

ПРОБЛЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНДУКТИВНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

К. С. Мочалин¹, Ю. М. Денчик¹, А. И. Антонов², Д. Ю. Руди²✉, А. А. Руппель²

¹Сибирский государственный университет водного транспорта,
Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

²Омский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета водного транспорта,
Россия, 644099, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 4

✉ dima_rudi@mail.ru

Обеспечение качества электроэнергии и электромагнитной совместимости на сегодняшний день является первоочередной задачей энергетической безопасности. Энергетическая инфраструктура рассматривается как одна из критически важных инфраструктур РФ. Введение современного электрооборудования и его систем управления на предприятиях различных отраслей промышленности приводит к снижению качества электроэнергии в энергосистемах. Развитие промышленности в РФ и непрерывный рост мощностей электропотребителей приводит к нарушению нормативно-технической документации применительно к качеству электроэнергии. Это, в свою очередь, уменьшает помехоустойчивость и приводит к возникновению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в сети. Данные обстоятельства обуславливают значимость проблемы качества электроэнергии и электромагнитной совместимости.

Цель исследования — изучить пути появления и распространения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и способы их ослабления.

Была сформирована последовательность действий по анализу и определению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех. Рассмотрены вопросы изучения природы возникновения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, их распространение в электроэнергетических системах и способы борьбы с ними.

Внедрение современных тенденций и методов по устранению электромагнитных помех позволит не только заранее оценить влияние помех на элементы электроэнергетических систем, но и надёжность, экономичность и устойчивость электроснабжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, кондуктивная помеха, помехоустойчивость, энергосистема, нормативно-техническая документация

Для цитирования: Мочалин К. С., Денчик Ю. М., Антонов А. И., Руди Д. Ю., Руппель А. А. Проблема возникновения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в электроэнергетике. Омский научный вестник. 2026. № 2 (198). С. 79–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-79-87>. EDN: BXFHGR.



© Мочалин К. С., Денчик Ю. М., Антонов А. И.,
Руди Д. Ю., Руппель А. А., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROBLEM OF EMERGING THE CONDUCTIVE LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

K. S. Mochalin¹, Yu. M. Denchik¹, A. I. Antonov², D. Yu. Rudi²✉, A. A. Ruppel²

¹Siberian State University of Water Transport, Shchetinkina St., 33, Novosibirsk, 630099, Russia

²Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Ivana Alekseyeva St., 4, Omsk, 644099, Russia

✉ dima_rudi@mail.ru

Providing the quality of electricity and electromagnetic compatibility is currently a high priority for energy security. The energy infrastructure is considered as one of the critically important infrastructures of the Russian Federation. The introduction of modern electrical equipment and their control systems in enterprises of various industries leads to a decrease in the electricity quality. The development of industry in the Russian Federation and the continuous growth of the capacity of electric consumers lead to a violation of regulatory and technical documentation regarding the quality of electricity. Thus, it reduces the noise immunity and leads to the conductive low-frequency electromagnetic interference. These facts determine the importance of the problem of electricity quality and electromagnetic compatibility.

The aim of the research is to study the ways of the emergence and distribution of the conductive low-frequency electromagnetic interference and ways of their attenuation.

The authors present a sequence of actions for the analysis and determination of the conductive low-frequency electromagnetic interference. Moreover, the authors consider issues of studying the nature of emerging the conductive low-frequency electromagnetic interference, its spread in electric power systems and ways to deal with them.

The implementation of modern trends and methods to eliminate electromagnetic interference allows not only assessing in advance the impact of interference on the elements of electric power systems, but also on the reliability, efficiency and stability of power supply.

Keywords: electricity quality, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, conductive interference, noise immunity, power system, regulatory and technical documentation

For citation: Mochalin K. S., Denchik Yu. M., Antonov A. I., Rudi D. Yu., Ruppel A. A. Problem of emerging the conductive low-frequency electromagnetic interference in the electric power industry. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):79–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-79-87>. EDN: BXFHGR. (In Russ.).



© Mochalin K. S., Denchik Yu. M., Antonov A. I., Rudi D. Yu., Ruppel A. A., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В связи с развитием полупроводниковой продукции увеличение производственных мощностей приводит к значительному искажению качества электроэнергии, что, в свою очередь, влечет за собой появление в электросистеме кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП). Сами кондуктивные низкочастотные ЭМП по своей сути являются электромагнитными волнами, которые генерируются определёнными промышленными и бытовыми электропотребителями. Данное взаимодействие с чувствительным электрооборудованием приводит к возникновению нежелательных токов и напряжений, которые негативно влияют на работу электрооборудования [1, 2]. Простой производства, выход из строя электрооборудования, а также финансовые потери приводят к отрицательным последствиям в производительности и безопасности электрических систем [3, 4], особенно в критически важных сферах производства, таких как медицина, аэро- и космические технологии и т. д. Кроме того, следует знать, что существуют контролирующие

органы, которые устанавливают нормы ЭМП для обеспечения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости (ЭМС). В связи с вышеизложенным проблема кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и электромагнитной совместимости актуальна в настоящее время. Цель статьи — изучить пути появления и распространения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и способы их ослабления.

