

## Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки

И.С. Овечкин, Е.Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

На сегодняшний день в системах электроснабжения устройств автоблокировки часто фиксируется несоответствие показателей качества электроэнергии требованиям нормативной документации. Усугубляется данная проблема и тем, что к концу 2024 г. на участках Восточного полигона запланирована установка системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями в микропроцессорных шкафах – АБТЦ-МШ. Так как данная система построена на микропроцессорной базе, которая крайне чувствительна к качеству электроэнергии, то возникает вероятность отказов, что приведет к простоям поездов, а это является недопустимым. В статье описываются системы электроснабжения устройств автоблокировки одного из участков Восточного полигона. Представлены результаты замеров показателей качества электроэнергии на двух постах электрической централизации исследуемого участка. Выявлено несоответствие измеренных показателей требованиям стандарта. Произведена разработка модели системы электроснабжения устройств автоблокировки указанного участка в программно-вычислительном комплексе Fazonord. Модель призвана упростить процесс анализа отклонений показателей качества электроэнергии от допустимых значений и ускорить процесс подготовки технических решений по уменьшению данных отклонений. В работе уделяется особое внимание несинусоидальности напряжения на стороне низкого напряжения 0,4 кВ, к которой непосредственно через понижающие трансформаторы подключаются потребители автоблокировки и оборудование АБТЦ-МШ. Проведен анализ возможных мероприятий по снижению несинусоидальности, аргументирован выбор использования активных фильтров гармоник, показаны результаты моделирования до и после установки активных фильтров гармоник и сделаны соответствующие выводы об эффективности их применения.

### Ключевые слова

несинусоидальность напряжения, активные фильтры гармоник, устройства автоблокировки, АБТЦ-МШ, качество электроэнергии

### Для цитирования

Овечкин И.С. Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки / И.С. Овечкин, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 112–123. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 07.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2023 г.; принята к публикации: 18.09.2023 г.

## Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines supplying automatic blocking devices

I.S. Ovechkin, E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

At the moment, in the power supply systems of automatic blocking devices, a discrepancy between power quality indicators and the regulatory documentation requirements is often recorded. This problem is aggravated by the fact that by the end of 2024, in sections of the Eastern Polygon the installation of an automatic locking system with tone track circuits in microprocessor cabinets - ABTC-MSh is planned. Since this system is built on a microprocessor base which is extremely sensitive to the quality of electricity, there is a possibility of failures resulting in train downtime which is unacceptable. The article describes the power supply system for automatic blocking devices of one of the sections of the Eastern Polygon. The results of measurements of power quality indicators at two electrical centralization posts of the study area are presented. A discrepancy between the measured indicators and the requirements of the standard was revealed. A model of the power supply system for automatic blocking devices of the study area was developed in the program-calculating complex Fazonord. The model is designed to simplify the process of analyzing deviations of power quality indicators from acceptable values and speed up the process of developing technical solutions to reduce deviations in problematic indicators. In this work, the bias is made towards analyzing the non-sinusoidal voltage on the low voltage side of 0,4 kV, to which

automatic blocking consumers and ABTC-MSh equipment are connected directly through step-down transformers. An analysis of possible measures to reduce non-sinusoidality was carried out. A reasoned choice was made to use active harmonic filters. The simulation results before and after installation of the active harmonic filters are presented. Appropriate conclusions have been drawn about the effectiveness of using active harmonic filters.

### Keywords

non-sinusoidal voltage, active harmonic filters, automatic blocking devices, ABTTs-MSh, electricity quality

### For citation

Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po umen'sheniyu iskazheniya sinusoidal'nosti krivoi napryazheniya vozduzhnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines feeding automatic blocking devices]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 112–123. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.

### Article info

Received: September 7, 2023; Revised: September 15, 2023; Accepted: September 18, 2023.

### Введение

Тяговые подстанции (ТП) обеспечивают электропитание как тяговых, так и нетяговых потребителей. Последние в свою очередь делятся на железнодорожных и нежелезнодорожных потребителей.

К наиболее ответственным железнодорожным потребителям относятся устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), которые необходимы для обеспечения безопасно и бесперебойного движения поездов.

Анализ статистики железнодорожных сетей России показывает, что каждый год из-за отказов в системе электроснабжения сигнальных точек возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов [1]. Это подчеркивает актуальность проблемы повышения надежности системы электроснабжения для устройств автоблокировки и указывает на необходимость улучшения качества поставляемой электроэнергии. Особенно остро данная проблема проявляется при увеличении масс перемещающихся поездов и снижении межпоездного интервала движения [2–6].

Для уменьшения искажений гармонического спектра напряжений в системах электроснабжения железных дорог переменного тока авторы технических решений рекомендуют применять следующие устройства:

- фильтры высших гармоник и фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), являющиеся традиционными средствами ограничения уровня гармоник;
- активные кондиционеры или фильтры гармоник (АКГ или АФГ);
- гибридные фильтры, представляющие собой комбинацию АКГ и ФКУ [7–14].

