



УДК 621.311: 621.321

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).126-135

**Закарюкин Василий Пантелеймонович,***д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: zakar49@mail.ru***Крюков Андрей Васильевич,***д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: and\_kryukov@mail.ru***Авдиенко Илья Михайлович,***аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: av.ila@mail.ru***Безридный Евгений Сергеевич,***аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: bezrik4471@mail.ru***V. P. Zakaryukin,***Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: zakar49@mail.ru***A. V. Kryukov,***Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: and\_kryukov@mail.ru***I. M. Avdienko,***Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, e-mail: av.ila@mail.ru***E. S. Bezridniy,***Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, e-mail: bezrik4471@mail.ru***Информация о статье**

Дата поступления: 20 мая 2017 г.

**Article info**

Received: May 20, 2017

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

## MODELLING OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS MODES AT THE MOVEMENT OF HIGH-SPEED TRAINS

**Аннотация.** Перевод электрифицированных железнодорожных линий на высокоскоростное движение может потребовать модернизации системы тягового электроснабжения. В качестве технических средств модернизации могут использоваться коаксиальные кабели и симметрирующие трансформаторы. Применение симметрирующих трансформаторов обеспечивает дополнительные эффекты, заключающиеся в улучшении качества электроэнергии в питающих высоковольтных сетях и районах электроснабжения нетяговых потребителей, а также в снижении потерь электроэнергии и повышении энергоэффективности.

Для решения вопросов практического применения тяговых сетей с коаксиальными кабелями и симметрирующими трансформаторами необходимы средства компьютерного моделирования таких сетей, которые могут быть реализованы на базе методов, разработанных в ИргУПС. В статье приведены результаты компьютерного моделирования традиционной системы тягового электроснабжения 2\*25 кВ, а также системы с коаксиальными кабелями и симметрирующими трансформаторами Вудбриджа. Рассматривалось движение обычных пассажирских поездов и высокоскоростных электропоездов «Сапсан». Моделирование осуществлялось для трех вариантов: традиционная схема тяговой сети 2\*25 кВ; система тягового электроснабжения, оснащенная модифицированными трансформаторами Вудбриджа; комплексное техническое решение, включающее симметрирующие трансформаторы и коаксиальные кабели.

Результаты моделирования показали, что применение коаксиальных кабелей способствует значительному повышению уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава. Использование модифицированных трансформаторов Вудбриджа позволяет уменьшить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций, но снижение недостаточно велико и зависит от режимов движения поездов на смежных межподстанционных зонах.

Наибольшие положительные эффекты имеют место при комплексном применении симметрирующих трансформаторов и коаксиальных кабелей.

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения, симметрирующие трансформаторы, коаксиальные кабели.

**Abstract.** Transfer of electrified railway to high speed movement requires amplification of tractive electrical power supply system. Such amplification can be carried out by use of coaxial cables and symmetrizing transformers. Amplification provides the additional effects consisting in improving of electric power quality in high-voltage feeding networks and regions of electrical power supply for not tractive customers and also in lowering of electric power losses and the energy efficiency increase.

Means of computer simulation of such networks are necessary for solution of practical application questions. Such means can be implemented on the basis of methods developed in Irkutsk State Transport University. The article describes the results of computer simulation of a traditional tractive 2x25 kV power supply system, and also a 2x25 kV system equipped with Woodbridge symmetrizing transformers and coaxial cables. Movement of conventional passenger trains and electro train Velaro Rus has been considered. Simulation has been carried out for three variants: a traditional tractive 2x25 kV network; a tractive power supply system equipped with Woodbridge modified transformers; a complex technical solution with symmetrizing transformers and coaxial cables.

Results of simulation show that use of the coaxial cables promotes increase in a voltage level on the train current collectors. Use of the Woodbridge modified transformers allows lowering asymmetry factor on high voltage buses of tractive substations.

The greatest effect takes place in case of complex use of the symmetrizing transformers and coaxial cables.

**Keywords:** tractive electric supply systems, symmetrizing transformers, coaxial cables.

## Введение

В настоящее время эксплуатируются и строятся железнодорожные магистрали со скоростью движения свыше 160 км/ч, которые электрифицируются преимущественно на переменном токе [1]. В результате создания сети высокоскоростных магистралей могут быть достигнуты следующие положительные результаты:

- повышение связности территорий, мобильности и экономической активности населения;
- развитие транспортного машиностроения, производства новых материалов, электроники, систем подготовки инженерных и научных кадров;
- снижение себестоимости и качества перевозок на основе разделения пассажирского и грузового движения;
- эффективное использование транзитного потенциала территорий.

**Постановка задачи.** Для обеспечения эффективного электроснабжения при переводе электрифицированных линий на скоростное движение необходима модернизация тяговой сети (ТС), цель

которой состоит в том, чтобы уровни напряжений на токоприемниках подвижного состава (ЭПС) в нормальном режиме лежали в диапазоне 24...29 кВ. В частности, модернизация может осуществляться на основе следующих технических решений [1–3]:

- применение вместо системы тягового электроснабжения (СТЭ) 25 кВ автотрансформаторной системы 2\*25 кВ;
- замена однофазных трансформаторов СТЭ 2\*25 кВ на симметрирующие трансформаторы (СТ) Вудбриджа (рис. 1);
- использование СТЭ с коаксиальным кабелем (рис. 2).

Модернизация обеспечивает дополнительные эффекты, состоящие в улучшении качества электроэнергии в питающих высоковольтных сетях и районах электроснабжения нетяговых потребителей, а также в снижении потерь электроэнергии и повышении энергоэффективности [2–7].

