

Е.А. Морозов<sup>1</sup>, В.В. Фаренык<sup>1</sup>, М.В. Востриков<sup>1</sup>, В.А. Тихомиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВ ФИЛЬТРАЦИИ И КОМПЕНСАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СТЭ ПРИ ПРОПУСКЕ ПОЕЗДОВ ПОВЫШЕННОЙ МАССЫ

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы снижения интенсивности старения изоляции силовых трансформаторов тяговых подстанций и улучшения показателей качества электроэнергии системы тягового электроснабжения в границах участка Могзон - Карымская Забайкальской железной дороги за счет использования различных устройств фильтрации и компенсации. Предложен комбинированный вариант (техническое решение), позволяющее наиболее эффективно решить указанные задачи в условиях пропуска тяжеловесных и сдвоенных поездов, включающее в себя разработанную методологию, имитационное моделирование и технические рекомендации.

**Ключевые слова:** Силовой трансформатор, устройство фильтрации и компенсации, фильтр-пробка, высшие гармоники тока и напряжения, тяжеловесные поезда, показатели качества электроэнергии, реактивная мощность.

Е.А. Morozov<sup>1</sup>, V.V. Farenik<sup>1</sup>, M.V. Vostrikov<sup>1</sup>, V.A. Tikhomirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

## TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF FILTRATION AND COMPENSATION DEVICES ON THE QUALITY INDICATORS OF THE ELECTRIC ENERGY OF THE STE WHEN PASSING TRAINS OF INCREASED MASS

**Abstract.** The article deals with the issues of reducing the intensity of aging of the insulation of power transformers of traction substations and improving the quality of electricity of the traction power supply system within the boundaries of the Mogzon - Karymskaya section of the Trans-Baikal Railway through the use of various filtration and compensation devices. A combined variant (technical solution) is proposed, which allows the most effective solution of these tasks in the conditions of heavy and double trains, including the developed methodology, simulation modeling and technical recommendations.

**Keywords:** Power transformer, filtration and compensation device, filter plug, higher harmonics of current and voltage, heavy trains, electricity quality indicators, reactive power.

### Введение

На замену ГОСТ 13109-97 [1] в 2014 году пришел ГОСТ 32144-2013 [2], регламентирующий показатели качества электрической энергии. Система тягового электроснабжения железных дорог переменного тока является частным вариантом электрической сети с нестандартными электрическими параметрами и режимами работы, следовательно, к ней (в полном объеме) будут предъявляться все нормы и требования на условие их соблюдения.

Полный набор показателей качества электрической энергии включает в себя:

- отклонение частоты;
- медленные изменения напряжения;
- колебания напряжения и фликер;
- одиночные быстрые изменения напряжения;
- несинусоидальность напряжения;
- гармонические составляющие напряжения;
- несимметрия напряжений;
- прерывания напряжения;
- провалы напряжения и перенапряжения;
- импульсные напряжения [2].

Силовой (тяговый) трансформатор - важнейший элемент в системе тягового электрообеспечения (СТЭ), определяющий надежность и бесперебойность обеспечения электроэнергией внутри нее. Кроме этого, стоимость их приобретения, доставки, монтажа и пусконаладочных работ является самой дорогостоящей составляющей при модернизации или реконструкции тяговых подстанций. Оптимизация режимов работы (особенно при наличии несинусоидальных и несимметричных нагрузок) и, как следствие, продление срока службы – актуальная задача для Забайкальской дирекции по энергообеспечению [3, 4].

Величина и гармонический состав токов в обмотках силовых трансформаторов тяговых подстанций зависит в первую очередь от тяговых токов электропоездов. При повышении веса грузовых поездов уровень высших гармоник токов, протекающих по обмоткам тяговых трансформаторов, также увеличится. В результате дополнительного нагрева, вызываемого гармониками, ускоряется износ оборудования, увеличиваются потери электроэнергии, имеют место "скрытые" издержки, которые могут быть значительными [5].

Гармоники тока могут привести к нарушению нормального режима работы отечественных трансформаторов, сконструированных для работы на промышленной частоте 50 Гц и, в конечном итоге, к его скорому выходу из эксплуатации (выводу в ремонт). Для таких трансформаторов при наличии гармоник следует снижать их номинальную нагрузку, либо применять трансформаторы, специально сконструированные для эксплуатации в условиях несинусоидальной нагрузки [6].

Трансформаторы, предназначенные для работы в условиях протекания токов гармоник, за рубежом принято ранжировать по так называемому k-фактору. Поскольку гармоники приводят к заметным дополнительным потерям, то в конструкции трансформаторов предусматривают специальные виды изолирования и транспозиции проводников. Такие трансформаторы, сконструированные для питания нелинейных нагрузок (рисунок 1), имеют маркировку, указывающую на величину допустимого k-фактора.



**Рис. 1. Специальные трансформаторы для эксплуатации в условиях несинусоидальной нагрузки**

Очевидно, что в рамках отдельно взятой железной дороги имеются участки, характеризующиеся различными значениями k-фактора, что обусловлено, помимо источников гармоник от преобразователей электропоездов, наличием мощных нелинейных нагрузок и реактивной мощности.

Исследования коэффициентов искажения синусоидальности  $K_1$  и коэффициентов гармонических составляющих  $K_{I(n)}$  токов сетевых обмоток тяговых трансформаторов выполнялись с использованием модели системы тягового и внешнего электрообеспечения, разработанной средствами SIMULINK и SimPowersystems MatLab, которые содержат постоянно развиваемую и дополняемую библиотеку моделей объектов [7]. Создание схемы исследуемой электрической системы осуществляется путем графического ввода объектов, задания настраиваемых параметров их моделей и соединения выводов объектов согласно принципиальной схеме. Библиотеки SIMULINK содержат широкий набор инструментальных объектов, предназначенных для обработки и представления данных об исследуемых процессах. В их число

входят измерители мгновенных и среднеквадратичных значений напряжений и токов, активной, реактивной и полной мощности, блоки Фурье-анализа и вычисления показателей гармонических искажений, наборы линейных и нелинейных блоков, фильтры, осциллографы и многие другие средства.