Опыт применения ФКУ показывает, что решить проблему ограничения высших гармоник с использованием только традиционных пассивных фильтров весьма сложно [7]. Прогресс в области силовой электроники и появление автономных инверторов, основанных на силовых модулях IGBT, стимулировали развитие нового направления в технологии фильтрации высших гармоник. Это привело к созданию АФГ.

Для более детального рассмотрения вопроса анализа эффективности мероприятий по уменьшению несинусоидальности напряжения в исследуемых системах электроснабжения необходимо применение достоверных математических моделей с корректным методом моделирования. Данная задача может быть решена с помощью применения компьютерного моделирования на основе подходов, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения [15].

В работе представлены модели участков Восточного полигона с имеющимися проблемами в области качества электроэнергии, что подтверждается экспериментальными исследованиями, выполненными специалистами одной из электротехнических лабораторий Восточного полигона (ЭЛ ВП). Далее приведены результаты моделирования исследуемой системы электроснабжения при использовании мероприятий по уменьшению несинусоидальности напряжения.

### Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии, выполненные специалистами электротехнической лаборатории

На рис. 1 и в табл. 1, 2 приведены результаты измерения показателей качества электри-

ческой энергии, полученные на постах электрической централизации (ЭЦ) для станций ДЛ и ЗМ специалистами одной из ЭЛ ВП.

На рис. 1 пределы изменения напряжения приведены с помощью измерительного оборудования к временному отрезку, характеризующимся максимальным влиянием высших гармоник.

По замерам показателей качества электроэнергии можно сделать вывод, что имеет место искажение синусоиды напряжения на посту ЭЦ станции ЗМ (рис. 1). Отрицательное медленное отклонение напряжения на посту ЭЦ станции ДЛ для всех трех фаз в течение 100 % времени измерения выходит за допустимый предел  $-10\%$  [16] и составляет от  $-14,1$  до  $-15\%$ .

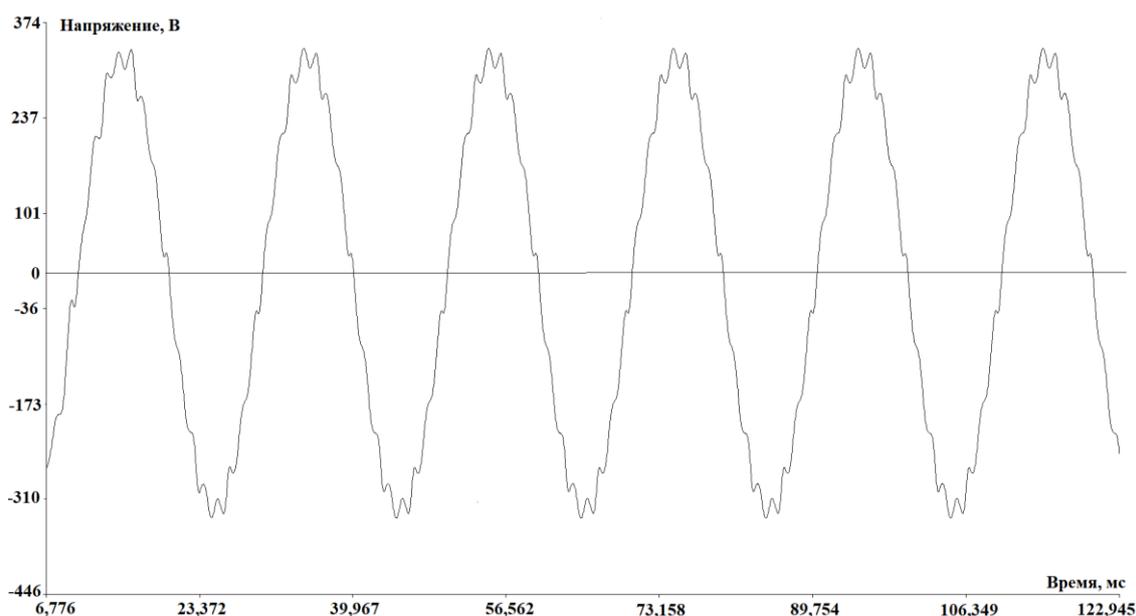


Рис. 1. Осциллограмма напряжения на посту электрической централизации на станции ЗМ  
Fig. 1. Voltage oscillogram at the electrical centralization post at the ZM station

Таблица 1. Значения медленного изменения напряжения на посту электрической централизации на станции ДЛ  
Table 1. Values of slow voltage change at the electrical centralization post at the DL station

Фаза Phase	Время измерения, % Measurement time, %	Пороговое нижнее значение, В/% Threshold lower value, V/%	Пороговое верхнее значение, В/% Threshold upper value, V/%
А	100	189 / $-14,1$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$
В	100	187 / $-15,0$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$
С	100	189 / $-14,1$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$

Таблица 2. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в течение 100% времени измерения на посту электрической централизации на станции ДЛ

Table 2. Total harmonic voltage coefficient values for 100% measurement time at the electrical centralization post at the DL station

Фаза Phase	Значение, % Value, %		
	Минимальное Minimum	Среднее Medium	Максимальное Maximum
А	4,9	7,488	10,2
В	7,5	11,719	15,6
С	11,5	14,869	18,2

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в течение 100 % времени измерения на посту ЭЦ станции ДЛ для напряжений фаз В и С превышают допустимый предел 12 % [16] и равны 15,6 и 18,2 % соответственно.

