

**В.В. Милюшин<sup>1</sup>, Д.А. Пазов<sup>1</sup>, Е.Ю. Пузина<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

## **ВЫБОР СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМ ВНЕШНЕГО И ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА УЧАСТКАХ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ**

**Аннотация.** В данной работе исследованы вопросы, которые возникают при оценке пропускной способности системы тягового электроснабжения участков со сложным профилем, как правило, требующие применения способов усиления не только системы тягового, но и системы внешнего электроснабжения. В качестве примера для оценки эффективности применения способов усиления выбран участок Слюдянка – Гончарово Восточно-Сибирской железной дороги. По результатам анализа предложены индивидуальные способы усиления.

Произведено сравнение ряда способов усиления по влиянию на отклонение от минимального уровня напряжения в контактной сети, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициент загрузки силовых трансформаторов: установка автотрансформаторной подстанции в системе внешнего электроснабжения, включение тяговых трансформаторов в параллельную работу, изменение сопротивления устройства продольной компенсации, изменение мощности компенсирующих устройств, установка дополнительных постов секционирования.

По результатам сравнения влияния индивидуальных способов усиления предложены комбинированные способы усиления. После анализа полученных данных дана рекомендация по выбору способов усиления внешнего и тягового электроснабжения на участках со сложным профилем. Снижение напряжения в контактной сети, выход за предельные значения коэффициента загрузки силовых трансформаторов и проблема по нормализации качества электрической энергии были решены при комбинации таких оптимальных средств усиления, как изменение мощности компенсирующих устройств, включение тяговых трансформаторов в параллель и установка районной трансформаторной подстанции с автотрансформатором.

**Ключевые слова:** внешнее электроснабжение, усиление тягового электроснабжения, способы усиления, тяжеловесные поезда.

**V.V. Milyushin<sup>1</sup>, D.A. Pazov<sup>1</sup>, E.Yu. Puzina<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

## **SELECTION OF METHODS FOR STRENGTHENING THE SYSTEM OF EXTERNAL AND TRACTION ELECTRIC SUPPLY IN AREAS WITH A COMPLEX PROFILE**

**Abstract.** In this paper, the questions that arise when assessing the throughput of the traction power supply system for sections with a complex profile, as a rule, requiring the use of methods for strengthening not only the traction system, but also the external power supply system, are investigated. As an example, to assess the effectiveness of the application of reinforcement methods, the Slyudyanka - Goncharovo section of the East Siberian Railway was chosen. According to the results of the analysis, individual methods of amplification are proposed.

A comparison was made of a number of amplification methods in terms of their influence on the deviation from the minimum voltage level in the contact network, the voltage unbalance factor in reverse sequence, the load factor of power transformers: installation of an autotransformer substation in an external power supply system, inclusion of traction transformers in parallel operation, change in resistance longitudinal compensation devices, changing the power of compensating devices, installing additional sectioning posts.

Based on the results of comparing the influence of individual amplification methods, combined amplification methods are proposed. After analyzing the data obtained, a recommendation was given on the choice of ways to strengthen the external and traction power supply in areas with a complex profile. Reducing the voltage in the contact network, going beyond the limit values of the load factor of power transformers and the problem of normalizing the quality of electrical energy were solved with a combination of such optimal means of amplification as changing the power of compensating devices, connecting traction transformers in parallel and installing a district transformer substation with an autotransformer.

**Keywords:** external power supply, strengthening of traction power supply, methods of strengthening, heavy trains.

## **Введение**

Единая энергетическая система (ЕЭС) России охватывает практически всю обжитую территорию страны и является крупнейшим в мире централизованно управляемым энергообъединением. В настоящее время ЕЭС России включает в себя 70 энергосистем на территории 81 субъекта Российской Федерации, входящих в состав шести работающих параллельно объединённых энергетических систем (ОЭС) — ОЭС Центра, Юга, Северо-Запада, Средней Волги, Урала и Сибири и ОЭС Востока, функционирующей изолированно от ЕЭС России.

Одним из важнейших потребителей, подключенных к ЕЭС России, являются системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог России. Железные дороги России являются важнейшим звеном транспортной системы страны, на долю которых приходится более 70 % внутреннего грузооборота. Более 80 % перевозочной работы при этом производится электрической тягой.