В настоящее время, в рамках принятой «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», проводится изготовление и монтаж устройств фильтрации и компенсации (УФК), активных кондиционеров гармоник (АКГ), выпускаемых ООО "НИИЭФА-ЭНЕРГО", предназначенных для нормализации высших гармонических составляющих, несинусоидальности напряжений с одновременной компенсацией реактивной мощности и, следовательно, повышения уровня напряжения в контактной сети и на токоприемнике электровоза.

В качестве расчетного был выбран участок Забайкальской железной дороги Могзон-Карымская (рисунок 2).

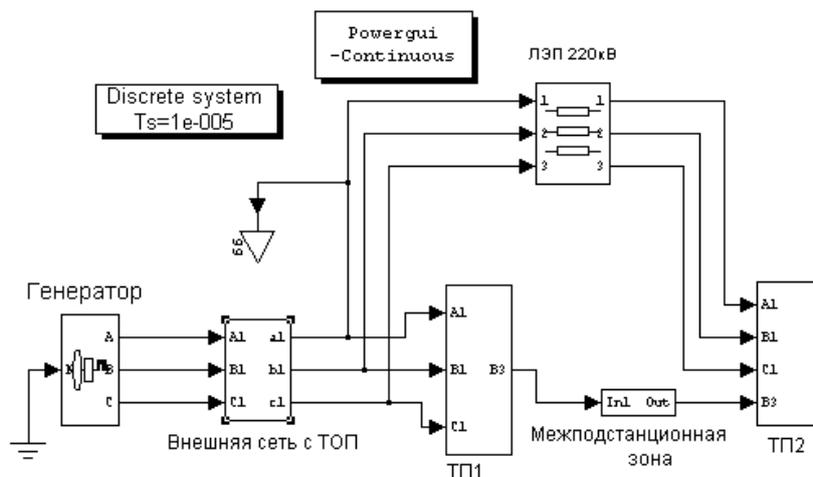


Рис. 2. Структура обобщенной модели системы тягового электроснабжения

Поперечные емкостные сопротивления участков ЛЭП могут вызывать резонансные эффекты, что приводит к повышению ПКЭ в ТОП по отдельным гармоникам. Варьируя длинами участков ЛЭП можно подготовить множество вариантов моделей, в которых создаются условия для проявления резонансных явлений в ТОП на 3-ей и 9-ой гармониках, а также на 5, 7, 11, 13 гармониках (рисунок 3).

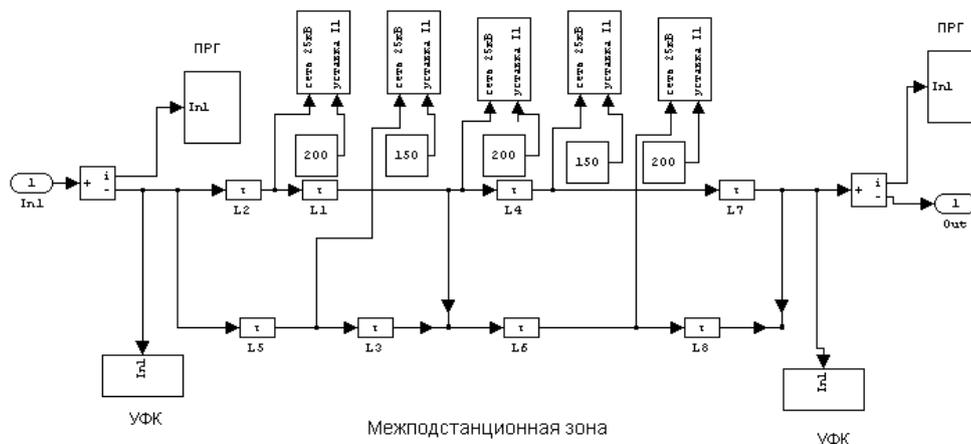


Рис. 3. Модель межподстанционной зоны с выпрямительными нагрузками и УФК

Одиночная выпрямительная нагрузка содержит модели однофазного преобразовательного трансформатора и неуправляемого выпрямителя, работающего на последовательно

включенные  $X_d$ ,  $R_d$  и встречную ЭДС  $E_d$ .  $E_d$  формируется управляемым источником напряжения с использованием автоматической системы поддержания заданного тока выпрямительной нагрузки (рисунок 4). Принятый в данной работе способ моделирования в динамике нелинейной выпрямительной нагрузки позволяет автоматически с высокой точностью поддерживать заданные значения тока нагрузки, независимо от уровня напряжения в точке ее подключения.

Суммарная тяговая нагрузка создается в каждой МПЗ тремя управляемыми выпрямительными тяговыми нагрузками по 133 А и двумя нагрузками по 100 А, что соответствует условиям, принятым для моделирования в ПК «КОРТЭС» [8].

В состав модели расчетного участка введем подсистему расчета гармоник (ПРГ), которую будем использовать для расчета гармоник тока ЭПС, гармоник тока тяговых обмоток трансформаторов ТП, гармоник напряжения и коэффициентов  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  в ТОП и других точках схемы (рисунок 5).

