



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 621.331:625.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257

EDN: <https://elibrary.ru/emrxle>



## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Н. П. Григорьев<sup>1</sup>, И. В. Игнатенко<sup>1</sup>, С. А. Власенко<sup>1</sup>,  
В. А. Ковалев<sup>1</sup>✉, В. В. Шаталов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),  
Хабаровск, Российская Федерация  
<sup>2</sup>Трансэлектропроект,  
Москва, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Цель исследования — разработка мероприятий, определенных стратегическими программами развития железнодорожного транспорта России на основе анализа схем питания тяговой сети Дальневосточной железной дороги — филиала ОАО «РЖД».

**Материалы и методы.** Оценка работоспособности системы тягового электроснабжения получена на основе анализа реальных показателей функционирования участка Дальневосточной железной дороги, положений теорий электротехники и электроснабжения системы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ.

**Результаты.** На основе анализа совместной работы систем внешнего и тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги были определены четыре тяговые подстанции с низкими технико-экономическими показателями. Участки сети, которые питают подстанции, являются узким местом в системе тягового электроснабжения. Повышение работоспособности предложено выполнить переходом присоединения обмоток трансформаторов тяговых подстанций к системам внешнего и тягового электроснабжения по типовой схеме «звезда — треугольник». Такое присоединение обеспечит повышение скорости движения поездов, снижение интервалов попутного следования поездов и потерь электрической энергии, повышение качества электрической энергии в системе внешнего электроснабжения и электрических сетях Дальневосточной дирекции по энергообеспечению (структурное подразделение Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД»).

**Обсуждение и заключение.** Нормализация подключения четырех тяговых подстанций по схеме «подпитывающих» обеспечивается изменением фазировки таким образом, что питание двух плеч одной обмотки силового трансформатора переводится на две обмотки. Выравнивание модулей токов в обмотках трансформаторов тяговых подстанций позволяет снизить падение напряжения в наиболее нагруженной фазе и, соответственно, повысить напряжение в тяговой сети, что обеспечивает повышение скорости движения поездов и снижение интервалов попутного следования. Перевод питания плеч с одной обмотки трансформатора на две снижает потери электрической энергии в силовых трансформаторах и системе внешнего электроснабжения. Снижение несимметрии токов в обмотках силового трансформатора повышает качество электрической энергии в системе внешнего и районного электроснабжения. Повышение срока службы силового трансформатора обеспечивается снижением интенсивности термического износа изоляции наиболее нагруженной обмотки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железная дорога, система внешнего электроснабжения, система тягового электроснабжения, тяговые подстанции, потери электроэнергии, несимметрия напряжения, входные сопротивления, нормальные схемы питания тяговых нагрузок

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

**Для цитирования:** Григорьев Н. П., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Ковалев В. А., Шаталов В. В. Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 248–257. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257>.

© Григорьев Н. П., Игнатенко И. В., Власенко С. А.,  
Ковалев В. А., Шаталов В. В., 2022

✉ [kovalev.v.a.2011@mail.ru](mailto:kovalev.v.a.2011@mail.ru) (В. А. Ковалев)



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.331:625.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257

EDN: <https://elibrary.ru/emrxle>



## INCREASING THE PERFORMANCE OF THE FAR EASTERN RAILWAY TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Nikolay P. Grigor'ev<sup>1</sup>, Ivan V. Ignatenko<sup>1</sup>, Sergey A. Vlasenko<sup>1</sup>,  
Vladimir A. Kovalev<sup>1</sup>✉, Vladimir V. Shatalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University,  
Khabarovsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Transelektroproyekt,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of the study is to develop measures determined by the strategic programmes for the development of Russian railway transport based on the analysis of power supply schemes for the traction network of the Far Eastern Railway, a branch of Russian Railways.

**Materials and methods.** Evaluation of the performance of the traction power supply system was made based on the analysis of the actual performance of the Far Eastern Railway section, as well as the theories of electrical engineering and power supply of the 25 kV AC electrified railway system.

**Results.** Based on the analysis of the joint operation of the external and traction power supply systems of the Far Eastern Railway, four traction substations with low technical and economic indicators were identified. Network sections that feed the substations are a bottleneck in the traction power supply system. It is proposed to increase the efficiency by switching the connection of the windings of transformers of traction substations to the systems of external and traction power supply according to the typical star – delta scheme. Such a connection will ensure an increase in the speed of trains, a reduction in train succession time and losses of electricity, an increase in the quality of electric energy in the external power supply system and electric networks of the Far Eastern Directorate for Energy Supply (a structural subdivision of Transenergo, a branch of Russian Railways).

**Discussion and conclusion.** Normalisation of the connection of four traction substations according to the feeding scheme is ensured by changing the phasing in such a way that the power supply of the two legs of one winding of the power transformer is transferred to two windings. Alignment of the current modules in the windings of transformers of traction substations makes it possible to reduce the voltage drop in the most loaded phase and, accordingly, increase the voltage in the traction network, which ensures an increase in the speed of trains and a reduction in passing intervals. Switching the power supply of the arms from one winding of the transformer to two reduces the loss of electrical energy in power transformers and the external power supply system. Reducing the current unbalance in the windings of the power transformer improves the quality of electrical energy in the system of external and district power supply. An increase in the service life of the power transformer is ensured by a decrease in the intensity of thermal wear of the insulation of the most loaded winding.

