

УДК 621.311

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_37

КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ КАК ФАКТОРЫ УГРОЗЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ

CONDUCTED LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AS A THREAT TO ENERGY SECURITY IN RUSSIA

©2025

Мочалин Константин Сергеевич¹, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Денчик Юлия Михайловна¹, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Сальников Василий Герасимович¹, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Антонов Александр Игоревич², кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования,

Руди Дмитрий Юрьевич², старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования

Руппель Александр Александрович², кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования

Mochalin Konstantin Sergeevich¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Denchik Yulia Mikhailovna¹, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Salnikov Vasily Gerasimovich¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Antonov Alexander Igorevich², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Associate Professor of the Department of Humanities, Natural Sciences and Technical Disciplines

Rudi Dmitry Yurievich², Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment

Ruppel Alexander Alexandrovich², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment

¹Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск (Россия)

²Омский институт водного транспорта, Омск (Россия)

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk (Russia)

²Omsk Institute of Water Transport, Omsk (Russia)

E-mail: mochalin@nsawt.ru

E-mail: elektrotex@mail.ru

E-mail: kees@nsawt.ru

E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

E-mail: dima_rudi@mail.ru

E-mail: ruppelsan@mail.ru

Аннотация: Обеспечение качества электроэнергии и электромагнитной совместимости на сегодняшний день является первоочередной задачей энергетической безопасности. Энергетическая инфраструктура рассматривается как одна из критически важных инфраструктур Российской Федерации (РФ). Развитие промышленности в РФ и непрерывный рост мощностей электропотребителей привело к тому, что качество электроэнергии не соответствует нормативно-технической документации, что, в свою очередь, приводит к появлению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех.

Ключевые слова: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, энергетическая безопасность, кондуктивная помеха.

Для цитирования: Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи как факторы угрозы энергетической безопасности России / К.С. Мочалин, Ю.М. Денчик, В.Г. Сальников, А.И. Антонов, Д.Ю. Руди, А.А. Руппель // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 37–44. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_37.

Abstract: Ensuring power quality and electromagnetic compatibility is currently a top priority for energy security. Energy infrastructure is considered critically important in the Russian Federation. Industrial development in the Russian Federation and the continuous growth of electricity consumers have led to power quality not meeting regulatory and technical requirements. This, in turn, leads to the emergence of low-frequency conducted electromagnetic interference.

Keywords: power quality, electromagnetic compatibility, noise immunity, energy security, conducted interference.

For citation: Conductive low-frequency electromagnetic interference as factors threatening Russia's energy security / K.S. Mochalin, Y.M. Denchik, V.G. Salnikov, A.I. Antonov, D.Yu. Rudi, A.A. Ruppel // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 37–44. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_37.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная и экономическая эффективная деятельность промышленных предприятий различной деятельности обусловлена качественной электрической энергией (ЭЭ). Основную роль в определении требований к ЭЭ, доставляемой генерирующими компаниями, выполняют стандарты электромагнитной совместимости (ЭМС) и качества электрической энергии (КЭ). ГОСТ 32144–2013 выполняет роль основополагающего нормативно-технического и методического документа, в котором установлены нормы КЭ в электрических сетях систем электрооборудования общего назначения [1].

Показатели КЭ как параметры режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) во многом воздействуют на ЭМС технических средств (ТС). Чтобы соответствовать уровням ЭМС, нормы и требования которых приведены в стандарте [1], необходимо

обеспечить технико-экономические показатели производства и качества выпускаемой продукции, защиту жизни и здоровья обслуживающего персонала и граждан в целом, а также защиту электрооборудования [2, 3].

Усугубление ЭМО в электрических сетях общего назначения происходит из-за превышения значений показателей КЭ, которые вышли за нормативно-допустимые пределы стандарта [1]. Из-за текущей проблемы уровни ЭМС технических средств ухудшаются, что в свою очередь обуславливает понижение качества функционирования электрических сетей [2]. В дальнейшем в тексте работы вводится понятия «нестандартные показатели КЭ».

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Электроэнергия, если рассматривать её как товар для различных рынков, характери-

зуется множественными отличительными признаками. основополагающими характеристиками являются: прямое воздействие на разработку изделий различных направлений, а также финансовый критерий производства высококачественного продукта. Все эти признаки напрямую влияют на качество функционирования электрического оборудования [4].

Затруднительность в обеспечении ЭМС технических средств в первую очередь выражается в неустойчивости электрических режимов в ЭЭС, а также низкокачественной ЭЭ.