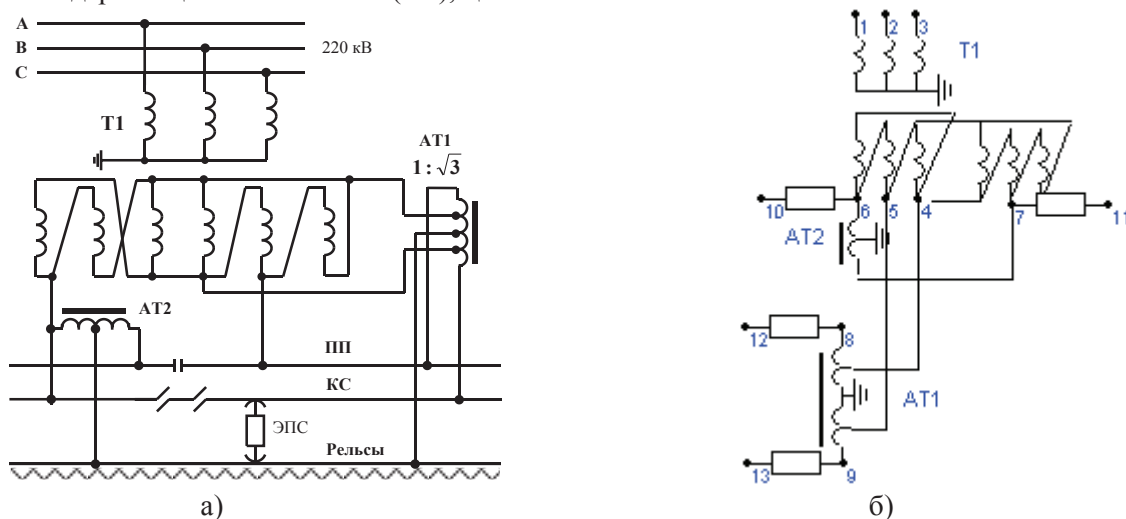


Рис. 1. СТЭ 2×25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа: а – фрагмент схемы СТЭ; б – фрагмент расчетной схемы; АТ – автотрансформаторы; ЭПС – электроподвижной состав

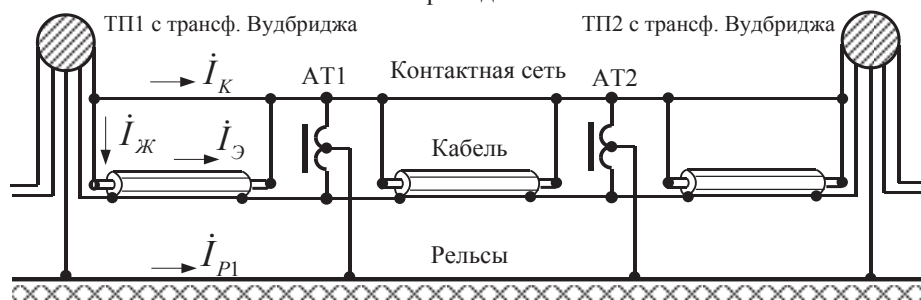


Рис. 2. Схема тяговой сети 2×25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями



Применение трансформаторов Вудбриджа связано с некоторым увеличением трансформаторной мощности тяговой подстанции по сравнению с классической схемой в связи с пониженным (порядка 83 %) использованием трансформаторной мощности трехфазным трансформатором и наличием двух дополнительных автотрансформаторов на подстанции. Замена питающего провода дорогостоящим кабелем большого сечения с номинальным напряжением 55 кВ приводит к дополнительным расходам на модернизацию тяговой сети.

Для решения вопросов практического применения СТЭ с симметрирующими трансформаторами и коаксиальными кабелями необходимы средства компьютерного моделирования таких СТЭ, которые реализованы на основе методов, разработанных в ИрГУПС [5-12]. Кроме того, представляет интерес рассмотрение комплексного технического решения, включающего СТ и коаксиальные кабели.

#### Описание технических решений по модернизации СТЭ

В работе [13] описана модифицированная схема Вудбриджа, предназначенная для питания СТЭ 2×25 кВ (рис. 1). В этой схеме номинальное напряжение между вершинами вторичных треугольников равно 55 кВ при линейном напряжении 31,8 кВ. Автотрансформатор АТ1 повышает линейное напряжение до 55 кВ, а АТ2 обеспечивает одинаковость напряжений контактной сети и питающего провода левой межподстанционной зоны.

Использование одножильного экранированного кабеля вместо обратного провода (рис. 2) одновременно со снижением влияния на смежные линии является эффективным средством стабилизации напряжения в контактной сети из-за малого активно-индуктивного сопротивления кабеля. Жила кабеля используется для усиления контактной сети, экран дополняет или заменяет обратный провод системы 2×25 кВ, поэтому требуется специализированный кабель с большим сечением жилы и экрана. В дальнейшем рассматривается кабель с сечением 300 мм<sup>2</sup> для жилы и экрана.

#### Методика моделирования

Система электроснабжения железной дороги (СЭЖД) переменного тока включает трехфазные и однофазные подсистемы, для моделирования которых необходимо использовать фазные координаты [6, 7]. В ИрГУПС разработаны методы моделирования СЭЖД в фазных координатах, базирующиеся на применении решетчатых схем замещения (РСЗ) многопроводных элементов, которые представляют собой RLC-элементы, соединенные

в схемы полных графов. Для РСЗ можно записать следующее формализованное определение:

$$TEC : hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где  $TEC$  – обозначение РСЗ;  $hub$  – множество узлов РСЗ;  $con$  – множество ветвей РСЗ.

С помощью объединения РСЗ отдельных элементов трехфазно-однофазной сети в единую расчетную схему реализуется модель для расчета режимов. Такая методика моделирования режимов СЭЖД заложена в комплексе Fazonord [6].

На рис. 1, б представлена расчетная схема ПК Fazonord, реализующая модель модифицированного трансформатора Вудбриджа. Линейные напряжения вторичных треугольников трехфазного трансформатора равны 31,8 кВ, АТ1 имеет напряжения отдельных секций 11,6; 15,9; 15,9; 11,6 кВ. Для остальных параметров АТ1 и АТ2 приняты значения, аналогичные параметрам автотрансформатора АОМНЖ-16000/55.