### **Разработка модели системы электроснабжения устройств автоблокировки**

Для проведения исследования режимов работы системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД) требуется разработать модели для отдельных компонентов, таких как линии электропередачи, контактная сеть, силовые трансформаторы, устройства компенсации реактивной мощности и прочие элементы. Кроме того, необходимо создать алгоритм, который определит взаимодействие между этими компонентами.

1. Для моделирования линий электропередачи нужно учесть их электрические параметры, геометрию, длину и тип проводов, а также потери энергии при ее передаче.

2. Модель контактной сети должна включать в себя геометрические характеристики, материал контактов и учитывать влияние движения поездов на ее работу.

3. Для силовых трансформаторов следует создать математические модели, учитывающие их эффективность и характеристики, а также потери мощности.

4. Устройства компенсации реактивной мощности требуют наличие моделей, описывающих их функциональность и влияние на сеть.

5. Алгоритм взаимодействия поможет определить, как каждый из компонентов будет функционировать в реальном времени, чтобы обеспечить стабильное и надежное электроснабжение железной дороги в различных режимах работы.

Эти модели и алгоритм взаимодействия будут служить основой для исследования и оптимизации работы СЭЖД.

Для выполнения этих задач создан программно-вычислительный комплекс (ПВК) Fazonord.

С помощью ПВК Fazonord разработана модель одного из участков системы электроснабжения Восточного полигона, которая с допустимой точностью описывает все процессы, протекающие в электрических сетях [15].

На рис. 2 представлен фрагмент разрабо-

танной модели, на котором изображена система внешнего тягового и нетягового электроснабжения. В системе внешнего электроснабжения электроэнергия передается по воздушным линиям (ВЛ) 110–220 кВ. Для дополнительного отбора мощности из ВЛ 220 кВ в ВЛ 110 кВ используется автотрансформатор. В данном случае это трансформатор марки АДЦТН-250000/220/110-У1. Питание тяговой сети осуществляется от ВЛ 110 кВ через силовой трансформатор марки ТДТНЖ-40000/110/27,5 У1.

В качестве нетяговых потребителей выступают устройства СЦБ, подключенные через понижающие трансформаторы к ВЛ СЦБ 6 кВ и ВЛ продольного электроснабжения (ВЛ ПЭ) 10 кВ. Основное питание организовано от ВЛ СЦБ 6 кВ. ВЛ ПЭ 10 кВ является резервной.

На рис. 2 слева отображено питание ВЛ СЦБ 6 кВ и ВЛ ПЭ 10 кВ от районного трансформатора. Питание ВЛ СЦБ 6 кВ осуществляется от районного трансформатора, в данном примере ТДТН-20000/110/35/10, далее от распределительных устройств (РУ) 10 кВ осуществляется трансформация по уровню напряжения 10/0,23 кВ с помощью трансформатора ТМ-400/10/0,23 с дальнейшим повышением 0,23/6 кВ благодаря трансформатору СЦБ ТМ-320/0,23/6. Затем с помощью фидера СЦБ «Восток» напряжение подается в линию СЦБ 6 кВ, выполненную проводом АС-50.

Кроме того, на рис. 2 справа изображено питание ВЛ СЦБ 6 кВ от тягового трансформатора. Данная часть модели отличается от предыдущей тем, что питание ВЛ 6 кВ и ВЛ 10 кВ осуществляется от тягового трансформатора ТДТНЖ-40000/110/27,5/35 и тем, что напряжение к РУ 10 кВ подается от РУ 35 кВ через трансформатор ТМ-4000/35/10.

### **Результаты исследования показателей качества электроэнергии**

Основной целью на данном этапе явилась оценка показателей качества электроэнергии в существующей системе электроснабжения устройств СЦБ с помощью разработанной модели, а именно, коэффициентов гармонических составляющих напряжения и их суммарного коэффициента при питании устройств автоблокировки от ВЛ 6 кВ.

Полученные результаты расчета представлены в табл. 3 и 4.

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения оценены только для тех гармоник напряжения, для которых их величины превышают нормативные значения [16].