На практике в электроснабжении на разных уровнях напряжения происходит большое количество коммутационных переключений электропотребителей (технологических, аварийных), варьируется их режим работы, работает автоматика управления режимами электроэнергетических систем и т. д. Более того, регулярно возникают аварийные ситуации (короткие замыкания, обрыв кабельной линии, перенапряжения из-за грозных явлений). Собственно говоря, установившегося режима ЭЭС не существует, а происходит непрерывное изменение режимов — не прекращающийся переходный процесс, протекающий во времени [5].

Показатели КЭ представляют собой основополагающие параметры рассматриваемых режимов ЭЭС. В связи с этим, в ЭЭС регионов и городов полагается внедрение системы непрерывного мониторинга за КЭ. Одновременно с этим ключевые обязанности измерений представляют собой:

- контроль показателей КЭ в соответствии с требованиями госстандарта [2];
- определение факторов расхождений показателей КЭ в соответствии с требованиями нормативно-технической документации [1, 5].

При всех видах испытаний, контроля и измерений показателей КЭ, кроме технологического контроля, надлежит задействовать различные инструменты измерений, воплощающие последовательность действий по обработке результатов измерений согласно условиям ГОСТ 32144–2013 [1, 5].

Впрочем, при существенных несоответствиях показателей КЭ, специальные изме-

рительные устройства (амперметры, вольтметры, счетчики) подлинно не демонстрируют ЭМО из-за расхождения интервалов усреднения скоростей электромагнитных переходных процессов. Данные показатели КЭ дают возможность определить нарушения уровней ЭМС технических средств и опосредованно оценивать действующие в ЭЭС случайные процессы. Помимо этого, современные приборы-анализаторы КЭ (например, «Ресурс-ПКЭ-1.7») представляют показатели КЭ как непрерывно распределенные случайные величины в виде таблиц. Исходя из этого, случайному процессу свойственна неконкретность, поскольку описание ЭМО табличным способом подразумевает вариант определённой системы интервалов, который обуславливается несколькими факторами: опыт исследователя и точность измерений [2, 3, 6].

Первостепенной задачей представления возникновения и влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на режим работы электрической сети с позиции ЭМС является физическое (графическое) представление поля событий в трёхфазных электрических сетях при нестандартных показателях качества электроэнергии [7]. Согласно нормативно-техническому документу ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000–2–5–95) [8], кондуктивные низкочастотные ЭМП представляют собой непредотвратимую угрозу нарушению нормальной работы ЭЭС.

Ключевым обстоятельством восприимчивости электрических сетей разного электрического напряжения в электросетях (низкое, среднее, высокое) промышленных предприятий служат незначительные показатели полной мощности трёхфазных КЗ. В указанных электрических сетях наилучшим образом приводится степень соответствия характеристик энергии в данной точке сети совокупности нормируемых ГОСТ 32144–2013 значений.

Выполнение установленного задания реализуется методом аналогии, в котором подразумевается применение разных видов аналогии (физической и математической) между ЭМО в электрических сетях при нарушениях показателей КЭ и понятием «испытание» в теории вероятностей и мате-

матической статистики. Критерии данной аналогии [9], позволяющей описать пользования операций над событиями при анализе ЭМО в электрических сетях, приведены в научном источнике [10].

ЭМО на подстанциях и в электрических сетях обладает в большей степени возможными электромагнитными воздействиями. По условиям, представленным в [8] ЭМО систематизируется по 4 классам: от лёгкой (класс 1-й) и средней жёсткости (класс 2-й) до жёсткой (класс 3-й) и крайне жёсткой (класс 4-й). Согласно МЭК 61000-2-5-2002 ко всем классам формируются планы действий, реализация которых позволяет обеспечить ЭМО.

Обобщённый анализ ЭЭС общего назначения показал, что выполнение соответствующих требований к 1-му классу показало, что:

- проведены мероприятия по подавлению ЭМП и защите от перенапряжений;
- произведено резервное питание отдельных элементов;
- заземление и экранирование выполнено по требованиям ЭМС;
- погодные условия контролируются, а также одобрены дополнительные средства защиты от разрядов статического электричества.

В свою очередь, проведённые вышеописанные действия не защищают ЭЭС от появления кондуктивных низкочастотных ЭМП в электрических сетях низкого и среднего напряжения, которые распространяются по кабельной продукции.

В ЭЭС необходимо осуществлять непрерывный мониторинг за параметрами КЭ для определения соответствия их условиям на поставку ЭЭ. Однако обнаруживаются многочисленные явления, которые описываются повторением показателей КЭ. Стационарный эргодический процесс – это случайный процесс, который проявляет как стационарность, так и эргодичность. Данный процесс имеет схожесть (повторяемость) физических величин, характеризующих ЭМО в любое время в течение недели (расчётное время), обусловлена однородностью процесса электропотребления.

