таковых в соответствии с трудовым законодательством или классификатором занятости;

– студенты и выпускники средних специальных и высших учебных заведений с соответствующей специальностью (инженеры и техники, отмеченные данными статистики), которые действительно работают в данной сфере;

– «фрилансеры», выполняющие работу в сфере информационных технологий на заказ;

– «совместители», занятые в сфере IT в качестве дополнительной занятости.

Данные группы могут пересекаться, несмотря на многообразие возможных форм занятости, что объясняется необходимостью обладания общим набором компетенций. Подход к анализу рынка с этой точки зрения предпринят в данной работе.

В связи с этим представляется необходимым совершенствовать действующие подходы к анализу рынка труда с использованием появившихся возможностей обработки информации, что и обосновывает актуальность исследования данного вопроса. Современные средства прикладной статистики в сочетании с возможностью использовать открытое ПО (Open Source) позволяют проводить такой анализ и применять его результаты для актуализации программ подготовки специалистов данного профиля, что, несомненно, должно способствовать востребованности выпускников на рынке труда, и, в свою очередь, росту спроса абитуриентов на диплом этого университета. Качественные и количественные показатели как в целом рынка труда IT-сферы, так и его локальных частей в режиме реального времени представляют интерес также и для IT-компаний, которые выступают нанимателями. Востребованность определенных категорий IT-специалистов можно отслеживать по динамике заработной платы.

В статье приводится анализ рынка труда IT-сферы на основании данных, полученных в течение наблюдаемого периода, а именно с января по март 2021 г. Следует отметить, что на протяжении всего периода наблюдений рынок продемонстрировал уверенный рост.

## **Методология и инструменты статистического анализа**

Для работы с данными и проведения анализа необходимо их извлечь из

веб-ресурса. Весь этот процесс может проводиться вручную, но при большом объеме массивов данных эта задача становится невыполнимой и требует автоматизации.

Для сбора информации о вакансиях использовались данные, размещенные на площадке HeadHunter. Эта интернет-площадка является одним из самых крупных ресурсов по поиску работы и сотрудников в мире (по данным рейтинга Similarweb). По независимым оценкам, сайт имеет 49 млн резюме в базе, 793 тыс. вакансий, 1423 тыс. проверенных компаний посещают 18 млн посетителей ежемесячно, оставляя около 1 млрд откликов на вакансии [1].

Площадка HeadHunter предоставляет специальный программный интерфейс, который позволяет извлекать данные из соответствующей базы данных и интегрировать HeadHunter с приложениями, разрабатываемыми сторонними разработчиками, в частности разработчиками веб-парсеров. С помощью API HeadHunter можно получить доступ к базам компаний на Украине, в Беларуси, Азербайджане, Узбекистане, Казахстане, Грузии, Киргизии, что позволяет крупным компаниям расширять географию своего бизнеса, а соискателям рассматривать вакансии, не ограничиваясь своей текущей локализацией.

Основной целью анализа является получение ответа на следующие вопросы.

1. Какие из вакансий являются наиболее востребованными на рынках России, Беларуси, Украины?

2. Существует ли достоверное различие между востребованностью специалистов, имеющих различные компетенции в зависимости от локализации вакансии?

3. Какие языки наиболее популярны у работодателей и чем это объясняется?

В настоящее время статистическая обработка данных проводится с помощью соответствующих программных продуктов. Для анализа полученных

данных было использовано свободно распространяемое бесплатное программное обеспечение для анализа данных RStudio, а также языки анализа данных R и интерпретируемый язык Python. Оба языка содержат большое количество специализированных библиотек для проверки всевозможных статистических гипотез, а также наглядные средства визуализации полученных результатов [2].

Возможности языка Python использовались для извлечения данных с сайта HeadHunter и формирования датасета, который в работе анализировался с помощью библиотек и функций языка R.

В качестве полей полученного датасета выступали следующие характеристики вакансии.

1. Дата подачи заявки (published\_at), город (city).

2. Нижняя и верхняя границы предлагаемой заработной платы (salary.from и salary.to соответственно).

3. Валюта заработной платы (currency).