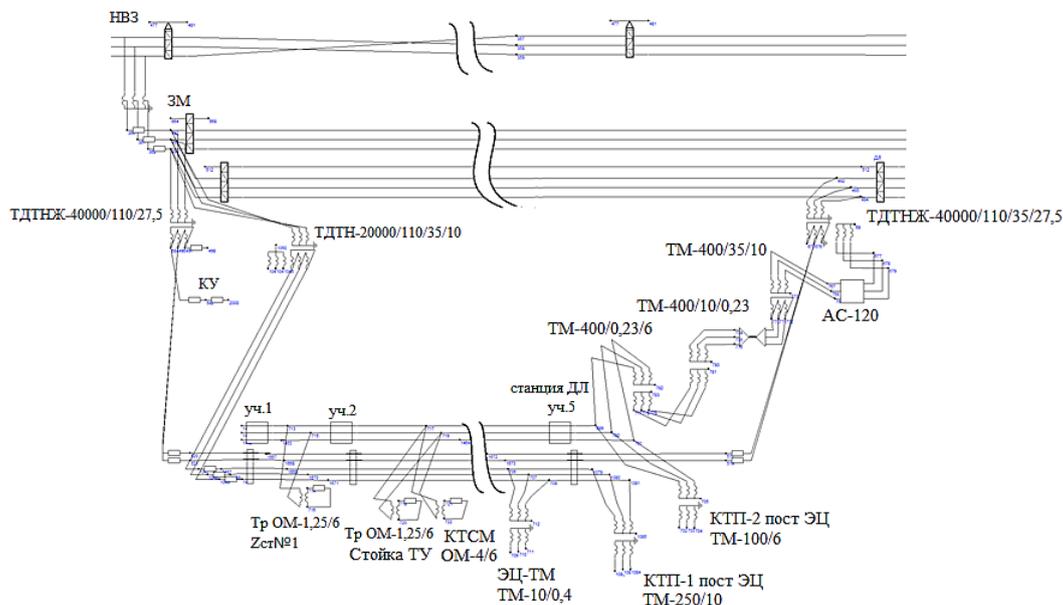


Рис. 2. Фрагмент модели системы внешнего тягового электроснабжения и электроснабжения устройств автоблокировки

Fig. 2. Fragment of the model of external traction power supply system and power supply of automatic blocking devices

Таблица 3. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U(n)$   
Table3. Values of the coefficients of harmonic voltage components  $K_U(n)$

Объект Object	Фаза Phase	№ гармоники №of harmonic	Нормативное значение $K_U(n)$ , % Normative value $K_U(n)$ , %		Рассчитанное значение $K_U(n)$ , % Calculated value $K_U(n)$ , %		
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	
ЭЦ-ТМ1	A	3	5,0	7,50	5,54	6,96	
		13	3,0	4,50	4,61	6,25	
		15	0,3	0,45	1,15	1,50	
	B	13	3,0	4,50	5,10	7,78	
		15	0,3	0,45	1,09	1,63	
		3	5,0	7,50	8,17	10,18	
ЭЦ-ТМ2	C	7	5,0	7,50	1,40	1,70	
		11	3,5	5,25	4,45	4,99	
		13	3,0	4,50	9,07	10,76	
	КТП-2	A	15	0,3	0,45	1,08	1,24
			3	5,0	7,50	5,46	6,85
			13	3,0	4,50	4,15	5,61
КТП-2	B	15	0,3	0,45	1,01	1,32	
		13	3,0	4,50	4,60	7,01	
		15	0,3	0,45	0,96	1,44	
	C	3	5,0	7,50	8,07	10,05	
		13	3,0	4,50	8,15	9,67	
		15	0,3	0,45	0,94	1,09	
КТП-1	A	3	5,0	7,50	5,50	6,90	
		9	1,5	2,25	0,47	0,68	

	B	13	3,0	4,50	4,26	5,76	
		15	0,3	0,45	1,04	1,36	
		13	3,0	4,50	4,74	7,22	
		15	0,3	0,45	1,00	1,49	
		C	3	5,0	7,50	8,12	10,12
			11	3,5	5,25	4,20	4,71
	13		3,0	4,50	8,39	9,93	
	ЭЦ-ТМЗ	A	15	0,3	0,45	0,97	1,12
			3	5,0	7,50	5,17	6,41
11			3,5	5,25	2,34	3,27	
13			3,0	4,50	5,59	7,53	
B		15	0,3	0,45	1,46	2,01	
		13	3,0	4,50	7,52	11,39	
C		15	0,3	0,45	0,96	1,34	
		3	5,0	7,50	5,50	6,91	
		11	3,5	5,25	4,68	6,38	
		13	3,0	4,50	11,75	13,68	
			15	0,3	0,45	1,46	1,70

Таблица 4. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ Table 4. Values of the total harmonic voltage coefficient  $K_{U(n)}$ 

№	Объект Object	Фаза Phase	Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
1	ЭЦ-ТМ1	A	8,54	10,90
		B	6,13	7,84
		C	12,20	14,73
2	КТП-2	A	8,24	10,36
		B	6,08	7,80
		C	11,37	13,90
3	КТП-1-4969 км	A	8,35	10,52
		B	7,45	11,14
		C	11,59	14,12
4	ЭЦ-ТМЗ	A	8,64	11,43
		B	9,25	13,23
		C	13,97	15,73

Из результатов, представленных в табл. 4, видим, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения превышает как допустимое значение 8 %, так и предельное значение 12 % [16].