**KEYWORDS:** railway, external power supply system, traction power supply system, traction substations, power losses, voltage unbalance, input resistances, normal power supply circuits for traction loads

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

**For citation:** Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Kovalev V. A., Shatalov V. V. Increasing the performance of the Far Eastern Railway traction power supply system. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):248-257. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257>.

✉ [kovalev.a.2011@mail.ru](mailto:kovalev.a.2011@mail.ru) (V. A. Kovalev)

© Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A.,  
Kovalev V. A., Shatalov V. V., 2022

**Введение.** Дальневосточная железная дорога (ДВЖД) расположена в границах Дальневосточного федерального округа. Основной объем перевозок грузов и пассажиров на ДВЖД выполняется электроподвижным составом (ЭПС). Стратегические программы развития железнодорожного транспорта Российской Федерации [1–4] предусматривают:

1. Разработку и внедрение технических средств и технологий организации высокоскоростного и скоростного пассажирского движения, тяжеловесного движения в грузовом сообщении при обеспечении оптимального взаимодействия подвижного состава и элементов инфраструктуры.

2. Увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т к 2024 г. за счет повышения скорости движения, весовых норм составов, а также сокращения межпоездных интервалов.

3. Полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, а также и снижение его энергоемкости.

4. Продление срока эксплуатации дорогостоящего оборудования.

Система тягового электроснабжения (СТЭ) ДВЖД получает электрическую энергию (ЭЭ) по схеме однофазного переменного тока напряжением 25 кВ от системы внешнего электроснабжения (СВЭ). СТЭ ДВЖД обеспечивает обращение тяжеловесных поездов массой более 10 тыс. т. В последние два года за счет внедрения новых технологий регулирования движения проходят опытные испытания пропуска поездов массой 13,4 тыс. т. Переработка ЭЭ выполняется на 31 тяговой подстанции (ТП), подключенных к линиям электропередачи (ЛЭП) СВЭ классов напряжения 110 или 220 кВ.

**Нормализация схем питания тяговых нагрузок.** Повышение объема грузоперевозок в работе [5] предложено выполнить переходом от реактивного регулирования напряжения в тяговой сети к интервальному встречному в СТЭ. Повышение энергоэффективности электроснабжения ЭПС при интервальном встречном регулировании выполняется выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок на прогнозные интервалы расчетного периода. Кафедрой «Системы электроснабжения» ДВГУПС в целях повышения работоспособности СТЭ разработаны нормальные схемы питания тяговых нагрузок, которые являются перспективными, определяются на основе цифровых технологий на интервалы расчетного периода, выбираются по прогнозным показателям функционирования СВЭ и СТЭ и соответствуют следующим формам в интервалах:

1. Первая форма гарантирует напряжение в тяговой сети для выполнения графика движения поездов.

2. Вторая форма обеспечивает соответствие первой форме нормальной схемы питания тяговых нагрузок и минимизирует потери ЭЭ в СТЭ и СВЭ.

3. Третья форма обеспечивает соответствие первой и второй формам нормальных схем питания тяговых нагрузок и рациональное применение ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения.

Нормальные схемы питания тяговых нагрузок выполняются на прогнозные интервалы времени расчетного периода выбором следующих параметров СТЭ:

1. Ступени устройства регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов ТП.

2. Количества силовых трансформаторов ТП в работе.

3. Ступеней устройств продольной и поперечной емкостной компенсации.

4. Схемы питания тяговой сети и др.

Нормализация схемы питания тяговых нагрузок предусматривает приведение в соответствие схем коммутации таким образом, чтобы технико-экономические показатели функционирования СТЭ в прогнозных интервалах времени соответствовали критерию «норма».

**Анализ схем присоединения ТП.** На рис. 1 представлена схема подключения тяговых подстанций ТП 15–ТП 22 участка СТЭ к ЛЭП СВЭ и тяговой контактной сети. В настоящее время СТЭ ДВЖД содержит подстанции ТП 16, ТП 18, ТП 21 и ТП\*, подключенные к тяговой сети по схеме «подпитывающих», которая не соответствует типовым схемам, эксплуатируемым на железных дорогах, электрифицированных по системе однофазного переменного тока напряжением 25 кВ [6, 7]. Подстанция ТП\* находится на стадии ввода в эксплуатацию.

Более двух десятилетий назад электрификация участка была выполнена с расстояниями повышенной длины между подстанциями. В целях повышения напряжения в тяговой сети принято решение о строительстве дополнительных ТП, подключенных к тяговой сети по схеме «подпитывающих». Такой подход исключил необходимость применения нейтральных вставок в сечениях контактной сети подключения «подпитывающих» подстанций и изменения фазировки ранее построенных подстанций. Длины межподстанционных зон (МПЗ) участка СТЭ ДВЖД ТП 15–ТП 22 при наличии и отсутствии «подпитывающих» подстанций приведены в табл. 1.