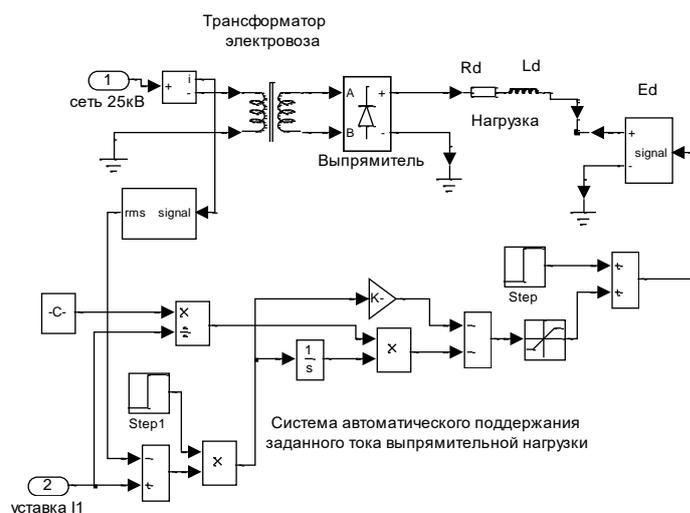


Рис. 4. Модель выпрямительной нагрузки

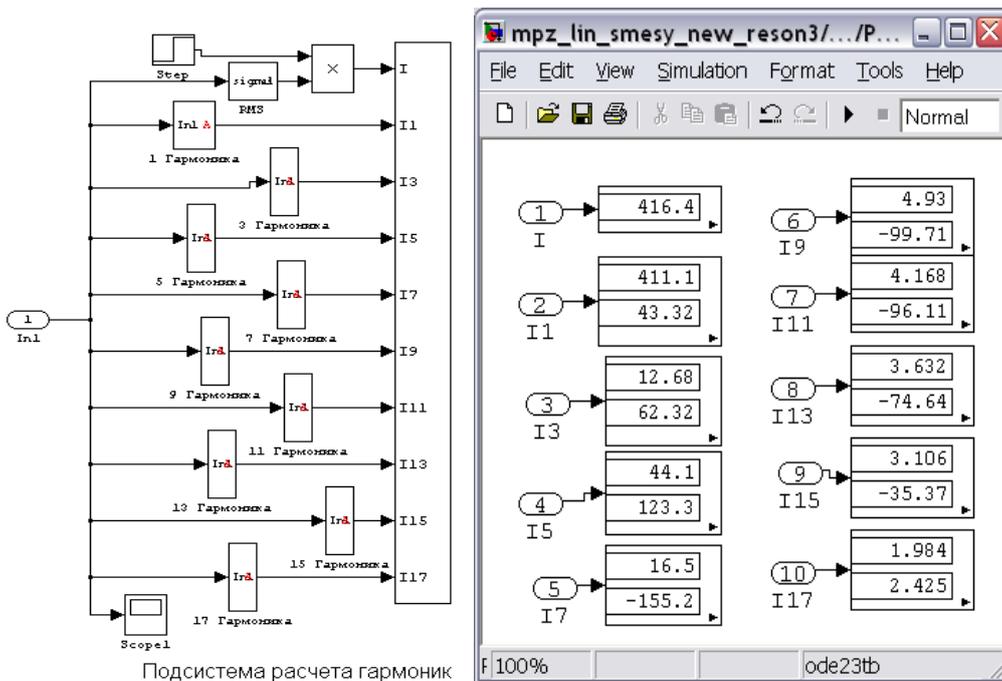


Рис. 5. Подсистема расчета гармоник и окно отображения

### Схема и параметры фильтр-пробки

Фильтр-пробка представляет собой параллельное соединение реактора и конденсатора. Фильтр-пробка включается продольно в плечо питания тяговой подстанции в сторону межподстанционной зоны. На данный момент существует две конфигурации фильтр-пробки: с одночастотной и двухчастотной резонансной настройкой. Два резонансных контура  $L_1C_1$  и  $L_2C_2$  настраиваются на верхнюю резонансную частоту  $f_v = 350$  Гц. Поэтому фильтр в целом имеет высокое сопротивление на этой частоте. На нижней резонансной частоте  $f_n = 250$  Гц каждый из указанных контуров представляет собой эквивалентное индуктивное сопротивление, так как всякий параллельный резонансный контур на частотах ниже резонансной обладает индуктивным сопротивлением, а на частотах выше резонансной - емкостным.

На рисунке 6 приводится принципиальная электрическая схема фильтра-пробки, на рисунке 7 - ее модель, а на рисунке 8 - частотные характеристики.

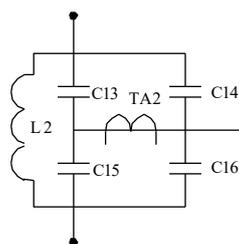


Рис. 6. - Принципиальная электрическая схема фильтра-пробки на 250 Гц

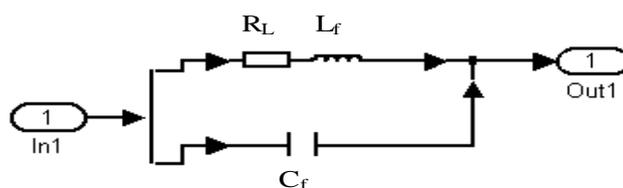


Рис. 7. Модель фильтра-пробки на 250 Гц

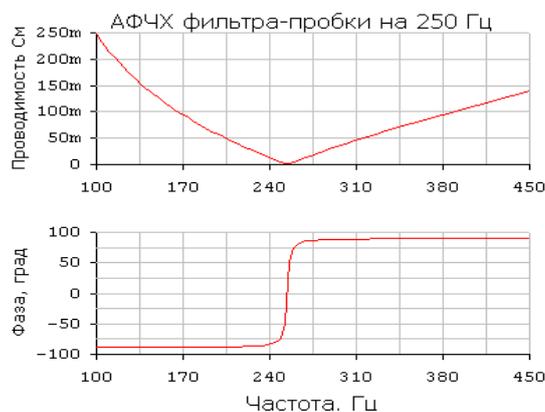


Рис. 8. Частотные характеристики фильтра-пробки на 250 Гц

### Устройство фильтрации и компенсации (УФК)

Устройство фильтрации и компенсации предназначено для компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник в питающей сети.