## **Описание проблемной ситуации и постановка задачи**

В настоящее время наблюдается увеличение тяговой нагрузки на зонах питания, что может иметь место из-за увеличения суточных размеров движения в связи с возрастанием грузопотока, внедрения более мощного электроподвижного состава, увеличения в процентном отношении на участках тяжеловесных поездов [1-3]. Рост количества и масс тяжеловесных поездов на двухпутных участках, движение которых, как правило, имеет место по одному из путей, значительно увеличивает нагрузку, приходящуюся на все элементы системы внутреннего и внешнего электроснабжения [4-8] и приводит к необходимости комплексной реконструкции большого количества звеньев и устройств железных дорог [9-11].

Согласно данным, полученным из дорожной электротехнической лаборатории Восточно-Сибирской дирекции по энергообеспечению, выявлено, что начата реализация программы интервального регулирования движения поездов на участке Большой Луг – Слюдянка. В результате полученных данных выяснено, что требующийся при этом дополнительный отбор мощности от ВЛ-110 кВ значительно превышает имеющуюся мощность. Также, на ряде совместных совещаний специалистов Восточно-Сибирской дирекции по энергообеспечению и Иркутской электросетевой компании затронуты проблемы пропускной способности систем тягового и внешнего электроснабжения в связи с увеличением объема интервального движения на участке Слюдянка – Гончарово. Принято общее решение производить усиление как со стороны внешнего электроснабжения, так и со стороны тягового, чтобы удовлетворить требования этих двух крупных организаций.

Задачей данной работы является анализ результатов моделирования различных способов усиления системы тягового электроснабжения участка Гончарово – Слюдянка и разработка на базе этого общих рекомендаций по усилению систем тягового и внешнего электроснабжения на участках со сложным профилем.

## **Предложения по практическому решению поставленной задачи**

В рамках выполняемого исследования произведен анализ параметров систем внешнего и тягового электроснабжения таких сложных по профилю пути участков как: Тайшет – Тулун (максимальный подъем 8,2 ‰ протяженностью 17 км), Зима – Гончарово (максимальный подъем 9 ‰ протяженностью 5 км), Юрты – Нижнеудинск (максимальный подъем 8,2 ‰ протяженностью 17 км), Гончарово – Слюдянка (максимальный подъем 15,6 ‰ протяженностью 5 км).

В качестве примера в данной работе подробно изложены результаты исследования по участку Гончарово - Слюдянка. На рис. 1 представлен профиль данного участка. Видим, что максимальный подъем величиной в 15,6 ‰ имеется в месте расположения тяговой подстанции (ТП) Подкаменная. Участок содержит 6 тяговых подстанций с установленными на них силовыми трансформаторами мощностью 40 МВА, также один пост секционирования на станции Глубокая. Кроме того, установлено компенсирующее устройство мощностью 5,8

МВАр на ПС Глубокая и устройство продольной компенсации мощностью 9,6 МВАр на ТП Подкаменная. Контактная сеть участка представлена подвеской марки М120+2 МФ100.

С целью оценки параметров режима работы СТЭ данного участка в рамках организации интервального регулирования движения поездов сформирован следующий график движения:

- в четном направлении пакет поездов - 8 составов массой 7100 т с межпоездным интервалом 6 минут;
- в нечётном направлении пакет поездов - 21 состав массой 3000 т. с межпоездным интервалом 12 минут;

Анализ параметров нормального режима работы системы тягового электроснабжения исследуемого участка показал, что отклонение напряжения в контактной сети от минимально допустимого уровня составляет - 12,6%, максимальный коэффициент загрузки силовых трансформаторов существенно выше допустимого значения и составляет 3,68, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности выше допустимого значения и равен 4,36. Полученные результаты говорят о необходимости усиления системы электроснабжения участка.