На основании несоответствия показателей качества электроэнергии допустимым значениям, регламентируемых ГОСТ 32144–2013, необходимо разработать комплекс мероприятий, обеспечивающих достижение проблемных показателей нормативных значений.

#### Разработка мероприятий по уменьшению коэффициентов гармонических составляющих напряжения

Как отмечено ранее, с целью приближения

искаженной кривой тока к синусоидальной форме в СЭЖД переменного тока возможно использовать такие устройства, как фильтры высших гармоник и ФКУ; АКГ или АФГ; гибридные фильтры на базе совмещения АКГ и ФКУ.

Анализ имеющегося опыта применения указанных устройств и развитие силовой электроники в сочетании с разработкой автономных инверторов с использованием силовых модулей IGBT позволили создать так называемые гибридные фильтры. Такие устройства сочетают в себе положительные характеристики автономного инвертора на модулях IGBT и пассивного фильтра и называются АКГ или АФГ.

В дальнейшем рассматривается применение АФГ как наиболее перспективного и эф-

фективного технического решения для улучшения коэффициента гармонического искажения.

На рис. 3 представлен активный фильтр гармоник SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20 компании ООО «Миркон» (Россия).



**Рис. 3.** Внешний вид активного фильтра гармоник SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20

**Fig. 3.** Appearance of active harmonic filter SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20

Данный модуль имеет несколько режимов компенсации: гармонический, реактивный и трехфазный дисбаланс.

Компенсирующая способность для них может устанавливаться с целью комплексного решения проблемы качества питания на стороне распределения низкого напряжения.

Модуль обладает возможностью:

- фильтровать от 2 до 50 гармоник одновременно, а также может фильтровать от 2 до 50 гармоник определенного порядка в соответствии с настройкой;
- динамически и плавно компенсировать индуктивную и емкостную реактивную мощность, а коэффициент мощности системы после компенсации составляет 0,99.

После компенсации в пределах номинальной мощности, дисбаланс токов трехфазной активной нагрузки системы составляет менее 5 %.

Работа модуля характеризуется следующими особенностями:

- быстрый отклик;
- высокая управляемость;
- функция автоматического ограничения тока;
- отсутствие перегрузки.

Имеется возможность подключения и управления несколькими аналогичными устройствами параллельно в соответствии с изменившимися фактическими требованиями.

Есть множество функций защиты от перегрузки по току, перенапряжения, перегрева, ошибки последовательности фаз, от потери фазы и т.д.

Интерфейсы связи включают в себя стандартные интерфейсы RS485 и CAN, которые могут быть сконфигурированы для реализации обмена информацией с другим оборудованием блока, а модуль проводной/беспроводной связи также может быть сконфигурирован для удаленного мониторинга данных.

Для более наглядного отображения структуры АФГ на рис. 4 условно изображена силовая цепь одной фазы. Активный фильтр гармоник содержит следующие основные части:

- IGBT-преобразователь;
- устройство управления и контроля;
- блок защиты и «мягкого» пуска;
- токовые датчики.

Трехфазный преобразователь построен на IGBT-транзисторах, коммутируемых с тактовой частотой 16 кГц. Также в его состав входят два конденсатора С1, С2 и линейные дроссели (Др1). В состав устройства управления и контроля входят блоки:

- анализа гармоник тока;
- установки номеров компенсируемых гармоник;
- управления преобразователем и мониторинга.

На анализатор гармоник поступают сигналы с быстродействующих датчиков тока нагрузки (ДТ1) и тока АФГ (ДТ2). Блок защиты и «мягкого» пуска содержит быстродействующие предохранители и с помощью контактора и балластного сопротивления обеспечивает плавный заряд конденсаторов С1, С2 в период включения АФГ.

Принцип работы АФГ заключается в следующем: устройство управления и контроля мощностью использует процессор для измерения мощности, потребляемой нелинейной нагрузкой, и вычисляет параметры гармоник тока нагрузки в реальном времени. Затем с помощью IGBT-ключей это устройство добавляет компоненты тока фазы в сеть электроснабжения, чтобы обеспечить чистую синусоидальную форму кривых напряжения и тока в системе электроснабжения.