УФК состоит из блока выключателей ввода (А1), реакторного (L1-L3) и конденсаторного оборудования (С1-С18), резисторов (R1) и модуля аппаратуры управления (А2), аппаратуры измерения (трансформаторы тока и напряжения в составе тяговой подстанции и самого УФК).

Конденсаторная батарея С1-С12 (11,93 мкФ/3,37 МВАр/30 кВ) обеспечивает основную составляющую компенсации реактивной мощности и рассчитана на полное напряжение питающей сети. Реактор L1 (140 А, 22,3 мГн) служит для ограничения токов переходных про-

цессов при коммутации нагрузки. Фильтр-пробка, образованный конденсаторами C13-C16 (72,30 мкФ/ 2,27 МВАр/10 кВ) и реактором L2 (350 А, 11,9 мГн) ограничивает снижение сопротивления УФК в диапазоне 3-5 гармоник.

Фильтр, образованный конденсаторами C17-C18 (361,20 мкФ/ 0,45 МВАр/2 кВ) и реактором L3 (140 А, 28,05 мГн) настроен в резонанс на частоту сети и обеспечивает замыкание реактивной составляющей тока частоты 50Гц, минуя параллельное сопротивление R1 с целью снижения его мощности. Сопротивление R1 вместе с основным реакторным оборудованием и конденсаторными батареями обеспечивает шунтирование гармонических составляющих выше 250 Гц (рисунок 9).

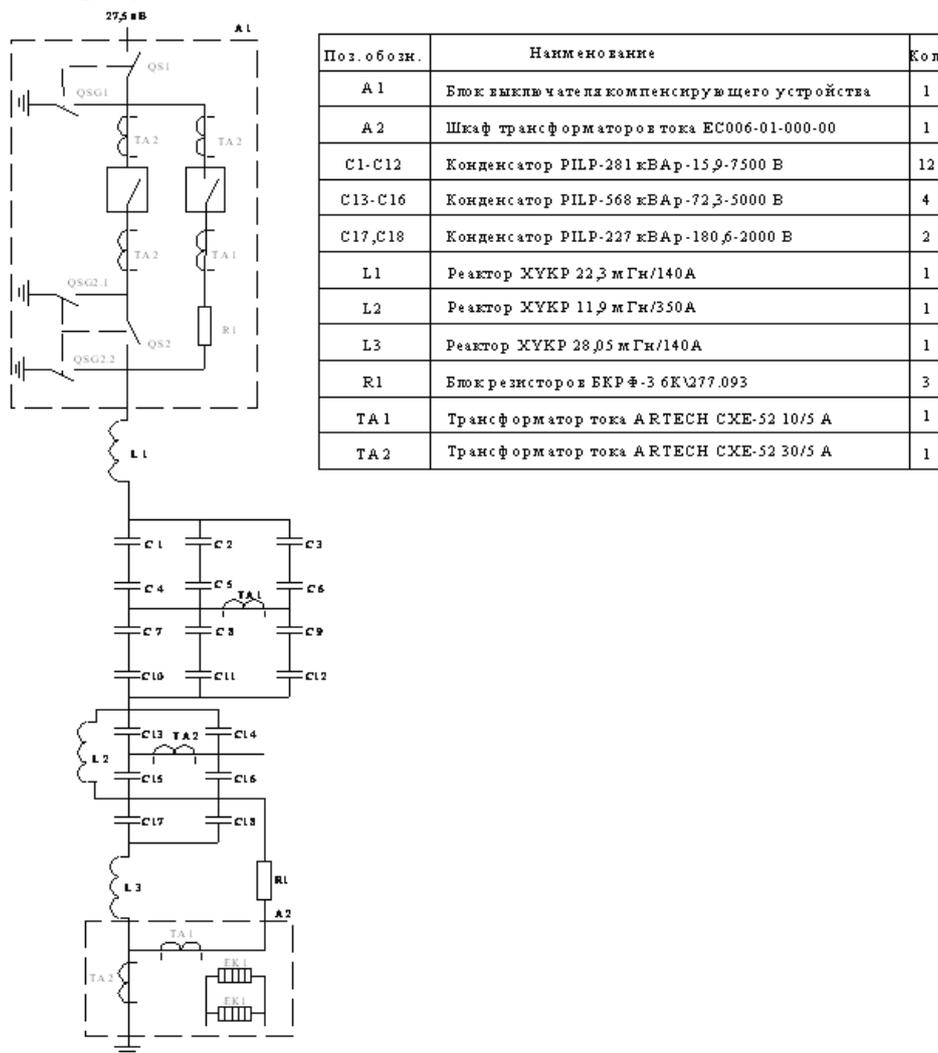


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема УФК

Параметры УФК выбраны таким образом, что суммарное сопротивление всего УФК без резистора R1 обеспечивает фильтрацию третьей гармоники. Таким образом, УФК обеспечивает фильтрацию третьей гармоники аналогично компенсирующим устройствам, а фильтрация более высокочастотных составляющих обеспечивается за счет выбора параметров фильтра.

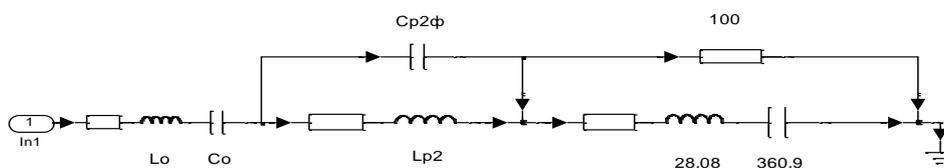


Рис. 10. Модель УФК

Частотные характеристики секции УФК приведены на рисунке 11. По виду частотной характеристики можно сделать вывод, что фильтровые цепи УФК имеют две резонансные частоты 150 Гц и 250 Гц, т.е. рассчитаны на ослабление 3-ей и 5-ой гармоник тока в обмотках тяговых трансформаторов подстанций.