4. Язык программирования для указанной вакансии (language).

5. Требуемый опыт работы (experience).

6. Возможный режим работы (schedule).

7. Профессиональный уровень (grade), специализация (specialization).

В работе исследовались следующие области (профессии) IT-сферы: CRM-системы, web-инженер, аналитик, банковское ПО, игровое ПО, компьютерная безопасность, оптимизация сайта (SEO), передача данных и доступ в интернет, сетевые технологии, системная интеграция, системный администратор, системы управления предприятием (ERP), телекоммуникации, технический писатель, электронная коммерция.

Описание категориальных признаков осуществлялось с помощью таблиц сопряженности различной размерности. Проверка гипотезы о связи между категориальными признаками выполнялась



с помощью теста «Хи-квадрат», который позволяет оценить статистическую значимость различий двух или нескольких относительных показателей (частот, долей).

### Результаты анализа ключевых индикаторов рынка труда IT-специалистов

В результате применения описанной технологии сбора данных был составлен датасет, содержащий 10814 уникальных объявлений о вакансиях, статисти-

ческая обработка которого и позволила оценить рынок сферы информационных технологий. Анализ структуры предлагаемых вакансий с точки зрения географии представлен в табл. 1.

Наибольший интерес представляет сравнение востребованности специалистов в Российской Федерации, Республике Беларусь и на Украине как занимающих наибольшую долю рынка. Рассмотрим очищенные от выбросов данные по рассматриваемым регионам. На рис. 1 представлено распределение долей вакансий в общей выборке.

Табл. 1. Структура рынка вакансий IT-специалистов на HeadHunter.ru по географическому признаку в I квартале 2021 г.

Регион	Количество	Доля, %
Армения	3	0,03
Казахстан	112	1,04
Польша	2	0,02
Прибалтика	10	0,09
Республика Беларусь	696	6,44
Российская Федерация	9614	88,9
Украина	377	3,49

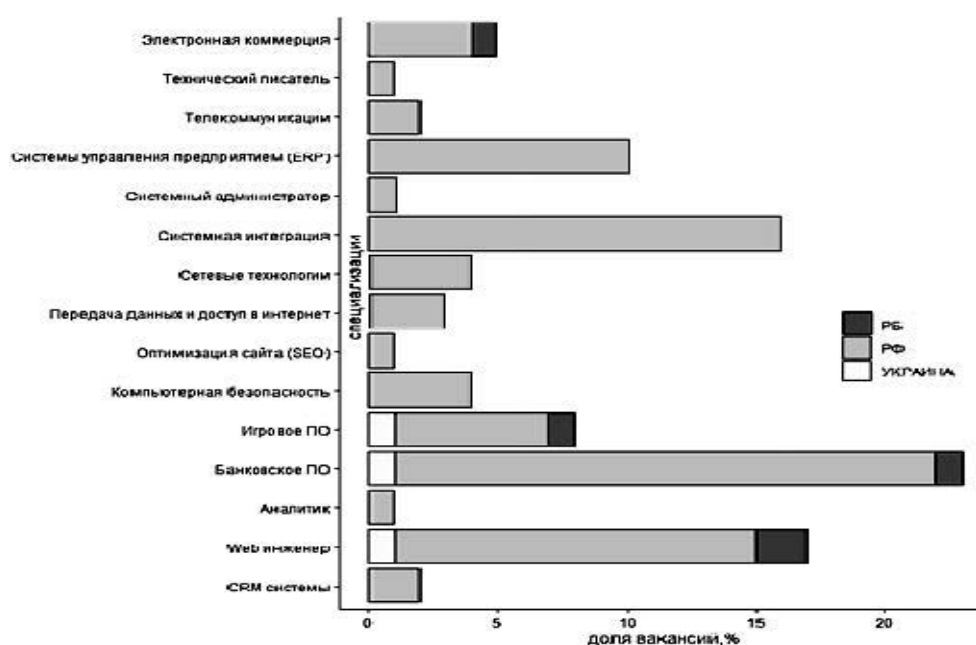


Рис. 1. Распределение доли вакансий по регионам

Несмотря на преобладание количества вакансий Российской Федерации, можно отметить, что в общем числе вакансий наиболее востребованы специалисты в области разработки банковского ПО, web-инженерии и системной интеграции.

