

УДК: 621.311.001.57

А.Н. Сухарукова, С.И. Макашева

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Аннотация. В рамках данной статьи освещена важность проблемы определения доли вклада потребителя в ухудшение качества электроэнергии в системе общего электроснабжения. В программной среде MATLAB Simulink проведено имитационное моделирование участка электрической сети 220 кВ с несимметричными нагрузками. Оценено влияние количества и местоположения несимметричных нагрузок, подключаемых к магистральной электрической сети с двухсторонним питанием на искажение показателей качества электрической энергии.

Ключевые слова: качество электрической энергии, доля вклада потребителя, искажающий потребитель, несимметрия, поставщик электроэнергии.

A.N. Sukharukova, S.I. Makasheva

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

MODELING OF AN ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM WITH ASYMMETRIC LOADS

Abstract. Paper deals with the argent problem of determining the consumer's contribution into the power quality distortion in power supply system. The simulation modeling of a 220 kV electrical network section with asymmetric loads was carried out by means of MATLAB Simulink software. The influence of asymmetric loads in the power supply system on the power quality indicators distortion is estimated.

Key words: power quality, the share of the consumer's contribution, distorting consumer, asymmetry, electricity supplier.

Введение

В связи с тем, что число электроприемников и потребителей, которые вносят искажения в систему электроснабжения (СЭС) за последние годы стремительно увеличивается, вопросы, касающиеся определения доли вклада потребителей в ухудшение качества электрической энергии (КЭ) приобретают все большую актуальность. Действительно, из-за наличия у потребителей электроустановок с нелинейными элементами, наличия однофазных электроприемников и их неравномерного распределения по фазам электрической сети, в ряде точек системы общего назначения фиксируется ухудшение КЭ [1]. Вследствие ухудшения КЭ возникают потери электроэнергии, снижающие эффективность работы электротехнического оборудования, что сопровождается экономическими убытками.

При подключении к системе электроснабжения общего назначения различные потребители в разной степени могут искажать качество электрической энергии в силу технологических особенностей используемого ими оборудования. Так, одни потребители в большей мере могут искажать КЭ, чем другие. При этом, при расчете платы за потребленную электрическую энергию убытки, понесенные сетевым организациям в случае ухудшения КЭ, разделяют между всеми потребителями ЭЭ поровну. В экономических реалиях рыночной экономики такой подход можно считать несовершенным, т.к. логичнее было бы распределять ответственность за вносимые искажения по степени доли вклада конкретного потребителя. В этой связи возникает ряд вопросов, которые касаются определения доли вклада, определения степени ответственности и формирования механизмов экономического стимулирования применения мер по стабилизации КЭ.

На данный момент в Российской Федерации отсутствуют нормативные документы, которые бы полностью регулировали отношения между поставщиком и потребителем электроэнергии в части обеспечения КЭ. Так, Статья 542 ГК РФ [2] устанавливает требования к обеспечению должного КЭ только касательно электроснабжающей организации, в то время как Статьей 543 этого же документа предъявлены требования только к техническому состоянию и безопасности эксплуатируемого потребителем электрооборудования.

Бывают случаи, когда на производствах по причине искажений КЭ, вносимых смежными потребителями или по причине питающей энергосистемы, выходит из строя дорогостоящее оборудование, а выявление виновника становится очень сложной задачей. Тогда организация, понесшая убытки по причине неудовлетворительного КЭ, подает иск в судебные органы, которые в судебном порядке рассматривают данную проблему, полагаясь на действующие нормативно – правовые акты [1, 3]. Ввиду отсутствия в РФ нормативно - правовая документов, которые бы полностью регулировали бы спорные отношения между поставщиком и потребителем электроэнергии в части КЭ, то существует объективная необходимость в создании методик и механизмов, определяющих искажающего КЭ потребителя и долю его вклада в ухудшение КЭ. Так же для всех участников рынка электрической энергии актуален вопрос применения штрафных санкций и экономического стимулирования в области поддержания необходимого КЭ [1, 3-6].