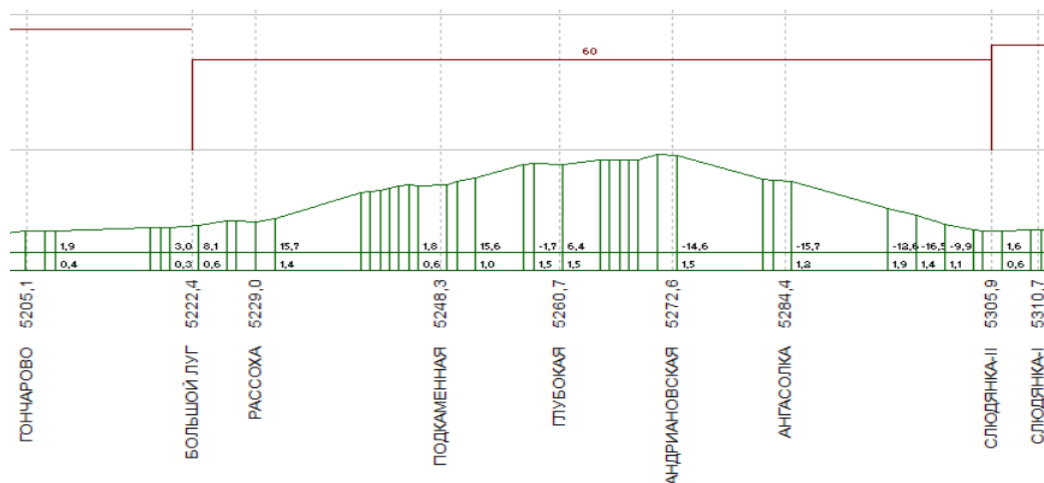


Рис. 1 – Профиль пути участка Гончарово - Слюдянка

В результате выявления проблем в системах внутреннего и внешнего электроснабжения предложены такие варианты усиления: установка автотрансформаторов (АТР) в системе внешнего электроснабжения (трансформаторная подстанция Подкаменная), включение силовых трансформаторов (СТ) в параллельную работу на тяговых подстанциях (ТП Подкаменная), изменение сопротивления устройства продольной компенсации (УПК) (уменьшение сопротивления УПК на ТП Подкаменная и Андриановская), изменение мощности компенсирующих устройств (КУ) (увеличение мощности КУ на ПС Глубокая) и установка дополнительных постов секционирования (ПС) (на МПЗ: Гончарово – Рассоха, Рассоха - Подкаменная). Изменение значений анализируемых параметров режима работы при использовании указанных способов усиления представлено на рис. 2-4.

По результатам одиночных способов усиления можно утверждать, что эффективным способом повышения минимального уровня напряжения в контактной сети является соединение СТ в параллель, но проблемы с коэффициентом загрузки СТ и коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности остаются, следовательно необходимо рассмотреть комбинированные способы усиления.



Рис. 2 – Отклонение от минимального уровня напряжения в контактной сети по результатам моделирования индивидуальных способов усиления участка

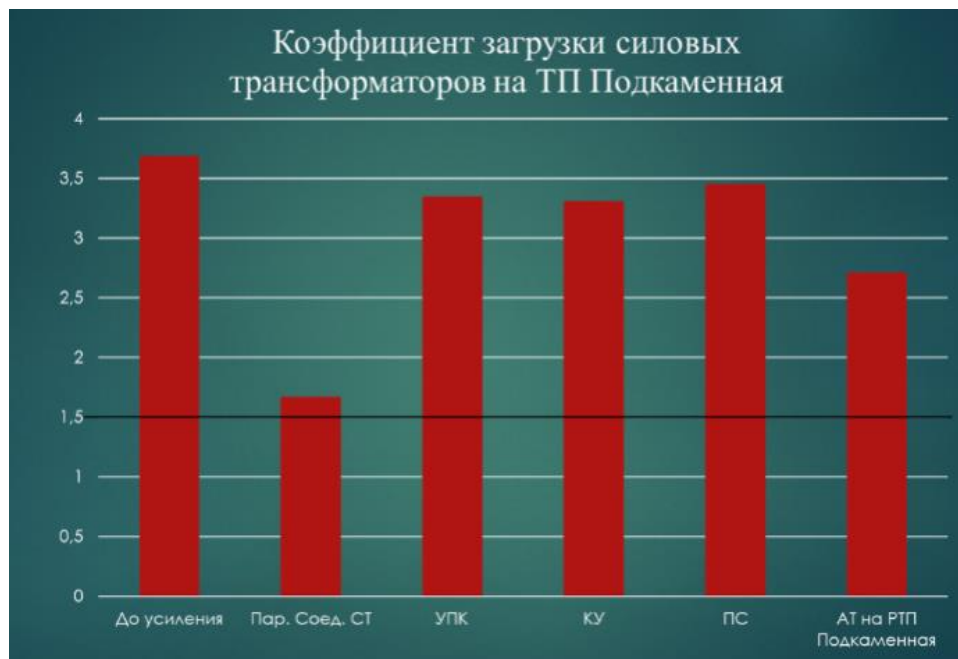


Рис. 3 – Коэффициент загрузки силовых трансформаторов на ТП Подкаменная по результатам моделирования индивидуальных способов усиления участка