Рассматриваемые кондуктивные низкоча-

стотные ЭМП, которые приводят к нарушениям уровней ЭМС технических средств, являются случайными событиями [7]. Эти события показывают измеренное значение показателя КЭ в данный момент времени, характеризующее эту помеху. Множество случайных событий формируют поле событий в трёхфазной электрической сети [7].

В стационарном нормальном установившемся режиме отмечаются переходные процессы, которые сопутствуют эксплуатации ЭЭС. Все данные процессы происходят при коммутационных переключениях (отключении и включении) элементов ЭЭС, повышении или понижении мощности электрических нагрузок, а также действий различных регулирующих устройств [1]. Показатели КЭ при данном режиме работы варьируются с вероятностью 0,95 в границах нормально допустимых величин, а также с вероятностью 1,0 – предельно допустимых величин.

При приемлемых значениях показателей КЭ, которые представляют собой усреднённые значения за отчётный период, допускаются без добавления любых поправок, т. е. отсутствует мера зависимости (совместной изменчивости) двух случайных величин. Однако, нужно понимать, что любые электромагнитные процессы в ЭЭС при стандартизированных значениях показателей КЭ независимы от времени проведения измерений. Поэтому при измерении показателя КЭ можно обходиться одной реализацией случайного процесса [1, 4].

Нормированные показатели КЭ представляют собой уровни ЭМС для кондуктивных низкочастотных ЭМП в ЭЭС. При условии выполнения указанных уровней обеспечивается ЭМС электрических сетей систем электроснабжения общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии (приемников электрической энергии) [1, 4, 7].

Также в данном режиме работы ЭЭС показатели КЭ квалифицируют ЭЭ как товар на различных рынках (формулы 1–7) и касаются специализированных разделов метрологии – квалиметрии, которая исследует вопросы измерения качества продукции [1, 4].

В трехфазных системах электроснабжения характеризуются показатели КЭ, которые в течение определённого временного интервала (168 часов) изменяются в следующих границах:

$$\begin{cases} -0,1U_H = -0,1U_C < \delta U_{(-)}, \\ 0,1U_H = 0,1U_C < \delta U_{(+)}, \end{cases} \quad (1)$$

где U_H – номинальное напряжение;
 U_C – согласованное напряжение [11].

$$\begin{cases} -0,2\Gamma_{\text{ц}} < \Delta f_{\text{с}} < 0,2\Gamma_{\text{ц}} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ |\pm \delta f_{\text{n,c}}| = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (2)$$

где t – допустимая продолжительность режима ЭЭС, ч;

$$\begin{cases} -1\Gamma_{\text{ц}} < \Delta f_{\text{с}} < 1\Gamma_{\text{ц}} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ |\pm \delta f_{\text{n,c}}| = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{U(n),n} < K_{U(n),n} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{U(n),n} = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_U < K_{U,n} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{U,n} = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 2\% < K_{2U} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{2U,n} = 0 & \text{при } t_n=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 2\% < K_{0U} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{0U,n} = 0 & \text{при } t_n=168 \text{ ч.} \end{cases} \quad (7)$$

Кроме нормального режима работы ЭЭС существует и утяжелённый режим, который появляется при нарушениях параметров, обусловленных снижением качества ЭЭ. Различие электромагнитных процессов, протекающих при нормируемых показателях КЭ и фактических, объясняется изменением параметров колебательного контура мгновенной мощности от источника до потребителя электроэнергии, обладающего ёмкостью, индуктивностью и активным сопротивлением [12].

Возникновение в ЭЭС кондуктивных низкочастотных ЭМП сигнализирует не

только касательно того, что качество ЭЭ не соответствует требованиям к ней как к товару, но и нарушает нормальный режим её работы. ЭЭС работает в утяжелённом режиме. При данном режиме ЭЭС обнаруживаются нарушения уровней ЭМС технических средств для кондуктивных низкочастотных ЭМП. ЭЭС находится в предаварийном состоянии. Она может перейти в аварийный режим работы, если помехоустойчивость сети как технического средства недостаточно велика.