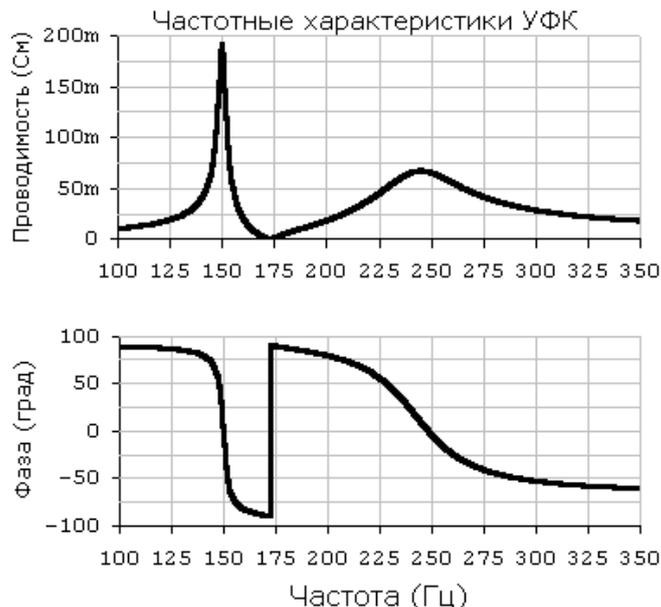


Рис. 11. Частотные характеристики УФК

Вычисления проводились для трех вариантов: без УФК, при включении двух секций УФК и при совместном включении двух секций УФК и фильтра-пробки. В результате имитационного моделирования были получены уровни напряжений на токоприемниках электровозов при движении по исследуемому участку (рисунок 12).

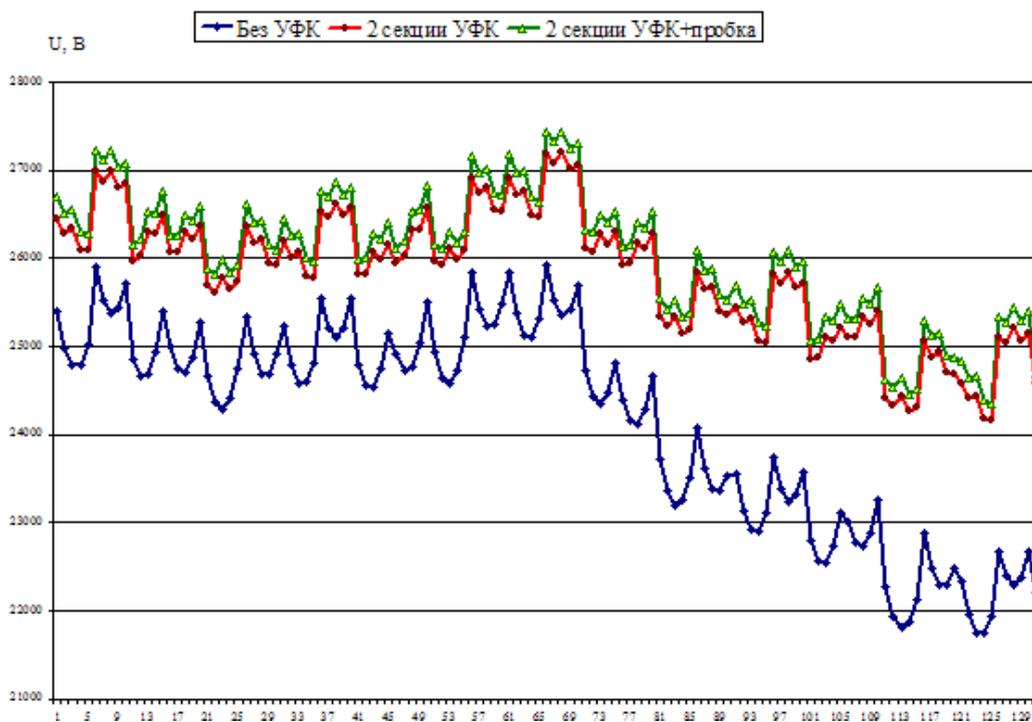
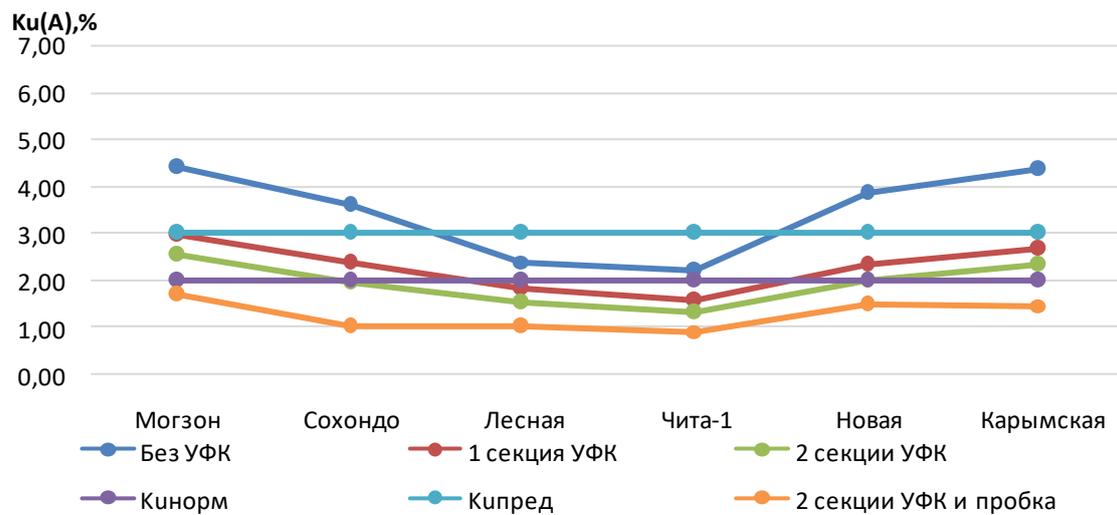