На сегодняшний день для определения вклада потребителей в ухудшения КЭ рассматриваются несколько методик, наиболее известными из которых являются [1,3-6]:

- метод активных двухполюсников, подразумевающий изменение вклада искажения либо со стороны потребителя, либо со стороны системы;
- метод потока активной мощности;
- метод, основанный на неактивной мощности, базирующийся на различии значений фундаментальной, реактивной мощности, рассчитанной по теории Фризе, а также среднеквадратической мощности.

К сожалению, вышеупомянутые методы имеют ряд недостатков, среди которых: ошибки в расчетах при одновременно возможном изменении как вклада со стороны потребителя, так и со стороны энергосистемы, необходимость проведения измерений амплитуд и начальных фаз высших гармоник и т.п. Из перечисленного можно заключить, что с помощью данных методов нельзя получить достоверную информацию о доле вклада потребителей в ухудшение КЭ. Также ввиду отсутствия их подкрепления на уровне государственного стандарта, они не могут быть приняты в качестве доказательной базы в судебных разбирательствах.

В связи с этим имитационное моделирование является альтернативным способом определения искажающего потребителя ввиду того, что параметры всех элементов модели задаются в соответствии с реальными параметрами электрооборудования потребителей, а также рассматриваемого участка энергосистемы. Преимущества применения имитационного моделирования при решении сложных инженерных задач рассмотрены в [1, 6, 7].

Моделирование системы электроснабжения с несимметричными нагрузками с помощью пакета MATLAB Simulink

По результатам исследований КЭ участков питающей энергосистемы, содержащей различные типы присоединяемых электроприемников, было выявлено, что наличие потребителя в лице тяговых подстанций электрифицированных железных дорог переменного тока негативно сказывается на КЭ по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} [8, 9].

Таким образом, первым этапом в разработке имитационной модели для определения искажающего КЭ потребителя, а также доли вклада в ухудшение качества электроэнергии, стало исследование влияние числа однотипных несимметричных нагрузок на примере модели тяговой подстанции переменного тока, где в качестве нагрузки имеются с электровазы магистральных железных дорог.

Моделирование СЭС проводилось в программе для компьютерного моделирования MATLAB Simulink. Данный программный продукт очень прост в использовании и удобен для понимания, а также дает возможность моделировать в реальном времени процессы, происходящие в электрических сетях.

Рассматриваемый в рамках данной работы участок реальной магистральной электрической сети напряжением 220 кВ представляет собой схему с двухсторонним питанием, включающую в себя 5 понизительных подстанций. К данному участку поочередно подключалось 11 однотипных потребителей, моделирование несимметричного характера нагрузки которых было произведено при помощи блока Three – Phase Series RLC Load, посредством задания различных по величине модулей активной мощности для фаз А, В, С. Внешний вид части схемы для исследования приведен на рис. 1.