При отсутствии «подпитывающих» подстанций протяженность МПЗ рассматриваемого участка составляла от 76 до 95,7 км и ограничивала пропускную способность ДВЖД вследствие высоких потерь напряжения в контактной сети. Задача снижения протяженности МПЗ решена строительством дополнительных,

не типовых ТП. В 2001 г. введена в эксплуатацию подстанция ТП 21, в 2002 г. выполнен ввод в эксплуатацию ТП 18, в 2003 г. – ТП 16.

**Показатели участка СТЭ ДВЖД.** Подстанции участка ТП 15 – ТП 22 подключены к ЛЭП СВЭ классов напряжения 110 или 220 кВ. Значения модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения ТП 15 – ТП 22 к ЛЭП СВЭ, приведенные к тяговому напряжению, представлены в табл. 2.

Значения входных сопротивлений определены матричным методом [8] с учетом действительных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД. Входные и взаимные сопротивления узлов подключения ТП 15 – ТП 22 к СВЭ существенно различаются, оказывают влияние на модули и аргументы напряжения на вводах ТП и создают значительные потери ЭЭ от уравнильных токов [9].

**Анализ работоспособности силовых трансформаторов.** Под работоспособностью понимается значение всех параметров, характеризующих готовность выполнять заданные функции, а также соответствие требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

Рассмотрим показатели работы одной из ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», на примере ТП 21. На подстанции установлен силовой трансформатор, предназначенный для питания однофазных тяговых нагрузок (тяговый трансформатор), типа ТДТНЖУ-40000/110-У1.

Обмотка высшего напряжения (ВН) *АХ* тягового трансформатора подключена к фазе *В*, обмотка *ВУ* – к фазе *А*, обмотка *СЗ* – к фазе *С* ЛЭП СВЭ. Обмотка тягового напряжения *ах* подключена началом (ввод *а*) к контактной сети. Конец обмотки *ах* подключен к рельсу. Таким образом, напряжение  $\dot{U}_B$  питает левое и правое плечо ТП 21. Токи обмоток ВН *АХ*, *ВУ* и *СЗ* существующей схемы подключения ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, определяются по формулам

$$\dot{I}_{AX21} = \frac{2}{3} I_{Л21} e^{i(240-\varphi_{Л21})} + \frac{2}{3} I_{П21} e^{i(240-\varphi_{П21})}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{BY21} = \dot{I}_{CZ21} = -\frac{1}{3} I_{Л21} e^{i(240-\varphi_{Л21})} - \frac{1}{3} I_{П21} e^{i(240-\varphi_{П21})}, \quad (2)$$

где  $I_{Л21}$ ,  $I_{П21}$  – модули токов левого и правого плеча ТП 21, А;  $\varphi_{Л21}$ ,  $\varphi_{П21}$  – аргументы токов левого и правого плеча ТП 21, град. эл.

Значения модулей и аргументов токов плеч зависят от режима ведения и количества ЭПС в пределах МПЗ. Примем характерные для перспективного движения ЭПС токи левого и правого плеча ТП21  $\dot{I}_{Л21} = \dot{I}_{П21} = 500e^{i(-32)}$  А. Токи обмоток ВН ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, составляют

Таблица 1

Протяженность МПЗ участка СТЭ ДВЖД ТП 15 – ТП 22

Table 1

The length of the inter-substation zones of the traction power supply system section of the Far Eastern Railway traction substation 15 – traction substation 22

Протяженность МПЗ без «подпитывающих» подстанций		Протяженность МПЗ с «подпитывающими» подстанциями	
МПЗ	Протяженность, км	МПЗ	Протяженность, км
ТП 15–ТП 17	89,4	ТП 15–ТП 16	52,8
		ТП 16–ТП 17	36,6
ТП 17–ТП 19	76	ТП 17–ТП 18	27,6
		ТП 18–ТП 19	48,4
ТП 19–ТП 20	95,7	ТП 19–ТП*	50,5
		ТП*–ТП 20	45,2
ТП 20–ТП 22	76,6	ТП 20–ТП 21	30,1
		ТП 21–ТП 22	46,5

Таблица 2

Входные сопротивления узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ

Table 2

Input impedances of the traction substation connection points to power lines of the external power supply system

Номер подстанции	Модуль, Ом	Аргумент, град. эл.
ТП 15	0,65	79,9
ТП 16	0,51	62
ТП 17	0,56	76,2
ТП 18	3,1	83,2
ТП 19	0,56	71,5
ТП *	1,2	75,9
ТП 20	1,3	76,8
ТП 21	2,35	80
ТП 22	4,2	70

$$\dot{I}_{AX21} = 667e^{i(-152)} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BY21} = \dot{I}_{CZ21} = 334e^{i28} \text{ А}.$$

Модуль тока обмотки *АХ* тягового трансформатора в 2 раза превышает модуль тока обмоток *ВУ* и *СЗ*, что обуславливает ее повышенный нагрев и увеличивает интенсивность термического износа изоляции [10]. В работе [11] доказано, что потери в меди тягового трансформатора при подключении ТП по схеме «подпитывающей» на 50 % выше, чем при типовой схеме.