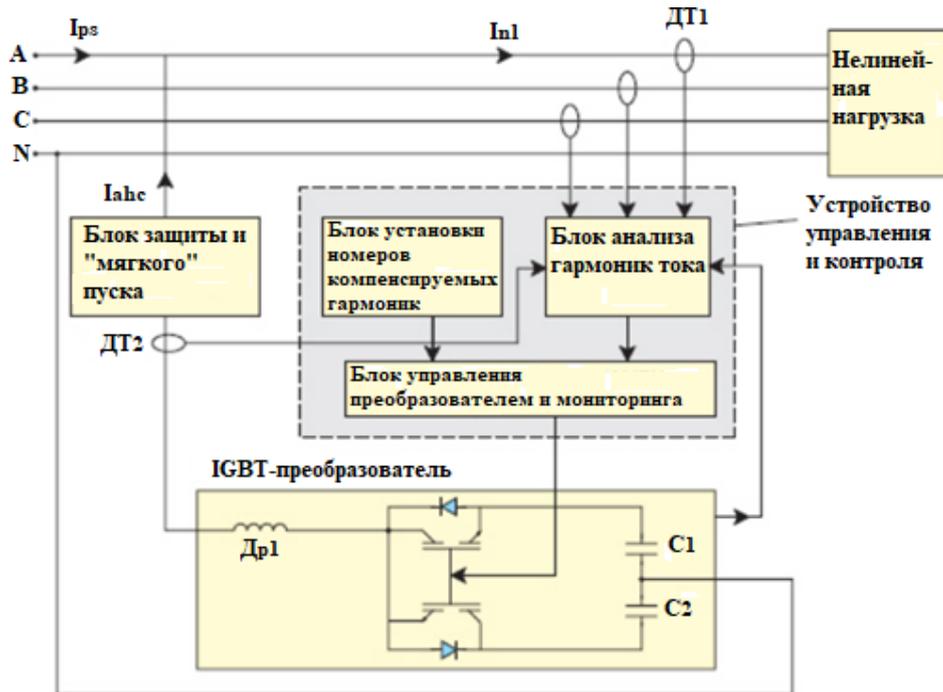


Рис. 4. Структурная схема активного фильтра гармоник  
Fig. 4. Block diagram of an active harmonic filter

Основное свойство АФГ заключается в подавлении высших гармоник в точке е установки, и это свойство может быть промоделировано с использованием идеализированных моделей в ПВК Fazonord. Сведение к нулю значения напряжения высшей гармоники в месте подключения АФГ дает положительный эффект в виде отсутствия дополнительных резонансов, которые могли бы возникнуть при использовании пассивных фильтров.

На рис. 5 приведена модель АФГ, которая приводит к подавлению высших гармоник и при этом практически не вносит дополнительных реактансов в расчетную схему.

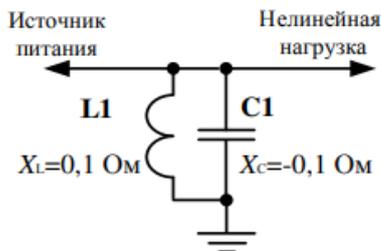


Рис. 5. Модель активного фильтра гармоник  
Fig. 5. Active harmonic filter model

Фильтр-пробка L1, C1 создает значительное сопротивление для тока частотой 50 Гц и малое сопротивление для токов высших гармо-

ник. Так, для третьей гармоники сопротивление цепи сводится к величине порядка всего лишь –  $j0,04 \text{ Ом}$ , что позволяет предотвратить дополнительные паразитные резонансы. Реактанс RL-элементов фильтра-пробки должен быть нулевым. Согласно [15], для решения системы уравнений установившегося режима может быть применен только метод Гаусса, поскольку матрица Якоби, применяемая в методе Ньютона, становится вырожденной. Так как активное сопротивление RL-элементов фильтра будет нулевым, то при вычислении матрицы Якоби часть коэффициентов системы уравнений также станет равной нулю, вследствие чего определитель (якобиан) равен нулю. Следовательно, система не имеет решения.

Решить эту проблему позволяет метод Гаусса, где с помощью умножения уравнений на соответствующие коэффициенты с дальнейшим вычитанием или сложением уравнений появляется возможность определить неизвестные переменные, не прибегая к вычислению определителя.

Для кардинального решения вопроса не-синусоидальности необходима установка АФГ в контактной сети [17].

На рис. 6 представлена разработанная авторами модель АФГ в ПВК Fazonord.

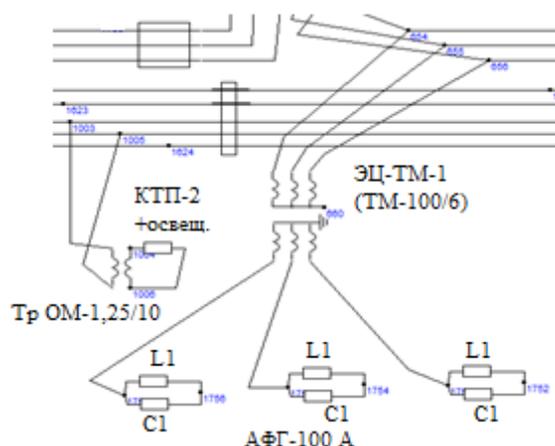


Рис. 6. Модель активного фильтра гармоник в Fazonord

Fig. 6. Active harmonic filter model in Fazonord

На рис. 6  $L1 = 0,1$  Ом, а  $C1 = -0,1$  Ом согласно рис. 5. Общий правый узел элементов  $L1$  и  $C1$  заземлен ( $G_{ш} = 1\ 000$  См).