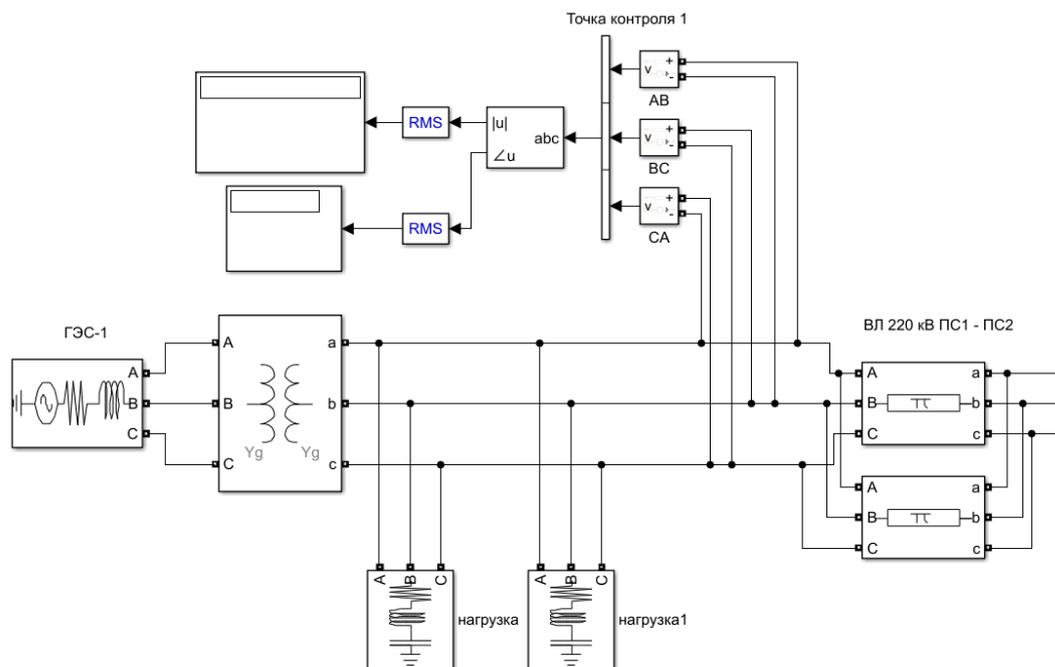


Рис.1. Фрагмент схемы моделируемой магистральной электрической сети напряжением 220 кВ

Замеры напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей в пяти точках контроля (ТК) проводились при помощи совокупности блоков – Voltage Measurement, Vector Concatenate, Sequence Analyzer, RMS, Display, внешний вид которых приведен на рис. 2. Измерение междуфазных напряжений проводилось при помощи трех блоков Voltage Measurement, откуда измеренные значения напряжений поступали на элемент Vector Concatenate для объединения трех измеренных значений. Затем, для определения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, сигнал напряжения поступал на элемент Sequence Analyzer, преобразовался в среднеквадратичное значение напряжения при помощи RMS и выводился на дисплей.

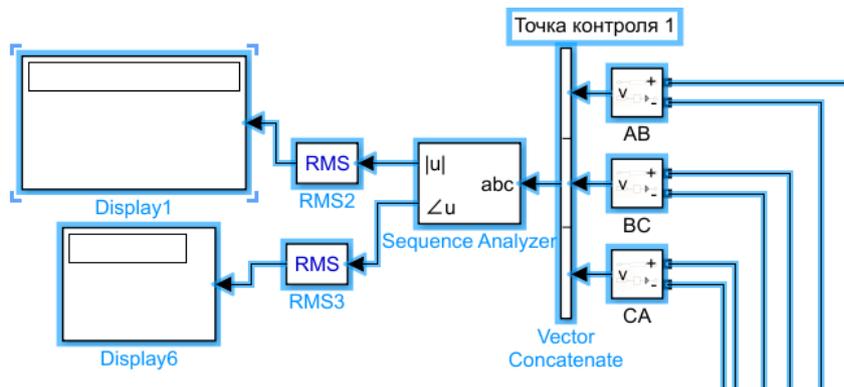


Рис.2. Внешний вид совокупности блоков для измерения симметричных составляющих напряжения

Результаты моделирования

По результатам проведенного моделирования для различных вариантов количества и места включения несимметричных нагрузок, подключенных к участку магистральной электрической сети, получены значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , приведенные в таблице 1. Точки контроля ТК1 – ТК5, обозначенные в табл.1, расположены на шинах 220 кВ трансформаторных подстанций, присоединяемых к рассматриваемому участку магистральной сети.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %

Количество искажающих потребителей	Точка контроля				
	ТК 1	ТК 2	ТК 3	ТК 4	ТК 5
1	1,44	1,14	0,80	0,57	0,37
2	2,81	2,20	1,48	0,95	0,41
3	3,92	3,80	2,53	1,58	0,51
4	5,03	5,41	3,59	2,22	0,62
5	6,14	7,03	4,67	2,87	1,07
6	6,89	8,12	6,13	3,77	0,94
7	7,64	9,20	7,61	4,68	1,14
8	8,09	9,87	8,52	5,77	1,39
9	8,55	10,53	9,43	6,86	1,63
10	8,66	10,69	9,64	7,11	1,92
11	8,76	10,84	9,85	7,36	2,22