Исходя из этого, кондуктивные низкочастотные ЭМП являются физическими величинами, описывающими электромагнитные процессы в трёхфазных системах, наделены следующими свойствами [7]:

- представляют собой определённые стохастические величины, устанавливаемые путём преобразования результатов обработки изменений приборов-анализаторов качества ЭЭ за определённый временной промежуток согласно нормативно-технической документации;

- представляют определённые параметры ЭМО в ЭЭС (сети низкого и среднего напряжений);

- определяются интегральными функциями распределения теории вероятностей и математической статистики и вероятностью появления за определённый временной промежуток согласно нормативно-технической документации;

- распространяются по кабельной продукции (гальваническая связь) и в силовых трансформаторах (магнитная связь);

- имеет обширную область распространения, зависящую от вида искажённых показателей КЭ.

В нормативно-технической документации не описывается влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на режимы ЭЭС. Это в настоящее время вызывает неопределённость при решении задач перехода к интеллектуальным электрическим сетям по технологии Smart Grid. В связи с этим многое электрооборудование необходимо контролировать на способность выполнять функциональные обязанности.

При совместной эксплуатации таких систем в ЭЭС важным критерием является ЭМС, которая заключается в способности

ТС функционировать в ЭМО, создаваемой другими электроприёмниками, не вызывая при этом встречного мешающего воздей-

ствия. Эти воздействия создают кондуктивные низкочастотные ЭМП, которые нарушают уровни ЭМС (рис. 1).

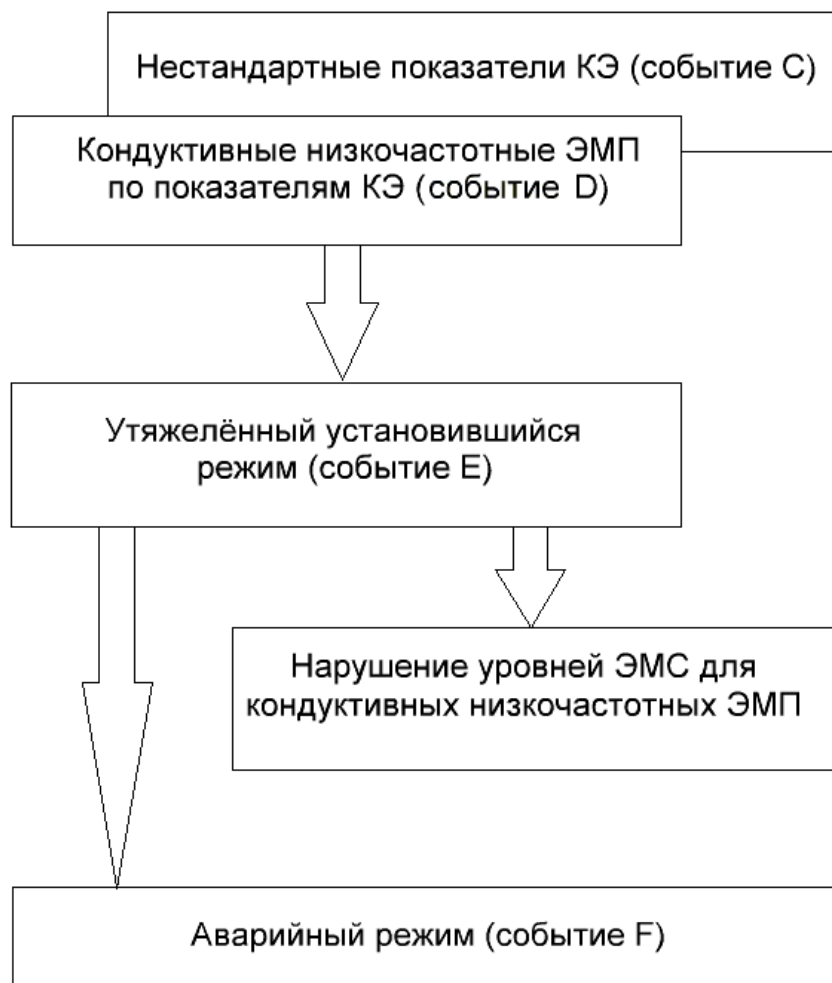


Рис.1. Структурная схема влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на изменения уровней ЭМС ТС и режима работы электрической сети

Fig. 1. Structural diagram of the influence of conductive low-frequency electromagnetic fields on changes in the EMC of technical means and the operating mode of the electrical network

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требуется реализовывать постоянный мониторинг за этими помехами. Нецелесообразно представлять ЭМО в электрических сетях питания ТС только показателями КЭ, необходимо использовать также характеристики, потому что они имеют различные функциональные свойства. При необходимости, согласно ГОСТ 32144–2013, показатели можно регулировать в определённых пределах, а помехи, согласно ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000-2-5-95), необходимо немедленно подавлять специаль-

ми системами, способными ослаблять или устранять влияние помех [13].