Значение коэффициента несимметрии токов обмоток тягового трансформатора ТП 21 ( $\alpha_I$ ) высокое и

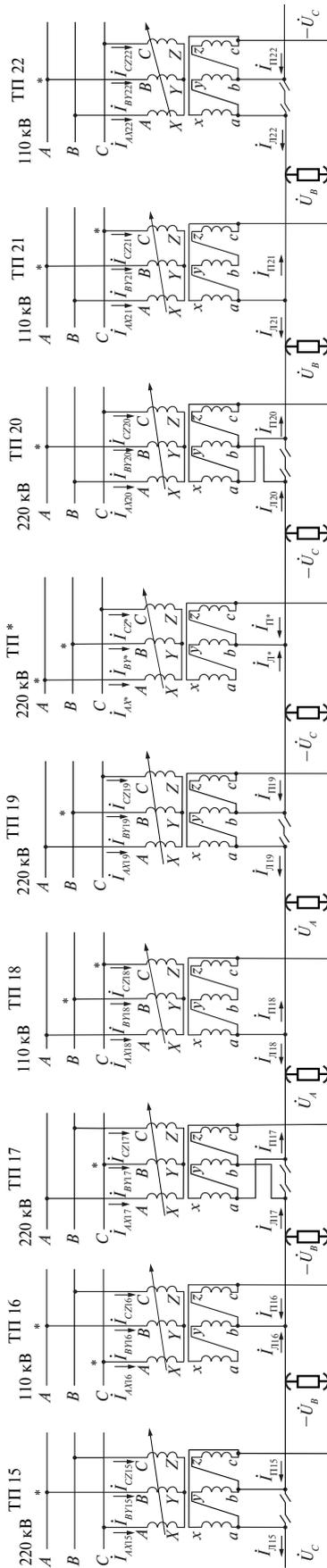


Рис. 1. Существующая схема фазировки участка СТЭ ДВЖД ТП 15 – ТП 22

Fig. 1. The existing phasing scheme for a section of the Far Eastern Railway traction power supply system traction substation 15 – traction substation 22

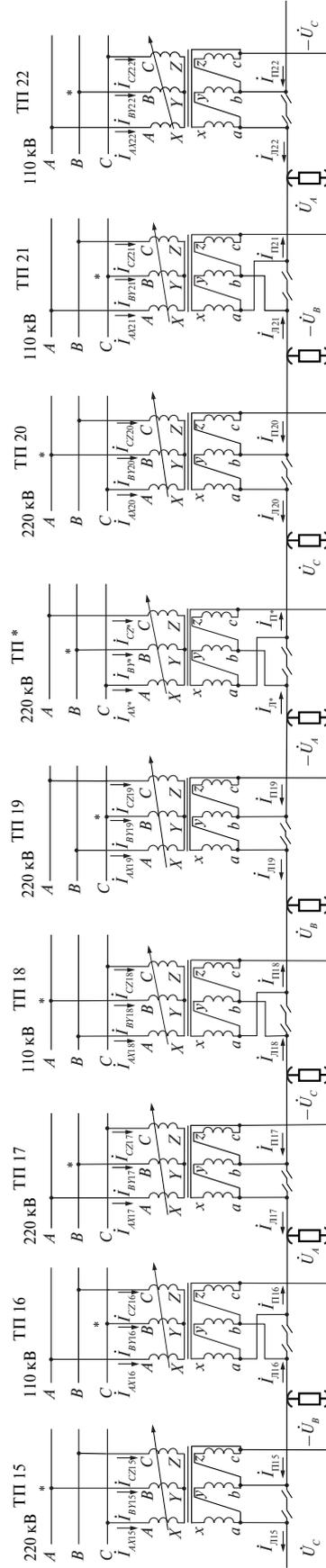


Рис. 2. Предлагаемая схема фазировки участка СТЭ ДВЖД ТП 15 – ТП 22

Fig. 2. The proposed phasing scheme for a section of the Far Eastern Railway traction power supply system traction substation 15 – traction substation 22

составляет 1 [12, 13]. Таким образом, принятая схема подключения ТП 21 приводит к высокой несимметрии токов обмоток трансформатора и фаз ЛЭП СВЭ от токов плеч. Несимметричная нагрузка фаз ЛЭП СВЭ от тяговых нагрузок повышает несимметрию напряжений [14] и снижает показатели качества ЭЭ [15] в СВЭ.

**Несимметрия напряжений от тяговых нагрузок в СВЭ.** Высокосимметричные токи обмоток «подпитывающих» подстанций создают несимметричные падения напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ. Несимметричные падения напряжения повышают несимметрию напряжений в узлах СВЭ и у потребителей, подключенных к обмоткам районного напряжения тяговых трансформаторов.