Описанная модель АФГ устраняет несинусоидальность напряжения именно у потребителей. Возможно также решить данный вопрос

путем установки АФГ на электроваззах. Для этого необходимо каскадное включение инверторов и расчет их параметров. Расчет параметров для АФГ с пятиуровневым каскадным инвертором сделан в рамках работы [17].

На исследуемом участке Восточного полигона предлагается установить АФГ в количестве четырех штук на стороне 0,38 кВ таких потребителей, как посты ЭЦ и модули ЭЦ-ТМ.

Результаты моделирования при установке АФГ представлены в табл. 5 и 6.

Из результатов, представленных в табл. 5 и 6, видим, что коэффициенты гармонических составляющих напряжения для нечетных гармоник и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не превышают ни допустимого значения (8 %) для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, ни предельного (12 %), регламентируемых [16]. Поэтому можно прийти к заключению, что установка АФГ эффективна и целесообразна.

Таблица 5. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения

Table 5. Values of the coefficients of harmonic voltage components

Объект Object	Фаза Phase	№ гармоники № of harmonic	Нормативное значение $K_{U(n)}$ , % Normative value $K_{U(n)}$ , %		Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
ЭЦ-ТМ1	A	3	5,0	7,50	0,15	0,15
		13	3,0	4,50	0,01	0,01
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,01	0,01
		15	0,3	0,45	0	0
		3	5,0	7,50	0,17	0,18
	C	7	5,0	7,50	0,01	0,01
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,02	0,03
15		0,3	0,45	0	0	
КТП-2	A	3	5,0	7,50	0,21	0,23
		13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
		3	5,0	7,50	0,25	0,26
C	13	3,0	4,50	0,03	0,03	
	15	0,3	0,45	0	0	
КТП-3	C	15	0,3	0,45	0	0
КТП-1	A	3	5,0	7,50	0,24	0,26
		9	1,5	2,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0

	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	C	3	5,0	7,50	0,29	0,3
		11	3,5	5,25	0,01	0,02
		13	3,0	4,50	0,03	0,04
		15	0,3	0,45	0	0
ЭЦ- ТМ2	A	3	5,0	7,50	0,19	0,2
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,01	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	C	3	5,0	7,50	0,17	0,19
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,03	0,03
		15	0,3	0,45	0	0

Таблица 6. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Table 6. Total harmonic voltage coefficient values

Объект Object	Фаза Phase	Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
		В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
ЭЦ-ТМ1	A	0,16	0,16
	B	0,17	0,17
	C	0,18	0,19
КТП-2	A	0,23	0,23
	B	0,24	0,25
	C	0,26	0,27
КТП-1	A	0,26	0,27
	B	0,28	0,28
	C	0,29	0,31
ЭЦ-ТМ2	A	0,20	0,22
	B	0,11	0,11
	C	0,18	0,20

### Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что включение АФГ на стороне низкого напряжения 0,4 кВ постов ЭЦ уменьшает искажение синусоиды напряжения до допустимых значений, регламентируемых нормативной документацией [16].

Поэтому данное техническое мероприятие предлагается к внедрению на проблемных участках Восточного полигона с точки зрения качества электрической энергии в системе электроснабжения автоблокировки и на сети российских железных дорог в целом.

Такое техническое решение существенно повысит надежность работы устройств автоблокировки и обеспечит повышение безопасности перевозочного процесса и также существенно сократит экономический ущерб от потенциального (в случае отказов устройств автоблокировки) простоя поездов. Вследствие этого значительно улучшатся экономические показатели работы не только системы тягового электроснабжения железных дорог, но и в целом всей железнодорожной инфраструктуры [18–20].

### Список литературы

1. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 99 с.
2. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 306–310.

3. Ким А.В., Красновская О.П., Макашева С.И. Непрерывный мониторинг и прогноз показателей качества электрической энергии как составляющая часть энергосберегающих технологий // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск, 2017. Т. 1. С. 65–68.
4. Башарин В.Л., Пузина Е.Ю. Оценка эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности на тяговой подстанции Кежемская ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 229–233.
5. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
6. Куцый А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). С. 137–149. URL : <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/778>. (Дата обращения 18.08.2023).
7. Селезнев А.С., Кондрат С.А., Третьяков А.Н. Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 8 (103). С. 177–183.
8. Пулятьев А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
9. Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // Электротехника. 2006. № 10. С. 55–60.
10. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
11. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. Омск : ОмГУПС, 2013. 191 с.
12. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев : Наук. думка, 1985. 267 с.
13. Шидловский А.К., Новский В.А., Капльгачный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Киев : Наук. думка, 1989. 311 с.
14. Гринько Н.А., Долгов А.П., Рогов Г.В. Проблема несинусоидальности во внешних сетях электроснабжения железных дорог переменного тока и пути ее решения // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. седьмой Всерос. науч.-техн. конференции с междунар. участием. Благовещенск, 2013. С. 144–147.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 160 с.
16. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 19 с.
17. Свидетельство № 2023619000. Расчет параметров активного кондиционера гармоник тока для систем тягового электроснабжения 25 кВ с каскадным пятиуровневым инвертором / А.П. Куцый, А.А. Галков, И.С. Овечкин. № 2023618169 : заявл. 25.04.2023 ; опубл. 03.05.2023.
18. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
19. Barykina Yu.N., Puchkova N.V., Budaeva M.S. Analysis of innovation activity financing methods in Russian economy // Research Paradigms Transformation in Social Sciences : European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. Irkutsk, 2018, Vol. 50. P. 120–127.
20. Оценка финансового обеспечения технологических инноваций для развития региональных экономических систем / А.В. Распутина, В.И. Буньковский, Р.Ф. Старков и др. // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 1. № 7 (139). С. 57–63.