Коаксиальный кабель представлен многопроводной моделью, формирование которой описано в работе [14]. Эта модель предполагает относительную диэлектрическую проницаемость среды, равную единице, поэтому для получения необходимой эквивалентной генерации реактивной мощности можно уменьшить расстояние между жилой и проводниками экрана. Индуктивность петли «жила – экран» при этом меняется незначительно. Рассчитать требуемый внутренний диаметр экрана  $D$  можно по формуле емкости цилиндрического конденсатора

$$D = d \exp\left(\frac{2\pi\epsilon_0}{C}\right),$$

где  $d$  – диаметр жилы;  $C$  – погонная емкость.

Координаты расположения токоведущих частей модели ТС представлены на рис. 3.

#### Результаты моделирования

На первом этапе моделирования рассматривалась традиционная тяговая сеть 2×25 кВ с питанием от сети 220 кВ при движении обычных пассажирских поездов и электропоездов «Сапсан». Средняя участковая скорость для первого варианта составляла 60 км/час, а для второго – 230 км/час. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса Fazonord [6].

Графики движения и токовые профили поездов показаны на рис. 4. Фрагмент схемы расчетной модели СТЭ 2×25 кВ приведен на рис. 5. Результаты моделирования представлены в табл. 1, 2 и на рис. 6–11.

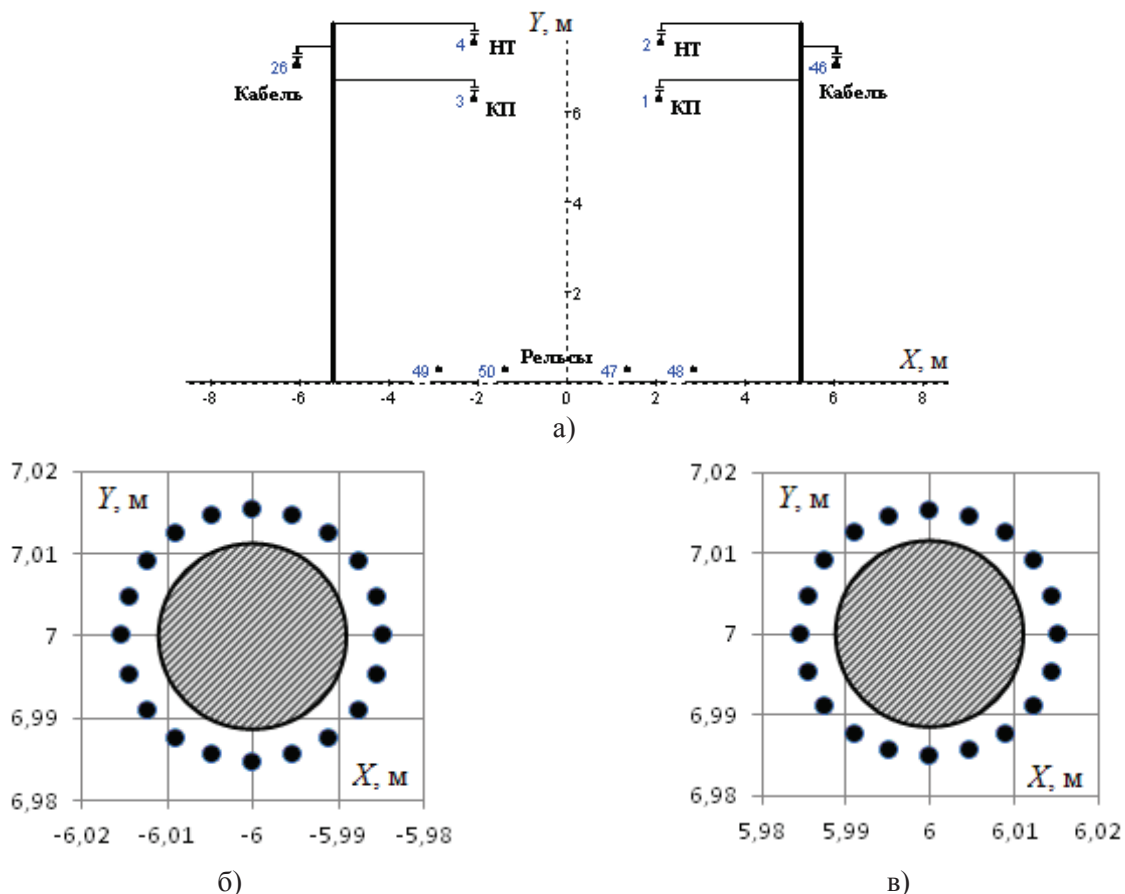


Рис. 3. Координаты проводов модели:

а.) сечение тяговой сети; б) сечение проводников левого кабеля; в) правого кабеля

Т а б л и ц а 1

Перетоки активной энергии ( $W_a$ ,  $W_r$ ) и потери ( $\Delta W_a$ ) в ЛЭП 1

Параметр	ВЛ65	«Сапсан»	Различие, %
$\Delta W_a$ , кВт·ч	232	141	-39
$W_a$ , кВт·ч	3000	8120	170
$W_r$ , квар·ч	-61100	-32200	47

Т а б л и ц а 2

Сводные показатели

Параметр	Минимум			Среднее значение			Максимум		
	ВЛ65	«Сапсан»	Различие, %	ВЛ65	«Сапсан»	Различие, %	ВЛ65	«Сапсан»	Различие, %
$k_U$ , %	-	-	-	1,0	4,0	300	3,0	10,6	253
$k_{2U}$ , %	-	-	-	0,1	0,7	600	0,5	1,6	220
$U$ , кВ	26,1	24,6	-5,7	26,4	25,6	-3,0	26,5	26,3	-0,8

Примечания:  $k_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих на шинах 220 кВ ТП2 (фаза В);  $k_{2U}$  – коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП2;  $U$  – напряжение на токоприемнике первого поезда.