Следующим этапом анализа явился отбор городов в выбранных регионах с наибольшим количеством вакансий. Так как наибольшую долю анализируемого рынка составляют вакансии

Российской Федерации, в дальнейшем исследовании учитывалась информация о размещаемых вакансиях в первых 10 по количеству опубликованных на HeadHunter вакансий городах России: Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Екатеринбурге, Казани, Нижнем Новгороде, Краснодаре, Воронеже, Ростове-на-Дону и Самаре. Количество опубликованных вакансий и их доля в общем числе вакансий Российской Федерации представлены в табл. 2.

Табл. 2. Структура рынка вакансий России по городам

Город РФ	Количество	Доля вакансий, %
Москва	3454	35,93
Санкт-Петербург	1494	15,54
Новосибирск	538	5,6
Екатеринбург	340	3,54
Казань	310	3,22
Нижний Новгород	296	3,08
Краснодар	248	2,58
Воронеж	247	2,57
Ростов-на-Дону	192	2
Самара	186	1,93

По количеству вакансий (а значит и оценочному спросу на рынке труда) можно сопоставлять между собой спрос в гг. Москве и Санкт-Петербурге, вакансии в Республике Беларусь с остальными городами Российской Федерации, а также с городами Украины. В табл. 3 рассмотрена структура рынка по специализациям и регионам.

Распределение вакансий по специализациям в отобранной выборке, состоящей из 8378 наблюдений, представлено на рис. 1 и в табл. 2; в Российской Федерации большой спрос на специалистов в областях банковского программного обеспечения, системной интеграции, систем управления предприятием и web-инженеров (19,1%). Доказано статистически значимое раз-

личие в долях на рынках разных стран на уровне значимости менее 5 %. На рынках Республики Беларусь и Украины, согласно вакансиям, большим спросом пользуются специалисты в области web-инженерии, в России – банковского ПО.

Востребованность разработки банковского ПО связана как с разработкой собственных приложений банков и общим ускорением процесса цифровизации в финансовой сфере, так и с возрастающей необходимостью в аналитике данных и необходимостью собственных легких и гибких систем. Особенно ярко данная тенденция проявляется в Российской Федерации: по результатам ежегодного исследования финансового журна-

ла Global Finance, русский банк Сбер назван лучшим розничным цифровым

банком мира в 2021 г.

Табл. 3. Структура рынка по специализациям и регионам

Специализация	Доля востребованности специализации, %		
	РБ	РФ	Украина
CRM-системы	3,57	2,66	3,64
Web-инженер	35,2	15,87	23,64
Аналитик	0,51	1,39	0,91
Банковское ПО	9,18	22,68	20,91
Игровое ПО	17,86	6,91	17,27
Компьютерная безопасность	7,65	4,52	14,54
Оптимизация сайта (SEO)	0,51	0,56	0
Передача данных и доступ в интернет	1,02	3,02	3,64
Сетевые технологии	2,55	4,78	0,91
Системная интеграция	6,12	17,26	7,27
Системный администратор	0,51	1,29	0
Системы управления предприятием (ERP)	3,57	10,92	1,82
Телекоммуникации	2,55	2,26	1,82
Технический писатель	0,51	1,23	0,91
Электронная коммерция	8,67	4,65	2,73
Итого	100	100	100

Большая доля вакансий в области игрового ПО на Украине и в Беларуси объясняется размещением в данных регионах офисов крупных компаний разработчиков игр, например, таких как Awem Games, Gismart и Wargaming.

Системная интеграция и системы управления предприятием занимают заметную часть российского рынка, в 2015 г. эти направления разработки показывали наибольший рост как направление, состоящее в разработке и внедрении комплексных решений по автоматизации технологических и бизнес-процессов предприятий и организаций с целью повышения эффективности управления этими процессами. На рост существенно повлияли внешние причины: вынужденное импортозамещение обусловило тенденцию к разработке

собственного оригинального программного обеспечения.