## References

1. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboichenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STsB [Power supply systems for signaling devices]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 99 p.
2. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening the traction power supply system of the Churo – Taksimo section of the Eastern Siberian Railway]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
3. Kim A.V., Krasnovskaya O.P., Makasheva S.I. Npreryvnyi monitoring i prognoz pokazatelei kachestva elektricheskoi energii kak sostavlyayushchaya chast' energosberegayushchikh tekhnologii [Continuous monitoring and forecast of electric energy quality indicators as an integral part of energy-saving technologies]. *Nauchno-tekhnikeskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century], 2017, vol. 1, pp. 65–68.
4. Basharin V.L., Puzina E.Yu. [Evaluation of the effectiveness of the use of reactive power compensation devices at the Kezhemskaya VSZD traction substation]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport : nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 229–233.
5. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2018, pp. 1–5.
6. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Povyshenie propusknoi sposobnosti uchastka Yakurim – Kirenga dlya obespeche-

nya tyagi sdvoennykh elektropodvizhnykh sostavov massoi 14 200 t [Increasing the capacity of the Yakurim – Kirenga section to provide traction for dual electric rolling stock weighing 14 200 tons]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2022, no. 2 (16), pp. 137–149. Available at: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/mns/article/view/778>. (Accessed August 18, 2023).

7. Seleznev A.S., Kondrat S.A., Tret'yakov A.N. Ob effektivnosti primeneniya fil'trov pri normalizatsii nesinusoidal'nykh rezhimov [On the effectiveness of using filters when normalizing non-sinusoidal modes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 8 (103), pp. 177–183.

8. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, vol. 1, pp. 328–332.

9. Rozanov Yu.K., Grinberg R.P. Gibrnidnye fil'try dlya snizheniya nesinusoidal'nosti toka i napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya [Hybrid filters for reducing non-sinusoidal current and voltage in power supply systems]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2006, no. 10, pp. 55–60.

10. Kartashov I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorob'ev A.Yu. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electricity quality management]. Moscow: MEI Publ., 2006. 319 p.

11. Tret'yakov E.A. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznykh dorog [Electrical energy quality management in railway distribution networks]. Omsk: OmGUPS Publ., 2013. 191 p.

12. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving energy quality in electrical networks]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1985. 267 p.

13. Shidlovskii A.K., Novskii V.A., Kaplychnyi N.N. Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh [Stabilization of electrical energy parameters in distribution networks]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1989. 311 p.

14. Grin'ko N.A., Dolgov A.P., Rogov G.V. Problema nesinusoidal'nosti vo vneshnikh setyakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka i puti ee resheniya [The problem of non-sinusoidality in external power supply networks of AC railways and ways to solve it]. *Sbornik trudov sed'moi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Technical Conference with International participation «Energy: Management, quality and efficiency of energy resources use»]. Blagoveshchensk, 2013, pp. 144–147.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovместnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 160 p.

16. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovместimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p.

17. Kutsyi A.P., Galkov A.A., Ovechkin I.S. Certificate of registration of a computer program 2023619000, 03.05.2023.

18. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2022, vol. 1, pp. 288–296.

19. Barykina Yu.N., Puchkova N.V., Budaeva M.S. Analysis of innovation activity financing methods in Russian economy. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences «Research Paradigms Transformation in Social Sciences»*. Irkutsk, 2018, vol. 50, pp. 120–127.

20. Rasputina A.V., Bun'kovskii V.I., Starkov R.F., Vyaznikov V.E. Otsenka finansovogo obespecheniya tekhnologicheskikh innovatsii dlya razvitiya regional'nykh ekonomicheskikh sistem [Assessment of financial support for technological innovations for the development of regional economic systems]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and management: problems, solutions], 2023, vol. 1, no. 7 (139), pp. 57–63.

### Информация об авторах

**Овечкин Илья Сергеевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

**Пузина Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

### Information about the authors

**Ilya S. Ovechkin**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: iliaov2015@mail.ru.

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.