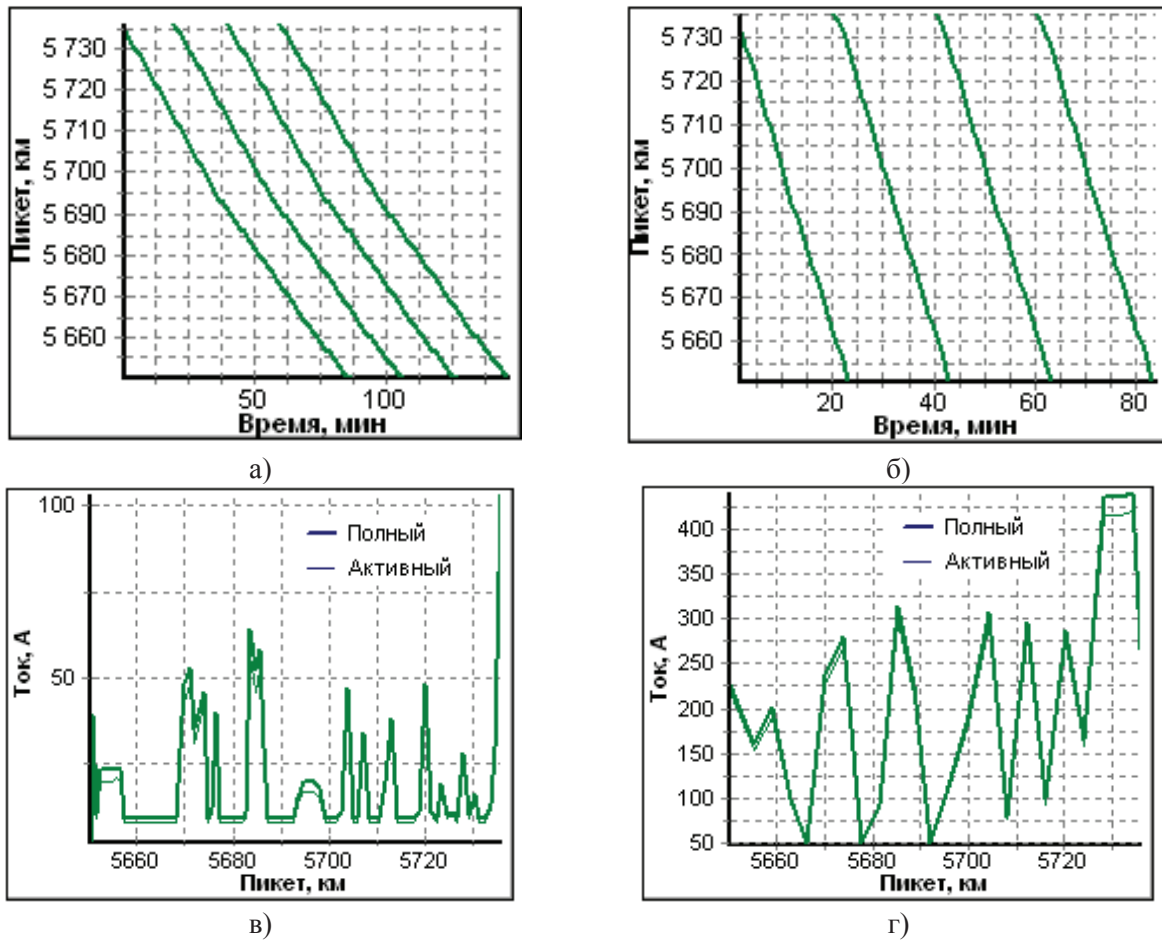


Рис. 4. Графики движения (а, б) и токовые профили (в, г): а, в – ВЛ65; б, г – «Сапсан»