Выполнен анализ следующих комбинированных способов усиления:

Вариант 1: установка поста секционирования на МПЗ: Гончарово – Рассоха, Рассоха – Подкаменная + уменьшение сопротивления УПК на ТП Подкаменная и Андриановская;

Вариант 2: установка поста секционирования на МПЗ: Гончарово – Рассоха, Рассоха – Подкаменная + уменьшение сопротивления УПК на ТП Подкаменная и Андриановская + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная;

Вариант 3: установка поста секционирования на МПЗ: Гончарово – Рассоха, Рассоха – Подкаменная + увеличение мощности КУ на ПС Глубокая;

Вариант 4: установка поста секционирования на МПЗ: Гончарово – Рассоха, Рассоха – Подкаменная + увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная;



Рис. 4 – Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на ТП Ангасолка по результатам моделирования индивидуальных способов усиления участка

Вариант 5: увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная;

Вариант 6: увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + соединение силовых трансформаторов в параллельную работу на ТП Подкаменная;

Вариант 7: увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + соединение силовых трансформаторов в параллельную работу на ТП Подкаменная + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная;

Вариант 8: увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + соединение силовых трансформаторов в параллельную работу на ТП Подкаменная + установка поста секционирования + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная.

Полученные при моделировании комбинированных вариантов усиления параметры режима работы системы электроснабжения отображены на рис. 5-7.



Рис. 5 – Отклонение от минимального уровня напряжения в контактной сети по результатам моделирования комбинированных способов усиления участка





Рис.6 – Коэффициент загрузки силовых трансформаторов на ТП Подкаменная по результатам моделирования комбинированных способов усиления участка



Рис.7 – Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на ТП Ангасолка по результатам моделирования комбинированных способов усиления участка

Видим, что проблема по отклонению уровня напряжения в контактной сети от минимально допустимого не решается только в двух вариантах усиления: 3-ем и 5-ом. Коэффициент загрузки силовых трансформаторов уменьшается и своего минимального значения достигает при 8-ом способе усиления. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает допустимого значения в трех случаях: 6-ом, 7-ом и 8-ом вариантах усиления.

Соответственно, можно утверждать, что наилучшие результаты по нормализации параметров режима работы при использовании интервального регулирования движения поездов

на исследуемом участке обеспечит следующая комбинация средств усиления: увеличение мощности КУ на ПС Глубокая + соединение силовых трансформаторов в параллельную работу на ТП Подкаменная + установка поста секционирования на ПС Глубокая + установка автотрансформаторной подстанции около ТП Подкаменная.

### **Заключение**

По итогам анализа полученных параметров режима работы СТЭ и СВЭ представляется целесообразным дать общие рекомендации по их усилению на участках со сложным профилем с уклоном 15-17 % путем применения комбинированных способов усиления, а именно изменением мощности КУ, включением тяговых трансформаторов в параллель и установкой при наличии такой возможности трансформаторной подстанции с автотрансформатором для связи имеющейся питающей линии 110 кВ с линией более высокого напряжения с целью дополнительного отбора мощности. Проблемы нормализации уровня напряжения в контактной сети, выхода за предельные значения коэффициента загрузки трансформатора и нормализации качества электрической энергии [12-15] в системе внешнего электроснабжения на аналогичных по сложности профиля участках могут быть решены только при использовании подобной комбинации средств усиления.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271385.
2. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo, "Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer," 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, pp. 111–115, 2016.
3. Шевердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС. Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С.24.
4. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2013. С.167-171.
5. I.A.Khudonogov, E.Yu Puzina., A.G.Tuigunova. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation,"2019 IEEE Proceedings – Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. С.8867610.
6. Филиппов Д.М., Ступицкий В.П., Лобанов О.В. Проблемы диагностики параметров контактной сети. Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С. 125-131.
7. Ступицкий В.П., Худоногов И.А., Тихомиров В.А., Лобанов О.В. Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР FEMAP/ Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С 99-102.
8. H. Kalathiripi and S. Karmakar, "Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques," 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, pp. 1–5, 2017.
9. Пультяков 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. 2015. Т 1. С. 328-332.
10. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог. Образование – Наука – Производство. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). В 2-х томах. Чита. 2022. С. 288-296.