Рис. 12. Уровни напряжения на токоприемнике электровоза при различных вариантах расчета

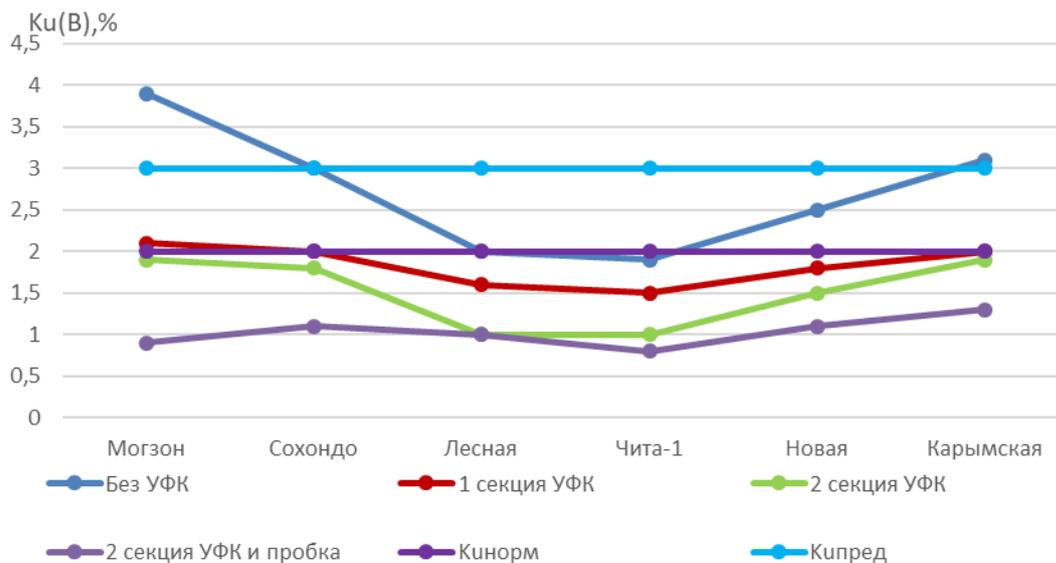
Вычисленные значения коэффициентов искажения кривой напряжения 220 кВ на вводах тяговых подстанций участка Ку приведены в таблице 1 и на диаграммах (рисунки 13-15).

**Таблица 1 - Значения коэффициентов искажения кривой напряжения 220 кВ на вводах ТП участка при суммарном токе в МПЗ 600 А**

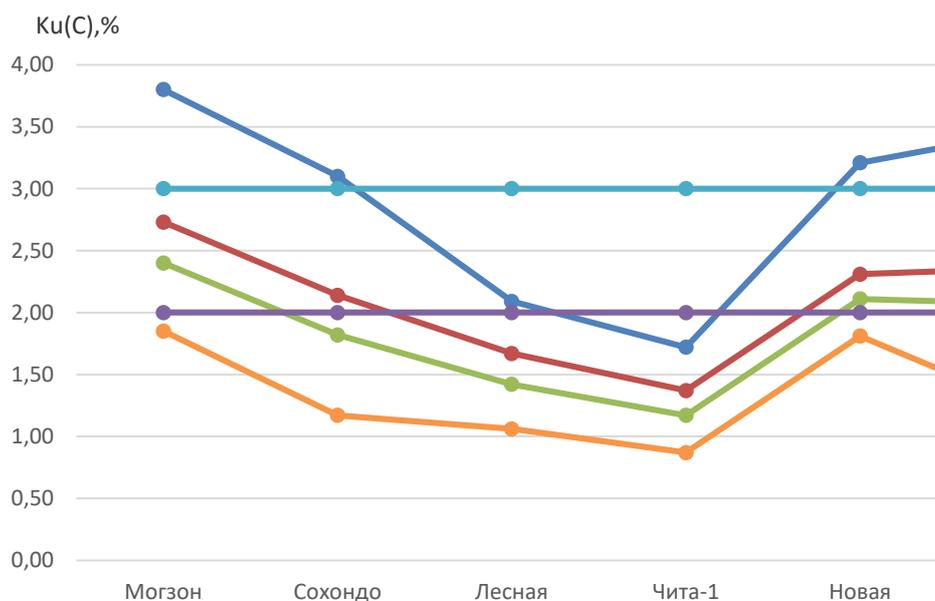
600 А	Без УФК			Фильтр-пробка			2 секции УФК			2 секции УФК и фильтр-пробка		
	ТП	Ku(A)	Ku(B)	Ku(C)	Ku(A)	Ku(B)	Ku(C)	Ku(A)	Ku(B)	Ku(C)	Ku(A)	Ku(B)
Могзон	4,40	3,69	3,80	2,97	2,19	2,73	2,54	1,81	2,40	1,69	0,82	1,85
Сохондо	3,59	3,05	3,10	2,38	2,07	2,14	1,97	1,72	1,82	1,03	1,20	1,17
Лесная	2,40	2,09	2,09	1,83	1,41	1,67	1,54	1,17	1,42	1,03	0,77	1,06
Чита-1	2,20	1,72	1,72	1,56	1,17	1,37	1,32	0,97	1,17	0,91	0,60	0,87
Новая	3,87	2,47	3,21	2,34	1,61	2,31	1,98	1,41	2,11	1,49	0,95	1,81
Карымская	4,36	3,25	3,47	2,68	1,99	2,36	2,33	1,74	2,07	1,46	0,97	1,22



**Рис. 13. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых фазных напряжений для фазы А при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А**