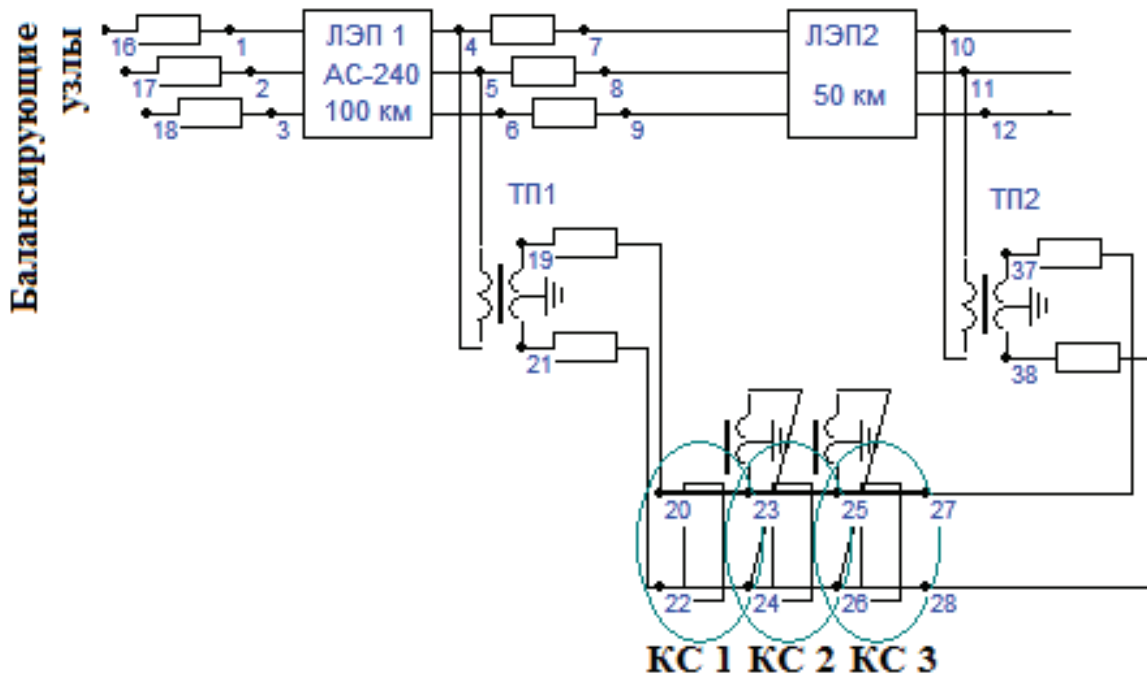


Рис. 5. Фрагмент схемы расчетной модели:  
КС 1...КС 3 – участки контактной сети



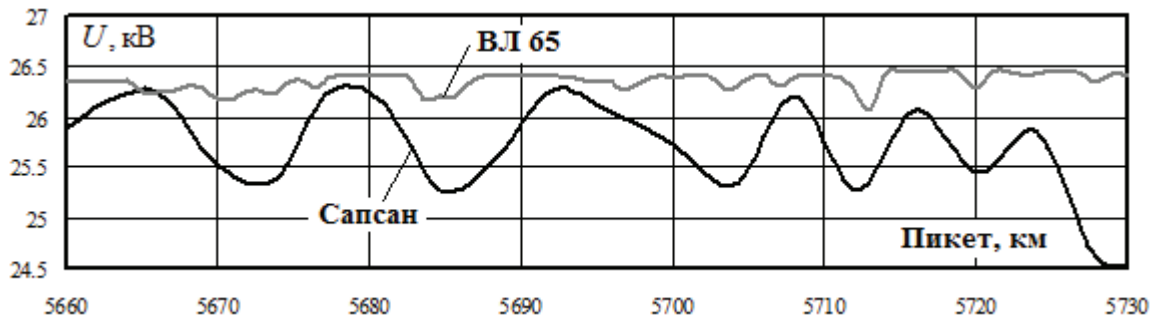


Рис. 6. Напряжение на токоприемнике первого поезда

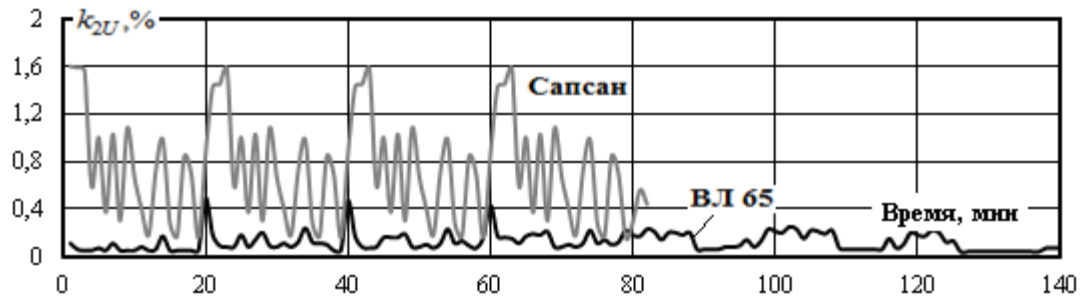


Рис. 7. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП 2

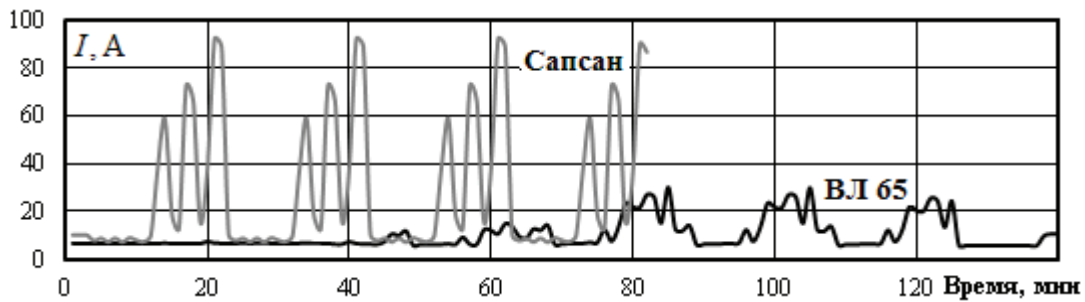


Рис. 8. Токи фидера контактной сети ТП 1

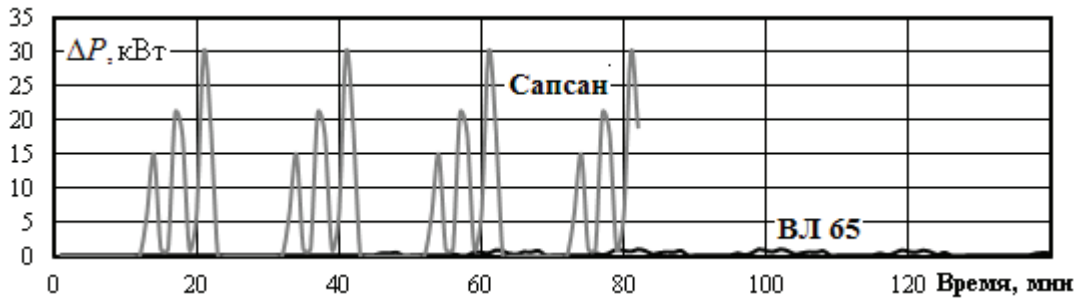


Рис. 9. Потери мощности в участке КС 1