В соответствии с ГОСТом 32144 – 2013 для коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности установлены следующие нормируемые значения:

- значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в точке передачи электрической энергии не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;
- значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в точке передачи электрической энергии не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

По результатам анализа данных, представленных в таблице 1, построим гистограмму рис.3, на которой показаны превышающие 95% норму по [10] значения K_{2U} в зависимости от количества искажающих потребителей для пяти точек контроля.

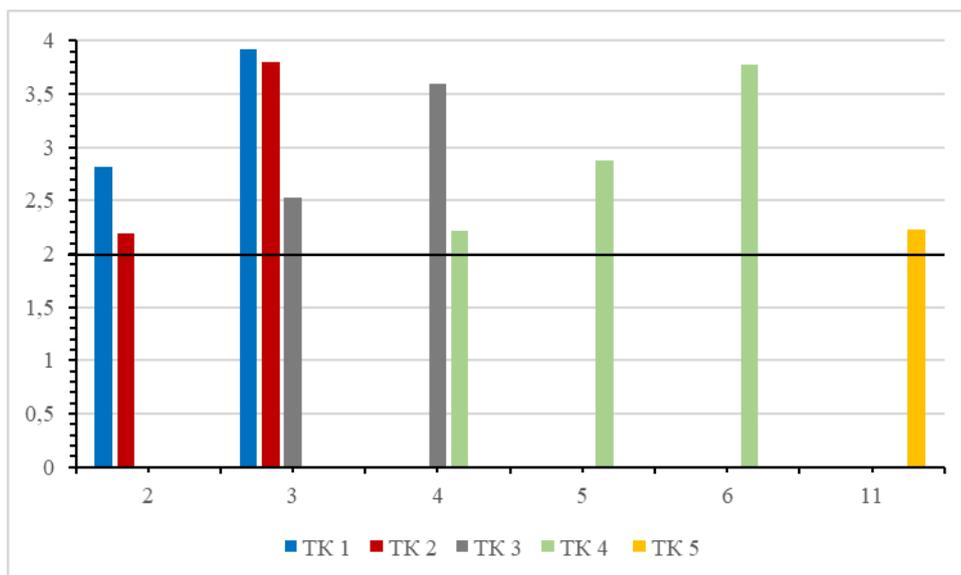


Рис.3. Значения K_{2U} , превышающие 95% норму по ГОСТ 32144-2013 в зависимости от количества присоединенных искажающих потребителей

Значения K_{2U} , превышающие 100% норму по [10] приведены на рис.4.