Несмотря на то, что вакансии в области электронной коммерции пока не занимают заметную долю, необходимо отметить, что это направление является растущим: в Беларуси e-commerce в 2020 г. показал рост на 40 % (до 2,3 млрд р. по данным площадки Deal.by), Российской Федерации – 58,5 % (по данным сайта interfax.ru) и на Украине – 41 % (по данным retailers.ua). Ускоренным ростом данная отрасль «обязана» пандемии, которая вынудила многих предпринимателей использовать удаленный формат работы: перейти на маркет-плейсы, создавать интернет-магазины и службы заказов. Такая тенденция к росту будет сохраняться в ближайшее время, хоть и

прогнозируется замедление скорости роста [4–6].

Предварительный анализ востре-

бованности языков программирования можно представить в виде облака слов (рис. 2).



Рис. 2. Облако слов для поля «Языки программирования»

Облако слов позволяет визуально оценить важность каждого ключевого слова, как правило, оно обозначается размером шрифта или цветом. Полученное облако слов для поля «Языки программирования» наглядно демонстрирует сложившуюся на момент сбора

данных востребованность языков программирования: знание языков Java и PHP требуется в большинстве вакансий. Также высокой востребованностью пользуются Python, JavaScript, C# и 1С. Рассмотрим подробнее структуру рынка по языкам программирования (табл. 4).

Табл. 4. Структура рынка по востребованным языкам программирования

Язык программирования	Доля востребованности языка программирования, %		
	РБ	РФ	Украина
1С	2,59	12,61	1,59
C#	4,45	10,64	9,02
C++	5,89	6,5	4,51
Go	2,59	1,78	1,59
Java	27,01	28,28	24,4
JavaScript	16,67	8,62	18,3
Kotlin	0,43	0,79	0,27
PHP	22,56	15,15	18,83
Python	9,77	10,01	16,71
Ruby	5,89	2,25	2,39
SQL	0,57	1,81	2,12
Swift	1,44	0,63	0,27
Битрикс	0,14	0,93	0
Итого	100	100	100

Рассматривая табл. 3 и 4, можно сделать вывод, что различия структуры рынка по специализациям подтверждаются различиями в структуре рынка по языкам программирования. Язык программирования Java является наиболее востребованным у работодателей всех рассматриваемых стран, следующим по востребованности выступает знание PHP. На следующей позиции на Украине и в Беларуси JavaScript, в России – 1С. Такое различие связано в первую очередь с тем, что фирма 1С является крупной российской компанией, зани-

мающейся разработкой, изданием и поддержкой компьютерных программ на языке 1С.

Далее в Беларуси и на Украине больше востребован Python, в России – С#. Небольшой процент (1 %...2 %) нанIMATEЛЕЙ указывают как главный навык владение языком работы с БД SQL, однако в виде дополнительного требования умение написать запрос к базе данных встречается в подавляющем большинстве вакансий. Наглядное представление структур по странам представлено на рис. 3.