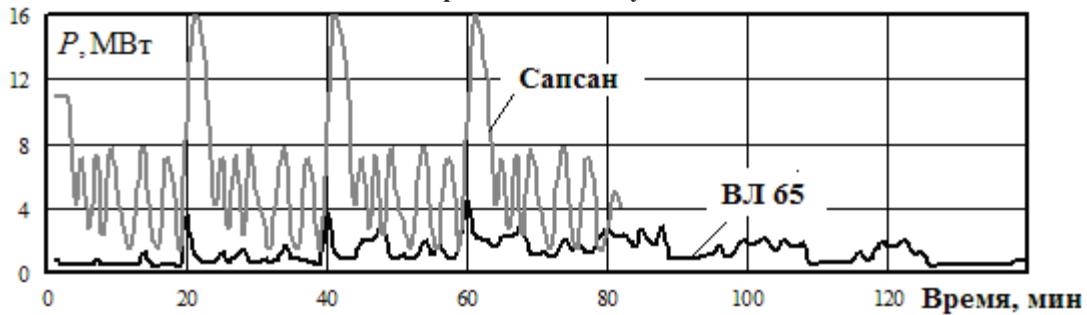


Рис. 10. Потоки активной мощности в головной ЛЭП 1

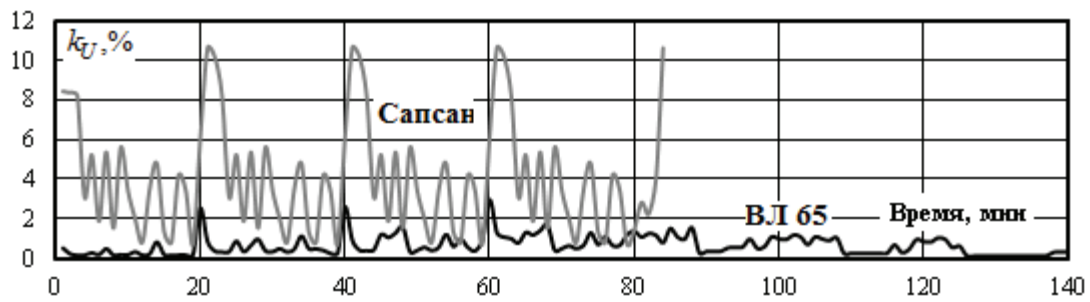


Рис. 11. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазы В 220 кВ ТП 2

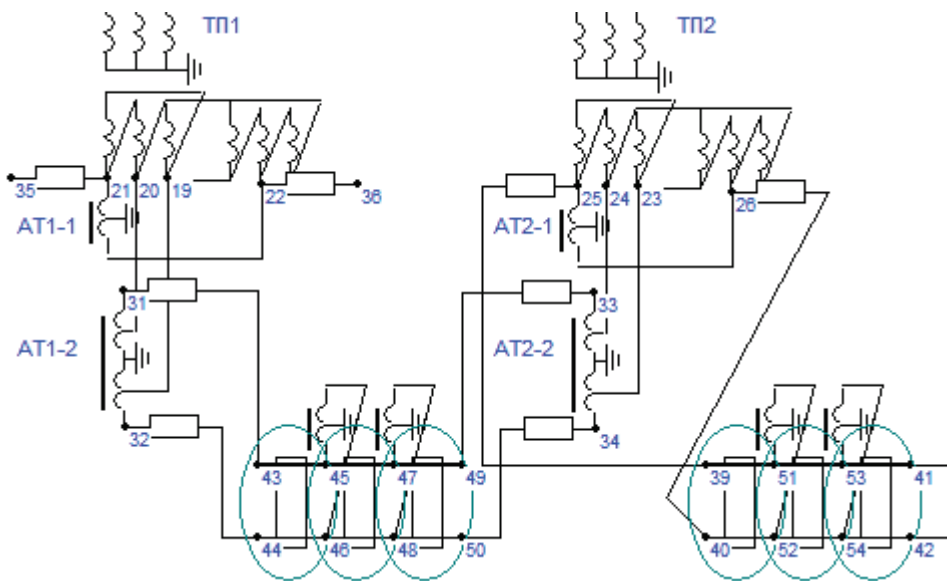


Рис. 12. Фрагмент расчетной схемы СТЭ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа

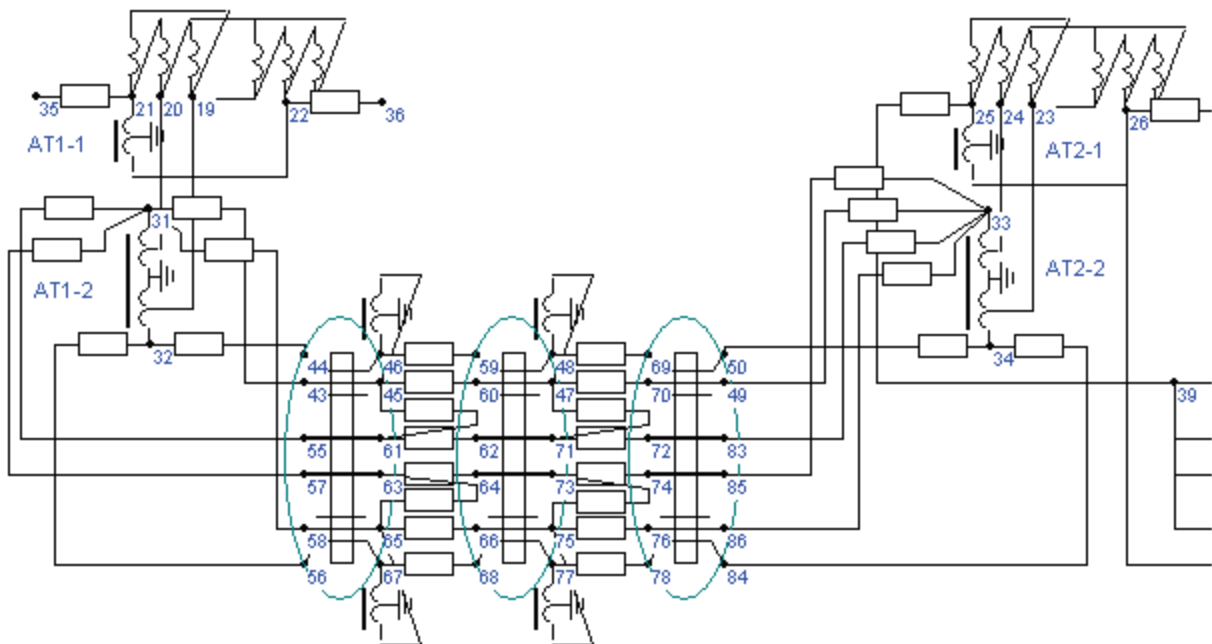


Рис. 13. Фрагмент расчетной схемы СТЭ 2×25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями