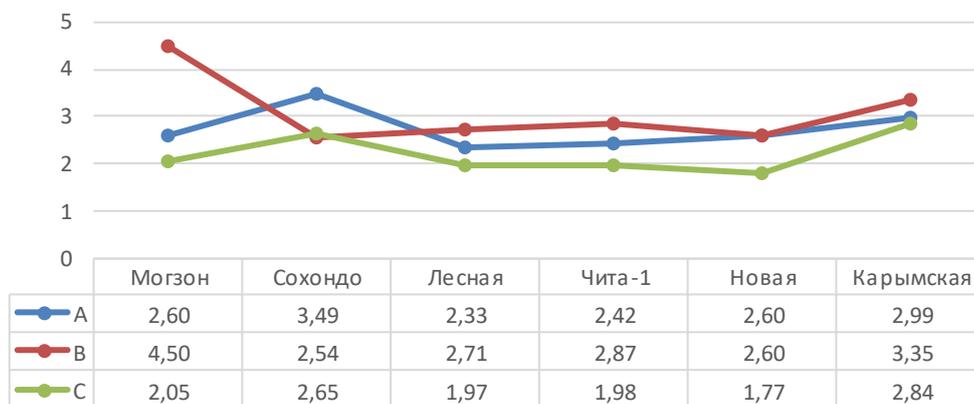
**Рис. 14. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых фазных напряжений для фазы В при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А**



**Рис. 15. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых фазных напряжений для фазы С при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А**

Эффективность УФК оценивается показателем снижения коэффициента искажения синусоидальности, вызванного использованием УФК.

Диаграммы (рисунок 16-18) показывают, во сколько раз снижаются коэффициенты искажения синусоидальности при включении в каждой МПЗ одной / двух секций УФК и двух секций УФК и фильтра-пробки. Включение одной секции УФК приводит к снижению  $K_u$  в некоторых точках системы более чем в 2,5 раза, включение двух секций УФК – более чем в 3,5 раза. При включении двух секций УФК и фильтра-пробки  $K_u$  снижается более чем в 8 раз.



**Рис. 16. Показатели снижения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения  $K_u$  при включении одной секции УФК при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А**

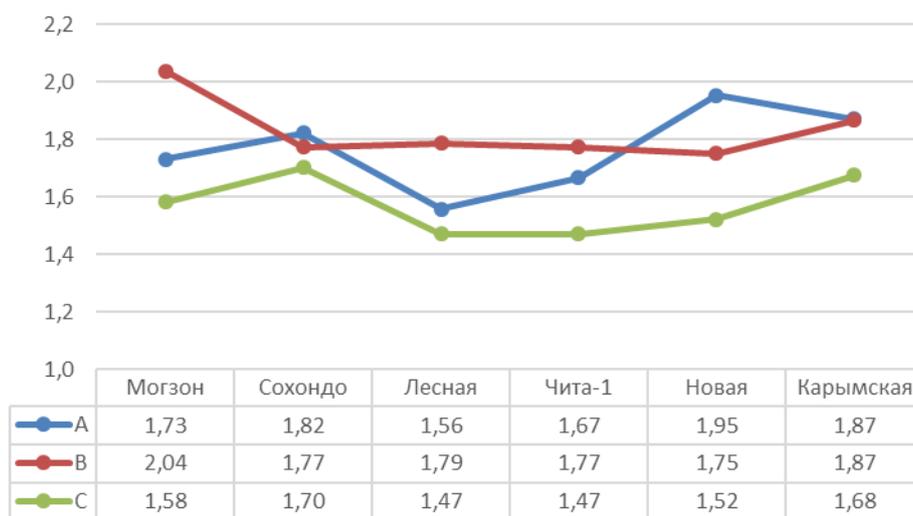


Рис. 17. Показатели снижения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения  $K_u$  при включении двух секций УФК при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А

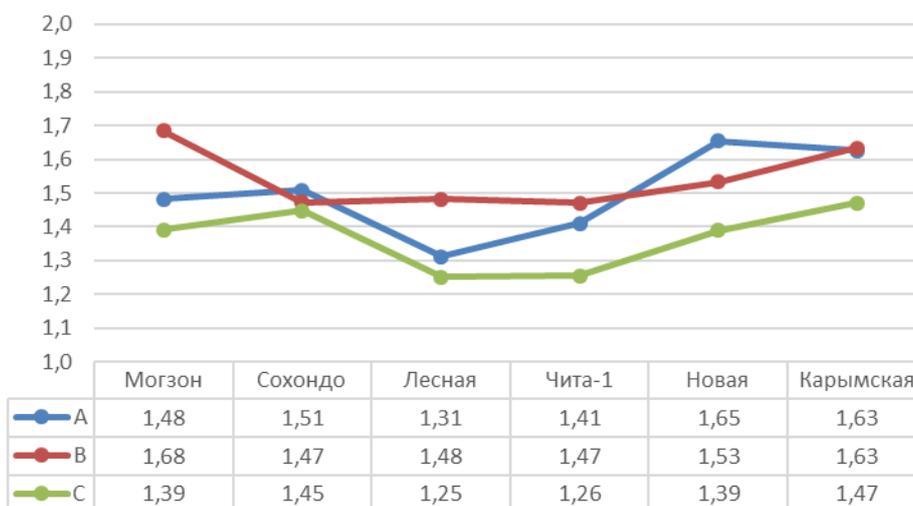


Рис. 18. Показатели снижения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения  $K_u$  при включении двух секций УФК и фильтра-пробки при суммарных токах ЭПС в МПЗ 600 А

Эффективность одной секции УФК по снижению коэффициентов 5-ой гармонической составляющей в напряжениях на высокой стороне тяговых трансформаторов уступает показателям эффективности по снижению 3-ей гармонической составляющей. Дополнительный эффект от включения в параллель двух секций также невелик. Максимальное снижение  $K_u(5)$  наблюдается при добавлении фильтра-пробки, в фазе А до величины 1,24%, в фазе В до 0,97%, в фазе С до 1,36%, при этом все значения  $K_u(5)$  по участку находятся в пределах нормально допустимого.