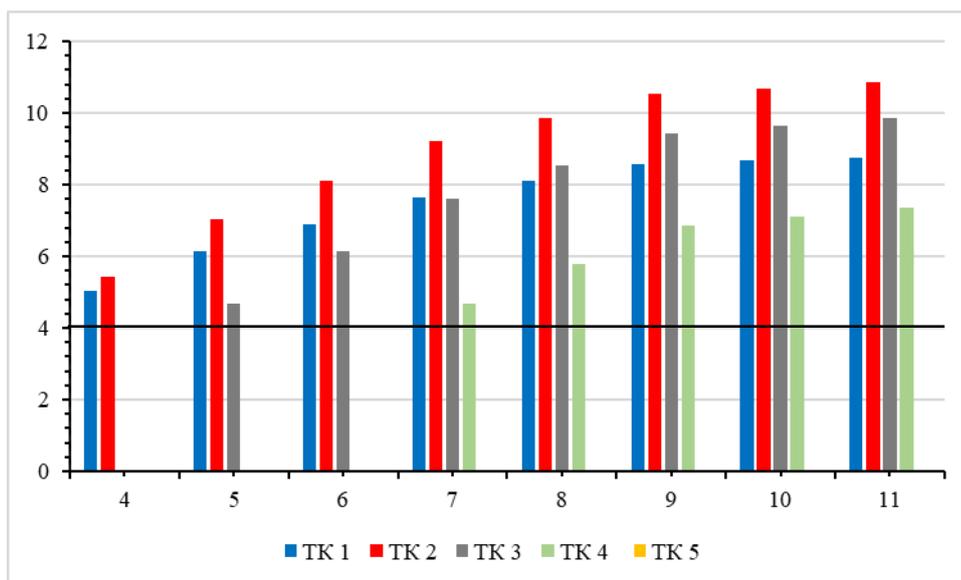


Рис.4 Значения K_{2U} , превышающие 100% норму по ГОСТ 32144-2013 в зависимости от количества присоединенных искажающих потребителей

Анализируя данные табл. 1, а также рис. 3 и 4, можно сделать следующие выводы:

- качество электроэнергии ожидаемо ухудшается с увеличением числа присоединенных искажающих потребителей;
- только при подключении по одному искажающему потребителю в точках контроля наблюдается удовлетворительное КЭ по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- превышение 95% нормы ГОСТ 32144-2013 наблюдается при подключении двух и трех искажающих ближе к середине рассматриваемого участка СЭС;
- превышение норм ГОСТ 32144-2013 по 95% норме также наблюдается в ТК5, но только при подключении одиннадцати искажающих потребителей;

– для ТК1 и ТК2 превышена 100% норма по ГОСТ 32144-2013 при подключении четырех искажающих потребителей, в то время как при подключении пяти и шести потребителей уже имеется превышение и для ТК3;

– далее с последующим увеличением искажающих потребителей, 100% норма по ГОСТ 32144-2013 превышает по всем ТК, кроме ТК5, находящейся вблизи источника питания СЭС;

– качество электроэнергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} во всей сети считается неудовлетворительным.

Заключение

Таким образом, рассмотрев существующее положение дел по вопросу определения доли вклада и степени ответственности искажающего потребителя за искажения, вносимые кКЭ и ухудшающие его, можно заключить:

1. выявлена необходимость в разработке и внедрении в практику взаиморасчетов за потребленную электрическую энергию механизмов определения доли вклада потребителя в ухудшение КЭ и экономического стимулирования поставщиков и потребителей электроэнергии к применению технических средств повышения КЭ;

2. при помощи программного продукта MATLAB Simulink произведено имитационное моделирование участка электрической сети, содержащей несимметричные нагрузки и оценка степени влияния количества и места включения нагрузок на искажение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;

3. произведенные исследования степени влияния количества и места включения искажающих потребителей необходимо продолжать и развивать в отношении других показателей качества электрической энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макашева, С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление : моногр. / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. – 114 с. : ил.

2. Гражданский кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № N 14-ФЗ (часть вторая, статьи 454 - 1109) [принят Государственной Думой 22 декабря 1995 г. в редакции от 18 марта 2019г., с изменениями от 28 апреля 2020г.] – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9027703> (дата обращения: 18.09.2021).

3. Шклярский. Я.Э. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии / Шклярский. Я.Э, Растворова. Ю.В, Петров. И.С // Журнал: Вопросы электротехнологии – Саратов: Изд-во Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А, 2019. – С. 56-63.

4. Сендерович. Г.А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения / Г.А. Сендерович, А.В. Дяченко // Журнал: Электротехника и электромеханика – Харьков : Изд-во Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2016. – С. 54 – 60.

5. Костюков. Д.А. Оценка долевого вклада потребителя в несимметрию напряжений по обратной последовательности в сетях с изолированной нейтралью / Д.А. Костюков., А.В. Петров., А.Е. Куш // Журнал: Вестник Северо-Кавказского федерального университета – Ставрополь : Изд-во Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. – С. 7 – 18.

6. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии : учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова – М. : Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

7. Крюков. А. В. Моделирование систем электроснабжения : учебное пособие / А. В. Крюков. – Иркутск : Изд-во ИРГУПС, 2014. – 142 с.