Определим падения напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения обмоток ВН трансформатора ТП 21 к фазам ЛЭП СВЭ. Ток  $\dot{I}_{AX21}$  создает падение напряжения на входном сопротивлении узла подключения обмотки  $AX$  к фазе  $B$  ( $\Delta\dot{U}_{B21}$ ), ток  $\dot{I}_{BY21}$  — обмотки  $BY$  к фазе  $A$  ( $\Delta\dot{U}_{A21}$ ), ток  $\dot{I}_{CZ21}$  — обмотки  $CZ$  к фазе  $C$  ( $\Delta\dot{U}_{C21}$ ) ЛЭП СВЭ. Значения падений напряжения определим по формулам

$$\Delta\dot{U}_{A21} = \dot{I}_{BY21} Z_{\text{вх}(21)}; \quad (3)$$

$$\Delta\dot{U}_{B21} = \dot{I}_{AX21} Z_{\text{вх}(21)}; \quad (4)$$

$$\Delta\dot{U}_{C21} = \dot{I}_{CZ21} Z_{\text{вх}(21)}. \quad (5)$$

где  $Z_{\text{вх}(21)}$  — комплексное входное сопротивление ТП 21, Ом.

Оценку несимметрии падения напряжения выполним относительным коэффициентом несимметрии падения напряжения  $K_2$ , %, по формуле

$$K_2 = \frac{\Delta U_{(A)2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $U_{\text{ном}}$  — модуль номинального напряжения ЛЭП СВЭ, приведенный к тяговому напряжению, В;  $\Delta U_{(A)2} = |\Delta\dot{U}_{(A)2}|$  — модуль комплексного падения напряжения обратной последовательности на входном сопротивлении узла подключения ТП 21 к фазе  $A$  ЛЭП СВЭ, В.

Падение напряжения обратной последовательности в узле подключения ТП 21 к фазе  $A$  ЛЭП СВЭ определим по формуле

$$\Delta\dot{U}_{(A)2} = \frac{1}{3} (\Delta\dot{U}_{A21} + a^2 \Delta\dot{U}_{B21} + a \Delta\dot{U}_{C21}), \quad (7)$$

где  $a = e^{j120}$  — оператор поворота.

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции к тяговой сети и ЛЭП СВЭ по существующей схеме представлены в табл. 3.

Модуль падения напряжения  $\Delta\dot{U}_{B21}$  в 2 раза превышает модули  $\Delta\dot{U}_{A21}$  и  $\Delta\dot{U}_{C21}$ . Высокосимметричные токи обмоток создают высокую несимметрию напряжения в узлах подключения ТП к ЛЭП СВЭ, а также на шинах районного напряжения подстанции, что приводит к повышению потерь мощности в меди и стали тяговых трансформаторов относительно нормативных показателей.

Работоспособность ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», является узким местом в СТЭ ДВЖД. В условиях тяжеловесного движения вследствие увеличения токов ЭПС существенно возрастают потери напряжения на входных сопротивлениях и сопротивлениях обмоток, питающих левое и правое плечо ТП 16, ТП 18, ТП 21, что приводит к снижению напряжения в тяговой сети. В этой связи применение «подпитывающей» схемы подключения ТП не обеспечивает нормируемого напряжения на токоприемниках ЭПС. Это обстоятельство ограничивает повышение весовых норм поездов и снижение интервалов попутного следования. Для ТП, подключенных к тяговой сети по схеме «подпитывающих», характерны повышенные потери мощности в обмотках тяговых трансформаторов и напряжения на входных сопротивлениях ТП, что ухудшает показатели работы и снижает работоспособность СТЭ ДВЖД.

#### Нормализация схем подключения ТП к тяговой сети.

В целях повышения эффективности работы СТЭ и качества взаимодействия СТЭ ДВЖД с СВЭ необходимо выполнить нормализацию схем питания тяговых нагрузок переходом к типовым [6, 7] схемам подключения ТП участка СТЭ ДВЖД ТП 15 — ТП 22 к тяговой сети и СВЭ. Один из вариантов подключения представлен на рис. 2. Предлагаемая схема фазировки участка обеспечивает чередование недогруженной фазы подстанций ТП 15 — ТП 22.

При типовой схеме подключения ТП 21 обмотка ВН  $AX$  тягового трансформатора ТП 21 подключена к фазе  $A$ , обмотка  $BY$  — к фазе  $C$ , обмотка  $CZ$  — к фазе  $B$  ЛЭП СВЭ. Тяговая обмотка  $ax$  питает правое плечо, обмотка  $cz$  — левое плечо ТП 21.