11. Антипина О.В., Распутина Е.А. Инновационное развитие предприятий железнодорожного транспорта. Экономический альманах. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции “Экономика структурных преобразований : проблемы и перспективы развития”. Выпуск № 7. 2020. С. 194-198.

12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Куцый А.П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 72-79.

13. Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС. Автоматика, связь, информатика. 2008. № 11. С. 37-39.

14. Макашева С.И. Оценка синусоидальности кривых напряжения высоковольтной линии автоблокировки. Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 88-91.

15. Крюков А.В., Куцый А.П., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции. Электроэнергетика глазами молодежи-2017. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. 318-321.

### REFERENCES

1. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271385.

2. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo, “Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer,” 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, pp. 111–115, 2016.

3. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Influence of heavy trains on track circuits and ALS. Automation, communication, informatics. 2004. No. 8. P.24.

4. Puzina E.Yu. The feasibility of using a monitoring system for power transformers. Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia. Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation. 2013. P.167-171.

5. I.A.Khudonogov, E.Yu Puzina., A.G.Tuigunova. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation, “2019 IEEE Proceedings – Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. С.8867610.

6. Filippov D.M., Stupitsky V.P., Lobanov O.V. Problems of diagnosing the parameters of the contact network. Young science of Siberia. 2021. No. 2(12). pp. 125-131.

7. Stupitsky V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Calculation of the bearing capacity of a metal lattice support of a contact network during torsion of the upper part by the finite element method in CAD FEMAP / Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). From 99-102.

8. H. Kalathiripi and S. Karmakar, "Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques," 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, pp. 1–5, 2017.

9. A. V. Pult'yakov, Yu. A. Trofimov, and M. E. Skorobogatov, Russ. Integrated solutions to improve the stability of the operation of automatic locomotive signaling devices in areas with AC electric traction. Transport infrastructure of the Siberian region. 2015. T 1. S. 328-332.

10. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problems of formation, development and reconstruction of the elements of the infrastructure complex of railways. Education - Science - Production. Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation). In 2 volumes. Chita. 2022. S. 288-296.

11. Antipina O.V., Rasputina E.A. Innovative development of railway transport enterprises. Economic almanac. Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference “Eco-



nomics of Structural Transformations: Problems and Prospects of Development". Issue No. 7. 2020. P. 194-198.

12. V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov, and A. P. Kutsy, Acoust. Modeling of non-sinusoidal modes of traction power supply systems equipped with reactive power compensation units. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. No. 1 (57). pp. 72-79.

13. Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Asymmetry of traction currents under ALS coils. Automation, communication, informatics. 2008. No. 11. S. 37-39.

14. Makasheva S.I. Estimation of the sinusoidality of the voltage curves of the high-voltage auto-blocking line. Transport of the Asia-Pacific region. 2019. No. 4 (21). pp. 88-91.

15. Kryukov A.V., Kutsiy A.P., Cherepanov A.V. Improving the quality of electricity in 110-220 kV networks supplying traction substations. Electric power industry through the eyes of youth-2017. Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference. 2017. 318-321.

### **Информация об авторах**

*Милушин Владислав Владимирович* – студент гр. СОД.1-20-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: [vlad.milushin1@mail.ru](mailto:vlad.milushin1@mail.ru)

*Пазов Дмитрий Анатольевич* – студент гр. СОД.1-20-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: [pazov\\_2016@mail.ru](mailto:pazov_2016@mail.ru)

*Пузина Елена Юрьевна* – к. т. н., доцент кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, к. т. н., доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: [lena-rus05@mail.ru](mailto:lena-rus05@mail.ru)

### **Authors**

*Vladislav Vladimirovich Milyushin* – student g. SOD.1-20-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [vlad.milushin1@mail.ru](mailto:vlad.milushin1@mail.ru)

*Dmitriy Anatol'evich Pazov* – student g. SOD.1-20-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [pazov\\_2016@mail.ru](mailto:pazov_2016@mail.ru)

*Elena Yur'evna Puzina* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: [lena-rus05@mail.ru](mailto:lena-rus05@mail.ru);