Таблица 3

## Несимметрия питающего напряжения ТП 2 и напряжение на токоприемнике поезда

Показатель	Параметр	Величина			Различие, %	
		Т	В	ВК	Между столбцами 2 и 1	Между столбцами 3 и 1
		1	2	3		
$k_{2U}, \%$	Среднее	0,7	0,7	0,7	0	0
	Максимум	1,6	1,6	1,4	0	-12,5
U, кВ	Минимум	24,6	24,8	27,2	0,8	10,6
	Среднее	25,6	25,6	27,7	0	8,2
	Максимум	26,3	26,2	28,3	-0,4	7,6

Примечание: Т – традиционная СТЭ 2\*25 кВ; В – СТЭ с трансформаторами Вудбриджа; ВК – СТЭ с трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями.

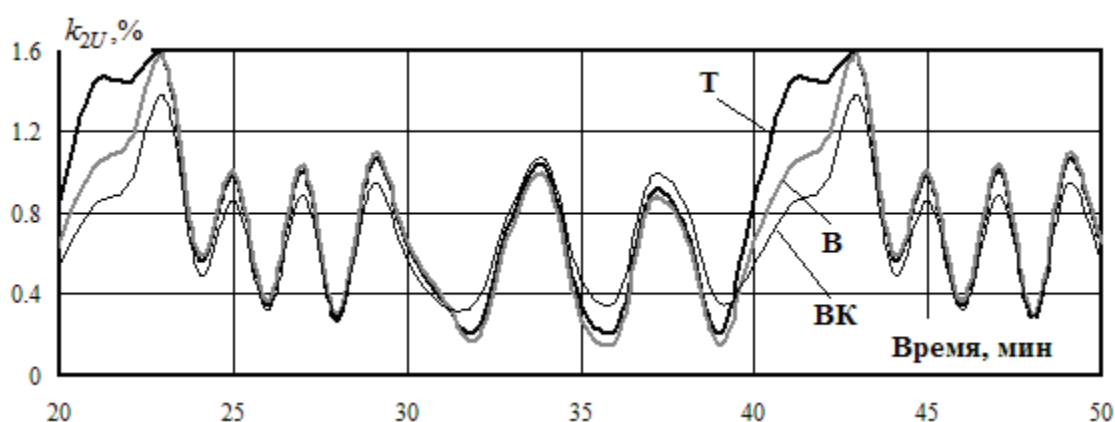


Рис. 14. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП 2

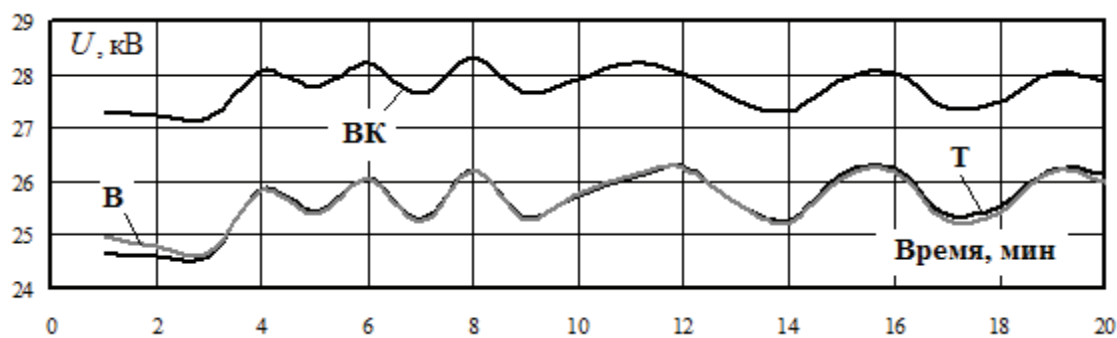


Рис. 15. Напряжение на токоприемнике первого поезда

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Высокоскоростной поезд создает тяговые нагрузки значительно большей величины, чем обычный пассажирский состав. Токи, протекающие по контактным проводам (рис. 8), увеличиваются примерно в три раза.

2. Рост тяговых нагрузок приводит к снижению напряжений на токоприемниках электровозов (рис. 6), значительному росту несимметрии (рис. 7, табл. 2) и гармонических искажений (рис. 11, табл. 2) на шинах высокого напряжения тяговых подстанций, а также потерь в тяговой се-

ти (рис. 9).

3. Повышенные нагрузки, создаваемые поездами с локомотивами «Сапсан», приводят к существенному росту перетоков активной мощности по головной ЛЭП 1 (рис. 10). Однако суммарные потери  $\Delta W_a$  снижаются из-за перераспределения реактивных перетоков (табл. 1).

На втором этапе моделирования рассмотрены описанные выше варианты модернизации тяговой сети. Фрагменты схем соответствующих расчетных моделей представлены на рис. 12 и 13. Результаты моделирования сведены в табл. 3 и про-





иллюстрированы на рис. 14, 15. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- применение коаксиальных кабелей способствует значительному повышению уровня напряжения на токоприемниках ЭПС, что особенно актуально для высокоскоростных линий;
- за счет использования модифицированных трансформаторов Вудбриджа в СТЭ 2×25 кВ можно снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций;
- наибольшие положительные эффекты имеют место при комплексном применении СТ и коаксиальных кабелей.