При типовой схеме подключения токи левого  $\dot{I}_л$  и правого  $\dot{I}_п$  плеча распределяются в обмотках тяговых трансформаторов в соотношении 2/3 и -1/3 [7], при этом 2/3 относится к обмотке, напряжение которой совпадает с напряжением плеча. Токи обмоток ВН тягового трансформатора ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, определяются по формулам

$$\dot{I}_{AX21} = -\frac{1}{3} I_{л21} e^{i(240-\varphi_{л21})} + \frac{2}{3} I_{п21} e^{i(-\varphi_{п21})}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_{BY21} = -\frac{1}{3} I_{л21} e^{i(240-\varphi_{л21})} - \frac{1}{3} I_{п21} e^{i(-\varphi_{п21})}; \quad (9)$$

$$\dot{I}_{CZ21} = \frac{2}{3} I_{л21} e^{i(240-\varphi_{л21})} - \frac{1}{3} I_{п21} e^{i(-\varphi_{п21})}. \quad (10)$$

Таблица 3

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции по существующей схеме

Table 3

The results of calculating the asymmetry of voltage drops at the input resistances of traction substation 21 when connecting a substation according to the existing scheme

Показатель	Модуль, В	Аргумент, град. эл.
$\Delta \dot{U}_{A21}$	783	108
$\Delta \dot{U}_{B21}$	1567	-72
$\Delta \dot{U}_{C21}$	783	108
$\Delta \dot{U}_{(A)2}$	783	168
$K_2, \%$	2,85	

Таблица 4

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции по типовой схеме

Table 4

The results of calculating the asymmetry of voltage drops at the input resistances of traction substation 21 when connecting a substation according to a typical scheme

Показатель	Модуль, В	Аргумент, град. эл.
$\Delta \dot{U}_{A21}$	1036	67
$\Delta \dot{U}_{B21}$	1036	-91
$\Delta \dot{U}_{C21}$	392	168
$\Delta \dot{U}_{(A)2}$	392	108
$K_2, \%$	1,42	

Таблица 5

Экономическая оценка снижения годовых дополнительных потерь ЭЭ от уравнивающих токов при переходе к типовой схеме подключения ТП 21

Table 5

Economic evaluation of the reduction of annual additional losses of electricity from circulating currents during the transition to a typical connection diagram of traction substation 21

МПЗ	$\Delta P, \text{кВт}$	$\Delta W_{\text{д}}, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	$\Delta C_{\text{эк}}, \text{млн руб.}$
ТП 20–ТП 21	62	543 120	1,4
ТП 21–ТП 22	96	840 960	2,2
Общее	158	1 384 080	3,6

Токи обмоток ВН при  $i_{L21} = i_{П21} = 500e^{i(-32)} \text{ А}$  составляют

$$i_{AX21} = 441e^{i(-13)} \text{ А};$$

$$i_{BY21} = 167e^{i88} \text{ А};$$

$$i_{CZ21} = 441e^{i(-171)} \text{ А}.$$

Переход к типовым схемам подключения подстанций для рассмотренного примера обеспечивает понижение несимметрии токов обмоток в 2 раза, сокращение потерь в меди обмоток тягового трансформатора ТП 21 на 60 %, а также уменьшение температуры наиболее нагруженной тяговой обмотки на 32 %, что снижает интенсивность износа изоляции трансформатора.

В соответствии со схемой подключения ТП 21 ток  $i_{AX21}$  создает падение напряжения на входном сопротивлении узла подключения обмотки AX к фазе A, ток  $i_{BY21}$  — обмотки BY к фазе C, ток  $i_{CZ21}$  — обмотки CZ к фазе B ЛЭП СВЭ. Значения падений напряжения определим по формулам

$$\Delta \dot{U}_{A21} = i_{AX21} Z_{\text{вх}(21)}; \quad (11)$$

$$\Delta \dot{U}_{B21} = i_{CZ21} Z_{\text{вх}(21)}; \quad (12)$$

$$\Delta \dot{U}_{C21} = i_{BY21} Z_{\text{вх}(21)}. \quad (13)$$

Падение напряжения обратной последовательно-сти на входных сопротивлениях ТП 21 определим по формуле (7). Результаты расчета несимметрии падений напряжения представлены в табл. 4.

Модули падений напряжения на входных сопротивлениях обмоток тягового трансформатора ТП 21, питающих левое и правое плечо, при типовой схеме в 1,5 раза меньше, чем при существующей схеме, что способствует повышению напряжения на тяговых шинах и увеличению пропускной способности участка. Значение коэффициента  $K_2$  при типовой схеме подключения в 2 раза меньше, чем при существующей. Уменьшение несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ повышает показатели совместной работы СВЭ и СТЭ ДВЖД.

**Мероприятия повышения работоспособности СВЭ и СТЭ.** Нормализация схем подключения ТП, подключенных к тяговой сети и ЛЭП СВЭ по схеме «подпитывающих», предусматривает изменение фазировки тяговой сети таким образом, что обмотка тягового трансформатора питает одно плечо. Подключение подстанций участка СТЭ ДВЖД по типовым схемам предусматривает установку четырех нейтральных вставок контактной сети в соответствии с требованиями [6]. Переход к типовым схемам подключения ТП

выполняется с изменением подключения обмоток районного напряжения тяговых трансформаторов к сетям районных потребителей.

**Технико-экономическое обоснование перехода к типовым схемам подключения подстанций.** Переход к типовым схемам подключения ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», снижает негативное влияние на качество ЭЭ в системах внешнего и районного электроснабжения. При этом экономический эффект обеспечивается существенным снижением потерь ЭЭ, интенсивности термического износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов и ограничения уравнильных токов в тяговой сети организацией подачи напряжения на плечи питания тяговой подстанции от двух обмоток трансформатора.