### Заключение

На базе программных средств визуального моделирования пакета Matlab разработаны обобщенная модель системы тягового электроснабжения и дана оценка исследования на этой модели несинусоидальных режимов, эффективность устройств фильтрации и компенсации, предназначенных для нормализации показателей качества электроэнергии по синусоидальности.

Применение УФК положительно влияет на снижение значений  $K_u(7)$ , но эффективность подавления токов 7-ой гармоники существенно меньше, чем для 3-ой и 5-ой гармоник. Значительного снижения  $K_u$  можно добиться включением по краям МПЗ при включенных двух секциях УФК фильтра-пробки на 250 Гц.

Предложено техническое решение о совместном использовании УФК (устройства фильтрации и компенсации) и ФП (фильтр-пробки) на примере ТП Новая, позволяющее снизить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения до нормально допустимых значений, что подтверждается результатами имитационного моделирования.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. НОРМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. Дата введения 01.01.1999 г.

2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. НОРМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Дата введения 07.01.2014 г.

3. ГОСТ Р 51559-2000. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ МАСЛЯНЫЕ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 110 И 220 кВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЕМ 27,5 кВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Общие технические условия. General-purpose oil-immersed power transformers of 110 and 220 kV and autotransformers of 27,5 kV for electric a.c. railways. General specifications. Дата введения 01.01.2001 г.

4. ГОСТ Р 57659-2017. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В ЦЕЛЯХ ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННОГО СРОКА СЛУЖБЫ. Часть 1. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Дата введения 14.09.2017 г.

5. Востриков, М. В. Оценка влияния показателей качества электрической энергии на тягу поездов на примере участка Чита - Сохондо / М. В. Востриков, Л. А. Муравейко, Е. А. Морозов // Образование - наука - производство : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Чита, 07 октября 2021 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2021. – С. 81-87. – EDN IWYARD.

6. Раздобреева, А. А. Способ комплексной оценки текущего состояния и мониторинга остаточного ресурса тяговых трансформаторов на Забайкальской железной дороге с использованием современных технических подходов / А. А. Раздобреева, М. В. Востриков, В. А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. – 2022. – № 2(16). – С. 118-130. – EDN MKGUIS.

7. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

8. Комплекс расчётов тягового электроснабжения. Общее руководство пользователя. – М.: ВНИИЖТ, 2003. – 12 с.

### **REFERENCES**

1. GOST 13109-97. Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. STANDARDS FOR THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN GENERAL-PURPOSE POWER SUPPLY SYSTEMS. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. Date of introduction 01.01.1999

2. GOST 32144-2013. Interstate standard. Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. STANDARDS FOR THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN GENERAL-PURPOSE POWER SUPPLY SYSTEMS. Electric energy. Electromagnetic compatibil-

ity of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Date of introduction 07.01.2014

3. GOST R 51559-2000. THE STATE STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. Oil POWER TRANSFORMERS OF VOLTAGE classes 110 and 220 kV and autotransformers WITH voltage OF 27.5 kV FOR AC ELECTRIC RAILWAYS. General technical conditions. General-purpose oil-immersed power transformers of 110 and 220 kV and autotransformers of 27,5 kV for electric a.c. railways. General specifications. Date of introduction 01.01.2001

4. GOSTR 57659-2017. NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. METHODS OF TESTING RAILWAY TRANSPORT FACILITIES IN ORDER TO EXTEND THE ASSIGNED SERVICE LIFE. Part 1. Power transformers and autotransformers of traction substations, transformer substations and linear traction power supply devices of the railway. Date of introduction 14.09.2017

5. Vostrikov, M. V. Assessment of the impact of electric energy quality indicators on train traction on the example of the Chita - Sokhondo section / M. V. Vostrikov, L. A. Muraveyko, E. A. Morozov // Education - science - production : Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation), Chita, October 07, 2021. – Chita: Zabaikalsky Institute of Railway Transport - branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Irkutsk University of Railways", 2021. – pp. 81-87. – EDN IWYARD.

6. Razdobreeva, A. A. A method for a comprehensive assessment of the current state and monitoring of the residual resource of traction transformers on the Trans-Baikal Railway using modern technical approaches / A. A. Razdobreeva, M. V. Vostrikov, V. A. Tikhomirov // Molodaya nauka Sibiri. – 2022. – № 2(16). – Pp. 118-130. – EDN MKGUIS.

7. Diakonov V. P. MATLAB. Complete tutorial. – M.: DMK Press, 2012. – 768 p.: ill.

8. Complex of calculations of traction power supply. General user manual. – M.: VNIIZhT, 2003. – 12 p.

#### **Информация об авторах**

*Морозов Егор Андреевич* – студент группы СОД.1-19-1, факультет очного обучения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: [2002morozov@bk.ru](mailto:2002morozov@bk.ru)

*Фареньк Владислав Владимирович* – студент группы СОД.1-19-1, факультет очного обучения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: [xdfive@bk.ru](mailto:xdfive@bk.ru)

*Востриков Максим Викторович* – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: [vostrikov\\_m@zab.megalink.ru](mailto:vostrikov_m@zab.megalink.ru)

*Тихомиров Владимир Александрович* - к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [tihomirov\\_va@irgups.ru](mailto:tihomirov_va@irgups.ru)

#### **Information about the authors**

*Morozov Egor Andreevich* - student of the group SOD. 1-19-1, Faculty of Full-time Education, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: [2002morozov@bk.ru](mailto:2002morozov@bk.ru)

*Farenik Vladislav Vladimirovich* - student of the group SOD. 1-19-1, Faculty of Full-time Education, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: [xdfive@bk.ru](mailto:xdfive@bk.ru)

*Vostrikov Maxim Viktorovich* - Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: [vostrikov\\_m@zab.megalink.ru](mailto:vostrikov_m@zab.megalink.ru)

*Tikhomirov Vladimir Aleksandrovich* - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Electric Power Engineering of Transport", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [tihomirov\\_va@irgups.ru](mailto:tihomirov_va@irgups.ru)