8. Макашева. С.И Оценка несимметрии напряжений на участке транзита магистральной электрической сети 220 кВ / Макашева. С.И., Сухарукова А.Н // Журнал: Научно – техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. В 2 т. Т. 2. –

Хабаровск : Изд-во Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2021. С. 34 – 40.

9. Сухарукова. А.Н. Аспекты мониторинга и управления качеством электрической энергии тяговых подстанций переменного тока / Сухарукова. А.Н., Хорошавина. А.А // Сборник трудов IV международной научно – практической конференции в рамках Научно – образовательного форума – Омск : Изд-во Омский государственный университет путей сообщения, 2020. С. 57 – 63.

10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения : 18.09.21).

REFERENCES

1. Makasheva, S. I. The electric energy quality: monitoring, forecast, management: monogr. / S. I. Makasheva, P. S. Pinchukov. - Khabarovsk: Publishing house of FESTU, 2020. - 114 p.: ill.

2. The Civil Code of the Russian Federation: Federal Law No. 14-FZ (Part two, Articles 454-1109) [adopted by the State Duma on December 22, 1995, as amended on March 18, 2019, with amendments dated April 28, 2020.] - Text : electronic // Techexpert: website. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/9027703> (accessed: 18.09.2021).

3. Shklyarsky. Ya. E. Assessment of the contribution of consumers to the deterioration of electricity quality indicators / Shklyarsky. Ya. E., Solvorova. Yu.V., Petrov. I. S. // Journal: Voprosy elektrotehnologii-Saratov: Publishing house of the Saratov State Technical University named after Gagarin Yu. A., 2019. - pp. 56-63.

4. Senderovich, G. A. The relevance of determining responsibility for the violation of the quality of electricity according to the indicators of voltage fluctuations / G. A. Senderovich, A.V. Dyachenko // Journal: Electrical Engineering and Electromechanics-Kharkiv: Publishing House of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2016. – pp. 54-60.

5. Kostyukov. D. A. Estimation of the consumer's share contribution to the voltage asymmetry in the reverse sequence in networks with an isolated neutral / D. A. Kostyukov., A.V. Petrov., A. E. Kushch // Journal: Bulletin of the North Caucasus Federal University-Stavropol: Publishing House of the North Caucasus Federal University, 2018. - pp. 7-18.

6. Kartashev, I. I. Electric power quality management : a textbook / I. I. Kartashev, V. N. Tulsy, R. G. Shamonov, etc.; edited by Yu. V. Sharov-M.: Publishing House of MEI, 2017. - 347 p.

7. Kryukov A.V. Modeling of power supply systems : a textbook / A.V. Kryukov. - Irkutsk: Publishing house of ISTU, 2014. - 142 p.

8. Makasheva, S. I. Voltage unbalance evaluation for the transit part of 220 kV transmission network / Makasheva S.I., Sukharukova, A. N. // Journal: Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century. In 2 vols. vol. 2. - Khabarovsk: Publishing House of the FESTU, 2021. pp. 34-40.

9. Sukharukova. A. N. Aspects of power quality monitoring and management at the AC traction substations/ Sukharukova. A. N., Khoroshavina. A. A // Proceedings of the IV international scientific and practical conference within the framework of the Scientific and Educational Forum-Omsk: Publishing house Omsk State University of Railway Communications, 2020. pp. 57-63.

10. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electric energy in general-purpose power supply systems. - URL: <http://docs.cntd.ru> (accessed: 18.09.21).

Информация об авторах

Сухарукова Анна Николаевна – магистрант, студент группы ЭЛ2, Дальневосточный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: sukharukova98@mail.ru

Макашева Светлана Игоревна – к.т.н., доцент кафедры «Системы электроснабжения», Дальневосточный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: smakasheva@gmail.com

Information about the author

Anna Nikolaevna Sukharukova – master student of Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail : sukharukova98@mail.ru

Makasheva Svetlana Igorevna – Ph.D.in Engineering Science, Associate Professor, the Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail : smakasheva@gmail.com