В расширяющемся цифровом мире появление кондуктивных низкочастотных ЭМП в системах электроснабжения влечёт за собой снижение надёжности. Перебои менее чем 1/60 секунды достаточны для сбоя работы серверов, компьютеров, систем искусственного жизнеобеспечения, автоматического оборудования и других устройств, работа которых основана на микропроцессорах [2]. Это наблюдается несмотря на то, что современные ЭЭС спроектированы и функционируют по принципу, отвечающему

стандарту надёжности с отказом, например, в США, равным 0,003 %. Это означает, что энергосистема надёжна на 99,997 %.

При переходе к активно-адаптивной (интеллектуальной) ЭЭС обостряется проблема ЭМС технических средств, естественно возрастает необходимость в подавлении кондуктивных низкочастотных ЭМП, так как по определению Smart Grid является концепцией полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системой, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Ситников Г.В. Повышение качества функционирования линий электропередачи. Новосибирск : НГАВТ, 2013. 559 с. ISBN 978-4475-5859-8.
3. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электрических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. вод. тран., 2006. 432 с.
4. Сальников, В.Г. Руководство по выбору структуры и параметров системы электроснабжения предприятия с мощными сериями электролизёров цветных металлов. Москва : Металлургия, 1985. 78 с.
5. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие. Изд. 2-е. Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. 715 с. ISBN 978-5-222-13221-0.
6. Висящев, А.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических систе-

мах: учебник для вузов. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2005. 534 с.

7. Денчик, Ю.М. Определение параметров поля событий в электрических сетях при сложной электромагнитной обстановки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 418-424.
8. ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. Москва : Госстандарт России, 2000. 50 с.
9. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Москва : Наука, 1965. 511 с.
10. Крутов В.И., Глушко И.М., Попов В.В. [и др.] Основы научных исследований: учебник для техн. вузов / под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. Москва : Высш. шк., 1989. 400 с.: ил.
11. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 10-е изд. Москва : Высш. шк., 1978. 528 с.
12. Сальников В.Г., Иванова Е.В., Кислицин Е.Ю. Несимметрия напряжений в трёхфазных системах как электромагнитная помеха: учебное пособие. Москва : Знание-М, 2022. 94 с.
13. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях транспортных систем (теория, расчёт, подавление) // Транспортное дело России. 2006. №8. С. 16-20.

REFERENCES

1. GOST 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electrical Energy Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems. Moscow : Standartinform, 2014. 16 p.
2. Danilov G.A., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. Improving the performance of power transmission lines. Novosibirsk : NGAVT, 2013. 559 p. ISBN 978-4475-5859-8.

3. Ivanova, E.V. Conductive electromagnetic interference in electrical systems /edited by V.P. Gorelov, N.N. Lizalek. Novosibirsk : Novosibirsk State Academy of Water Transport, 2006. 432 p.
4. Salnikov, V.G. Guide to selecting the structure and parameters of the power supply system of an enterprise with powerful series of non-ferrous metal electrolyzers. Moscow : Metallurgy, 1985. 78 p.
5. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electric energy: a textbook. 2nd ed. Rostov-na- Donu : Phoenix, 2008. 715 p. ISBN 978-5-222-13221-0.
6. Visyashchev A.N. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for universities. Irkutsk : Irkutsk State Technical University Publishing House, 2005. 534 p.
7. Denchik Yu.M. Determination of parameters of the event field in electrical networks under complex electromagnetic conditions // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. 2010. No. 2. P. 418-424.
8. GOST R 51317.2.5-2000 (IEC 61000-2-5-95) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic interference at locations of technical equipment. Moscow : Gosstandart of Russia, 2000. 50 p.
9. Smirnov N.V., Dunin-Barkovsky I.V. Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications. Moscow : Nauka. 1965. 511 p.
10. Krutov V.I., Glushko I.M., Popov V.V.[et al.] Fundamentals of Scientific Research: Textbook for Technical Universities / edited by V.I. Krutov, V.V. Popov. Moscow : Higher School, 1989. 400 p.: ill.
11. Bessonov L.A. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits: Textbook. 10th ed. Moscow : Higher. school. 1978. 528 p.
12. Salnikov V.G., Ivanova E.V., Kislitsin E.Yu. Voltage unbalance in three-phase systems as electromagnetic interference: a tutorial. Moscow : Znanie-M. Publishing House, 2022. 94 p.
13. Ivanova, E.V. Conductive electromagnetic interference in transport system networks (theory, calculation, suppression) // Transport business of Russia. 2006. №8. P. 16-20.