ТП, подключенные к тяговой сети по схеме «подпитывающих», соединены с ЛЭП классов напряжения 110 и 220 кВ. Питание левого и правого плеча одной обмоткой приводит к существенной потере напряжения таким образом, что напряжения на тяговых шинах смежных ТП, питающих одну МПЗ, существенно разнятся по поперечной составляющей и создают уравнильные токи. Уравнильные токи, в свою очередь, перегружают тяговые трансформаторы и приводят к дополнительным потерям мощности ( $\Delta P$ ) и ЭЭ ( $\Delta W_d$ ) в тяговой сети. При переходе к типовым схемам питания плеч двумя обмотками уравнильные токи снижаются.

Оценка снижения годового экономического ущерба  $\Delta C_{\text{эк}}$  от дополнительных потерь ЭЭ, обусловленного снижением уравнильных токов в тяговой сети при типовой схеме подключения ТП 21 относительно существующей схемы, приведена в табл. 5.

При тарифе на ЭЭ для тяги 2,61 руб./кВт·ч снижение эффективного уравнильного тока на 150 А переходом ТП 21 от существующей схемы подключения к типовой схеме обеспечит уменьшение годовых дополнительных потерь ЭЭ на расчетную подстанцию на  $\Delta W_d = 1,4$  ГВт·ч, что соответствует снижению экономического ущерба на  $\Delta C_{\text{эк}} = 3,6$  млн руб.

**Заключение.** По результатам проведенного в статье анализа взаимодействия СТЭ и СВЭ определены четыре подстанции ДВЖД, функционирующие с низкими технико-экономическими показателями.

Разработаны схемы подключения ТП участка ДВЖД к тяговой сети и ЛЭП СВЭ, которые обеспечивают выполнение графика движения поездов в условиях тяжеловесного движения.

Нормализация схем подключения подстанций обеспечивает снижение потерь напряжения на входных сопротивлениях, что способствует повышению напряжения на тяговых шинах и позволяет повысить пропускную способность СТЭ ДВЖД.

Кроме того, обеспечивается уменьшение потерь мощности в меди тяговых трансформаторов для

расчетного примера на 60 %, понижение температуры нагрева наиболее нагруженной тяговой обмотки на 32 %, снижение несимметрии напряжений в СВЭ и уменьшение дополнительных потерь ЭЭ от уравнильных токов, что повышает работоспособность СТЭ ДВЖД.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 25.06.2022).
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (Белая книга) [Электронный ресурс] / ОАО «РЖД». М., 2015. 68 с. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf) (дата обращения: 25.06.2022).
3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 25.06.2022).
4. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 г. № 2718р. URL: [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (дата обращения: 25.06.2022).
5. Vlasevsky S.V., Grigoriev N.P., Trofimovich P.N. Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90, no. 7. P. 522–525.
6. Тяговое электроснабжение железной дороги: свод правил: СП 224.1326000.2014: дата введения 2014-12-01 / Министерство транспорта Российской Федерации, ОАО «ВНИИЖТ». М.: Изд-во ВНИИЖТ, 2014. 86 с.
7. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
8. Веников В. А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учеб. для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981. 288 с.
9. Повышение эффективности сопряжения систем тягового и внешнего электроснабжения / В. Т. Черемисин [и др.] // Наука и транспорт. 2006. № 5. С. 18–21.
10. Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов / Н. П. Григорьев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4 (49). С. 26–29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29).
11. Повышение эффективности работы тяговой подстанции переменного тока / Н. П. Григорьев [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 5. С. 13–16.
12. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965. 235 с.
13. Повышение эффективности работы систем внешнего и тягового электроснабжения / Н. П. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 4–5. С. 72–78.
14. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

15. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

## REFERENCES

1. Long-term development program of the Russian Railways Company until 2025. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAg2RXSVoKu.pdf> (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

2. Strategy for scientific and technical development of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and up to 2025 (White Book). Moscow; 2015. 68 p. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf) (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

3. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

4. Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030. Approved by the order of Russian Railways Company dated December 15, 2011 No. 2718r. URL: [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

5. Vlasevsky S. V., Grigoriev N. P., Trofimovich P. N. Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System. *Russian Electrical Engineering*. 2019;90(7):522-525.

6. Traction power supply of the railway: set of rules: SP 224.1326000.2014: introduction date 2014-12-01. Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow: VNIIZhT Publ.; 2014. 86 p. (In Russ.).

7. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. 4th ed. Moscow: Transport Publ.; 1982. 528 p. (In Russ.).

8. Venikov V. A. Elektricheskie sistemy. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki [Electric systems. Mathematical tasks of the electric power industry]. 2nd ed. Moscow: Vishaya Shkola Publ.; 1981. 288 p. (In Russ.).