#### Заключение

1. На основе применения решетчатых схем замещения реализована методика моделирования

систем тягового электроснабжения 2×25 кВ, оснащенных модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями.

2. Применение коаксиальных кабелей способствует повышению уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава. Использование модифицированных трансформаторов Вудбриджа позволяет уменьшить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций, однако уровень снижения  $k_{2U}$  зависит от режимов движения поездов на смежных межподстанционных зонах.

3. Наибольшие положительные эффекты наблюдаются при комплексном использовании симметрирующих трансформаторов и коаксиальных кабелей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс / И.П. Киселев, Л.С. Блашко и др. Т. 1. М.: Учеб.-метод. центр по образ. на ж.-д. трансп., 2014. 306 с.
2. Шалимов М.Г., Маслов Г.П., Магай Г.С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог. Омск, 2002. 49 с.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения 2х25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа // Известия Транссиба. № 2 (26). 2016. С. 70–78.
4. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Принципы построения систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Теплотехник, 2014. 166 с.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2015. 218 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. гос. ун-т. 2005. 273 с.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2014. 164 с.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока // Системы. Методы. Технологии. № 4 (20). 2013. С. 68–73.
9. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами Вудбриджа // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2015. С. 109–114.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Математические модели симметрирующих трансформаторов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Ч. I. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 121–128.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Устранение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1(49). 2016. С. 189–195.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. № 2 (4) С. 11–17.
13. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом / Р.Р. Мамошин и др. // Вестник ВНИИЖТ. 1989. № 4. С. 22–24.
14. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2010. 80 с.

#### REFERENCES

1. Kiselev I.P., Blazhko L.S et al. Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport: obshchii kurs [High-speed railway transport: general course]. Vol.1, Moscow: FSBEI «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport» Publ., 2014, 306 p.
2. Shalimov M.G., Maslov G.P., Magai G.S. Sovremennoe sostoyanie i puti sovershenstvovaniya sistem elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog [Current state and ways to improve power supply systems for electric railways]. Omsk: 2002, 49 p.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya 2kh25 kV s koaksial'nymi kabelyami i transformatorami Vudbridzha [Modeling of traction power systems of 2x25 kV with coaxial cables and Woodbridge transformers]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, No. 2(26), 2016, pp. 70–78.
4. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Printsipy postroeniya sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Principles of construction of power supply systems for railway transport]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2014, 166 p.



5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellekтуал'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent technologies of power quality management]. Irkutsk: INRTU Publ, 2015, 218 p.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk University Publ., 2005, 273 p.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie rezhimov sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Modeling of power supply systems' modes for railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2014, 164 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ivanova E.S. Analiz skhem simmetrirovaniya tyagovykh nagruzok zheleznykh dorog peremennogo toka [The analysis of schemes of symmetrization of railway traction loads of alternating current]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], No. 4(20), 2013, pp. 68–73.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmet-riruyushchimi transformatorami Vudbridzha [Modeling of traction power supply systems equipped with Woodbridge symmetrizing transformers]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Increase of efficiency of production and use of energy in the conditions of Siberia]. Irkutsk: INRTU Publ., 2015, Vol. 2, pp. 109–114.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Matematicheskie modeli simmetriruyushchikh transformatorov [Mathematical models of balancing transformers]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Informational and mathematical technologies in science and management], Part I. Irkutsk: MESI SB RAS Publ., 2015, pp. 121–128.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Ustranenie nesimmetrii v elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovye pod-stantsii zheleznykh dorog [Elimination of asymmetry in electric networks powering railway traction sub-stations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System analysis. Modeling], No. 1(49), 2016, pp. 189–195.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Imitatsionnoe modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriruyushchimi ustroystvami [Simulation modeling of traction power supply systems equipped with balancing devices]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], No. 2 (4) 2015, pp. 11–17.
13. Mamoshin R.R. et al. Transformatory tyagovykh podstantsii s povyshennym simmetri-ruyushchim efektom [Transducers of traction substations with increased symmetrizing effect]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1989, No. 4, pp. 22–24.
14. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tokoprovodami [Modeling of power supply systems with high-powered wireways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2010, 80 p.

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).135-144

**Черемисин Василий Тимович,**

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, Омский государственный университет путей сообщения, e-mail: cheremisinvt@gmail.com

**Незевак Владислав Леонидович,**

к. т. н., доцент, старший научный сотрудник, Научно-исследовательская часть, кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, e-mail: nezevakwl@mail.ru,

**Саркенов Советхан Сатжанович,**

аспирант, кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, e-mail: sovet201@mail.ru

**V. T. Cheremisin,**

Doctor of Engineering Science, Prof., Head of the Subdepartment of Electric Railway Rolling Stock, Director of the Research and Development Institution of Energy Preservation at Railway Transport, Omsk State Transport University, e-mail: cheremisinvt@gmail.com

**V. L. Nezevak,**

Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Senior Research Officer, Research department, the Subdepartment of Electric Power Supply of Railway Transport, Omsk State Transport University, e-mail: nezevakwl@mail.ru,

**S. S. Sarkenov,**

Ph.D. student, the Subdepartment of Electric Railway Rolling Stock, Omsk State Transport University, e-mail: sovet201@mail.ru

**Информация о статье**

Дата поступления: 10 мая 2017 г.

**Article info**

Received: May 10, 2017

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАКЕТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ НА ОБЪЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ НА УЧАСТКАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С I ТИПОМ ПРОФИЛЯ

## EVALUATING INFLUENCE OF BATCH TRAFFIC ORGANIZATION ON THE VOLUME OF ELECTRICITY FOR TRACTION AT THE DC CURRENT SECTIONS WITH THE I<sup>TH</sup> TYPE OF PROFILE