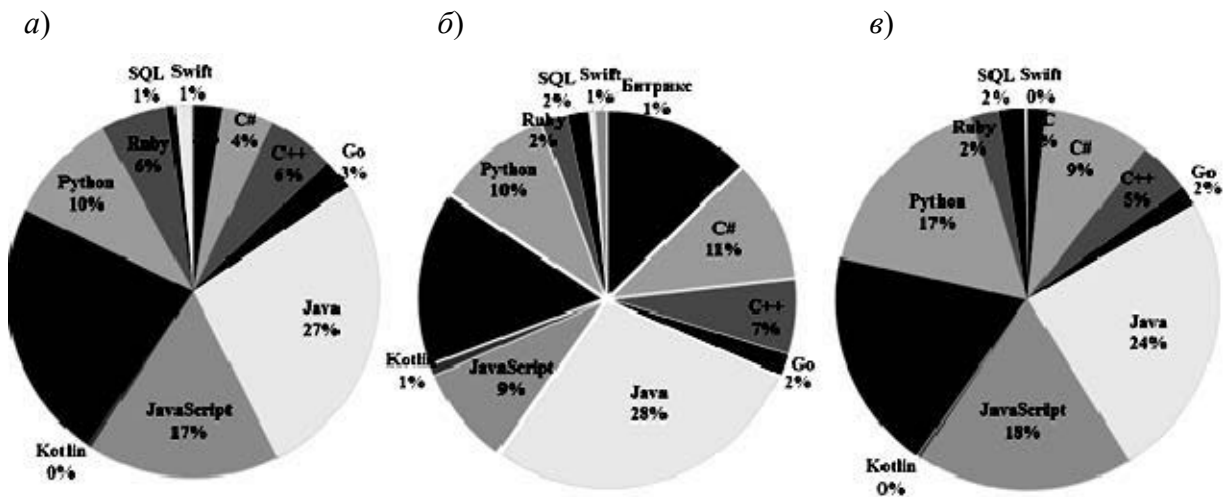


Рис. 3. Востребованность языков программирования по странам: а – Беларусь; б – Россия; в – Украина

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее востребованной в рассмотренных странах является вакансия web-инженера, занимающая 35,2 % рынка в Республике Беларусь, 15,87 % в Российской Федерации и 23,64 % на Украине от всех опубликованных вакансий. Наиболее востребован в вакансиях язык Java – это обусловлено его широкой применимостью в разработке, на нем разрабатывают как серверный софт, программы для персональных компьютеров, так и мобильные приложения. Основными востребованными инструментами данной

вакансии являются языки программирования JavaScript и PHP, занимающие значительную долю среди остальных языков программирования. Еще один востребованный язык на рынке труда – Python – язык программирования, используемый при создании web-приложений, в машинном обучении и Data Science.

Обобщая полученные результаты, можно отметить, что наибольшую востребованность имеют гибкие языки программирования, применяемые как инструмент для нескольких специализаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ливинская, В. А.** Статистический анализ рынка труда г. Москва по материалам сайта headhunter / В. А. Ливинская, Н. Ю. Шекунов // Статистический анализ социально-экономического развития субъектов Российской Федерации: сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск, 2021. – С. 262–265.
2. **R Core Team (2020).** R: язык и среда для статистических вычислений [Электронный ресурс] / R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия. – Режим доступа: <https://www.R-project.org/>. – Дата доступа: 01.01.2022.
3. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
4. **Ливинская, В. А.** Проблема преемственности дисциплин в IT-образовании / В. А. Ливинская // Преподавание математики в высшей школе и работа с одаренными студентами в современных условиях: материалы Междунар. науч.-практ. семинара. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 67–68.
5. **Ливинская, В. А.** Исследование актуальных потребностей рынка средствами современных методов анализа данных / В. А. Ливинская, Е. И. Гайчуков // Наука и образование: актуальные проблемы естествознания и экономики. – 2021. – С. 234–237.
6. **Ливинская, В. А.** О прикладной направленности в изучении статистических методов в университете / В. А. Ливинская // Преподавание математики в высшей школе и работа с одаренными студентами в современных условиях: материалы Междунар. науч.-практ. семинара. – Могилев^ Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 67–70.
7. **Земнухова, Л. В.** IT-работники на рынке труда / Л. В. Земнухова // Социология науки и технологий. – 2013. – Т. 4, № 2. – С. 77–90.

*Статья сдана в редакцию 18 апреля 2022 года*

**Виктория Александровна Ливинская**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: viktorijalivinskaya@gmail.com.

**Мария Александровна Шалухова**, магистрант, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: shaluhova.m@gmail.com.

**Viktoriya Aleksandrovna Livinskaya**, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: viktorijalivinskaya@gmail.com.

**Maria Aleksandrovna Shaluchova**, MSc student, Belarusian-Russian University.  
E-mail: shaluhova.m@gmail.com.

# **ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**№ 2(75) 2022**

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. 332, 212022, г. Могилев. Телефон: 71-30-54, e-mail: bru@bru.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 26.05.2022. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,97. Уч.-изд. л. 6,12. Тираж 100 экз. Заказ 2275.

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.