9. Cheremisin V. T., Kondrat'ev Yu. V., Kvashchuk V. A., Koshanov A. L. Povysheniye effektivnosti sopryazheniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya [Increasing the efficiency of coupling systems of traction and external power supply]. *Nauka i transport = Science and transport*. 2006;(5):18-21. (In Russ.).

10. Grigor'ev N. P., Voprikov A. V., Kovalev V. A., et al. Povysheniye sroka sluzhby silovykh transformatorov v sisteme obespecheniya dvizheniya poezdov [Increasing the service life of power transformers in the system for ensuring the train traffic]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical systems and complexes*. 2020;4(49):26-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29). (In Russ.).

11. Grigor'ev N. P., Danilyuk A. V., Trofimovich P. N., Kovalev V. A. Povysheniye effektivnosti raboty tyagovoy podstantsii peremennogo toka [Improving the efficiency of the AC traction substation]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and electrical equipment of transport*. 2020;(5):13-16. (In Russ.).

12. Tamazov A. I. Nesimmetriya tokov i napryazheniy, vyzvaemaya odnofaznymi tyagovymi nagruzkami [Asymmetry of currents and voltages caused by single-phase traction loads]. Moscow: Transport Publ.; 1965. 235 p. (In Russ.).

13. Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Kovalev V. A., Trofimovich P. N. Povysheniye effektivnosti raboty sistem vneshnego i tyagovogo elektrosnabzheniya [Improving the efficiency of external and traction power supply systems]. *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 2021;64(4-5):72-78. (In Russ.).

14. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Power quality: a guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ.; 2009. 456 p. (In Russ.).

15. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Николай Потапович ГРИГОРЬЕВ,

канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, 0101gnp@mail.ru), Author ID: 303445, <https://orcid.org/0000-0002-2800-2767>

### Иван Владимирович ИГНАТЕНКО,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, systel@festu.khv.ru), Author ID: 512485, <https://orcid.org/0000-0003-3356-4059>

### Сергей Анатольевич ВЛАСЕНКО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, vsa\_ens@mail.ru), Author ID: 641533, <https://orcid.org/0000-0002-4028-8606>

### Владимир Александрович КОВАЛЕВ,

аспирант, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), Author ID: 1043617, <https://orcid.org/0000-0002-1356-189X>

### Владимир Васильевич ШАТАЛОВ,

заместитель главного инженера, Трансэлектропроект (107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 3, стр. 2, 8491v@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2351-4007>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Nikolay P. GRIGOR'EV,

Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., 0101gnp@mail.ru), Author ID: 303445, <https://orcid.org/0000-0002-2800-2767>

### Ivan V. IGNATENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., systel@festu.khv.ru), Author ID: 512485, <https://orcid.org/0000-0003-3356-4059>

### Sergey A. VLASENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., vsa\_ens@mail.ru), Author ID: 641533, <https://orcid.org/0000-0002-4028-8606>

**Vladimir A. KOVALEV,**

Postgraduate, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), Author ID: 1043617, <https://orcid.org/0000-0002-1356-189X>

**Vladimir V. SHATALOV,**

Deputy Chief Engineer, Transelektroproyekt (107140, Moscow, 3, bldg. 2, Verkhnyaya Krasnosel'skaya St., 8491v@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2351-4007>

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**Николай Потапович ГРИГОРЬЕВ.** Разработка концепции статьи, формулирование целей, задач, структуры (20%).

**Иван Владимирович ИГНАТЕНКО.** Формирование направления исследования, анализ результатов (20%).

**Сергей Анатольевич ВЛАСЕНКО.** Анализ показателей работы участка ДВЖД (20%).

**Владимир Александрович КОВАЛЕВ.** Разработка новых схем подключения тяговых подстанций, расчет значений показателей работы подстанций участка ДВЖД при существующей и новой схемах (20%).

**Владимир Васильевич ШАТАЛОВ.** Сбор и структурирование информации о рассматриваемом участке ДВЖД, разработка новых схем подключения подстанций (20%).

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**Nikolay P. GRIGOR'EV.** Development of the concept of the article, formulation of goals, objectives, structure (20%).

**Ivan V. IGNATENKO.** Formation of research direction, analysis of results (20%).

**Sergey A. VLASENKO.** Analysis of performance indicators of the Far East Railway section (20%).

**Vladimir A. KOVALEV.** Development of new schemes for connecting traction substations, calculation of performance indicators of the Far Eastern Railway section substations with the existing and new schemes (20%).

**Vladimir V. SHATALOV.** Collection and structuring of information on the considered section of the Far Eastern Railway, development of new substation connection schemes (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.06.2022, первая рецензия получена 22.07.2022, вторая рецензия получена 27.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 30.06.2022, first review received 22.07.2022, second review received 27.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

**ПОДПИСКА**

---

# «Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

**Подписной индекс журнала — 70116.**

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: [journal@vniizht.ru](mailto:journal@vniizht.ru). Информация о подписке размещена на сайте журнала [www.journal-vniizht.ru](http://www.journal-vniizht.ru).

**Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья** могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, [export@ural-press.ru](mailto:export@ural-press.ru)).