Основная часть

Проблема снижения качества электроэнергии как частный случай ЭМС появилась вследствие обширного использования в электроэнергетических системах предприятий различной отрасли мощных специфических энергоустановок (вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, бытовые электроприборы). Данные электроприёмники повышают эффективность (технологическую и экономическую) производственных процессов предприятий различных отраслей и облегчают жизнь потребителей, однако оказывают отрицательное

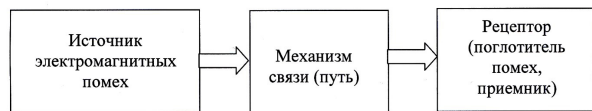


Рис. 1. Схема влияния источника электромагнитных помех на рецептор
Fig. 1. Diagram of the effect of the electromagnetic interference source on the receptor

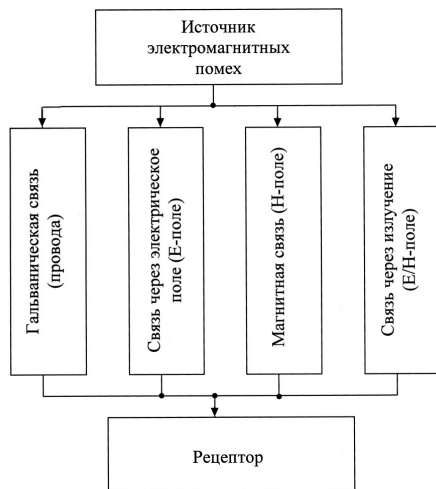


Рис. 2. Механизм связи источника электромагнитных помех и рецептора
Fig. 2. Mechanism of the connection between the electromagnetic interference source and the receptor

влияние на качество электроэнергии, что требует применения системного, научно обоснованного подхода.

Качество электроэнергии и ЭМС взаимосвязаны. Данные понятия определяют способность технических средств функционировать в электрической сети без взаимного негативного влияния. Качество электроэнергии влияет на уровень кондуктивных низкочастотных ЭМП, которые определяют степень ЭМС в системе. Низкое качество электроэнергии (гармонические искажения, несимметрия напряжений, медленные изменения напряжений, отклонение частоты, доза фликера и т. д.) приводит к увеличению кондуктивных низкочастотных ЭМП, что может нарушить работу подключённого оборудования.

Состояние вопроса

Существует несколько ключевых концепций, которые связаны с изучением природы возникновения ЭМП [5, 6]. Кондуктивные (проводимые) низкочастотные ЭМП возникают, когда помеха распространяется по кабельным линиям. Они обычно генерируются при работе высокочастотного электрооборудования. Данные помехи нарушают работу чувствительного оборудования, которое подключено к тем же электрическим сетям. Также имеются и другие виды ЭМП:

— индуктивные (излучаемые) ЭМП являются электромагнитным излучением, которое распространяется в окружающей среде. Источниками данных помех являются радиочастотное оборудование и коммутационные устройства высокой частоты. Последствием данных помех на электросеть является наличие нежелательных электромагнитных

волн, которые оказывают воздействие на радио- и цифровое оборудование и ставят под угрозу целостность системы;

— синфазные и дифференциальные ЭМП возникают, когда осуществляется воздействие на проводник в кабельных линиях. Эффект синфазных ЭМП сказывается на оба проводника, а в случае дифференциальных ЭМП — только на один проводник.

Появление данных ЭМП в энергосистеме возможно из-за несимметрии напряжений и токов, неравномерного комплексного сопротивления и т. д. Негативными последствиями для электрооборудования являются шумы, ухудшение работы измерительного оборудования, сбои, прерывания, искажения сигнала.

Зная причины возникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП, научные сотрудники и технические специалисты могут внедрять эффективные методы и способы борьбы с негативным воздействием кондуктивных низкочастотных ЭМП на элементы электрических сетей. Однако форма появления кондуктивных низкочастотных ЭМП различна, что доставляет определенные трудности по проработке стратегии по их устранению.

Интерференция в электрических сетях появляется в непосредственной близости от источника электромагнитного излучения. Интерференция является взаимодействием двух или более волн, которое приводит к устойчивому усилению или ослаблению интенсивности волн. Чем ближе к чувствительному электрооборудованию наблюдается данная кондуктивная низкочастотная ЭМП, тем сложнее её устранить.

Кондуктивные низкочастотные ЭМП происходят от различных источников естественного или искусственного характера, способных негативно воздействовать на производительность электрооборудования. Изучение причин возникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП критически важно для применения эффективных мер по борьбе с кондуктивными низкочастотными ЭМП и для обеспечения надежности электроэнергетических систем.

Негативное воздействие источника кондуктивных низкочастотных ЭМП на рецептор передается через механизм связи (рис. 1). Между передатчиком и приёмником кондуктивных низкочастотных ЭМП возможно несколько функционирующих связей (рис. 2).

При анализе кондуктивных низкочастотных ЭМП используется термин «путь связи источника и рецептора ЭМП», объединяющий несколько каналов распространения этих помех. Например, на рис. 3 представлен путь проникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП в техническое средство и излучения из него, на основании которого формируется положение. Помехи проникают в техническое средство несколькими способами.

Электрические машины (трансформаторы, асинхронные двигатели и их система управления) являются основными источниками кондуктивных низкочастотных ЭМП. При функционировании данных электропотребителей генерируются электромагнитные поля, создающие помехи другому электрооборудованию, чувствительному к кондуктивным низкочастотным ЭМП [7]. Микропроцессорные системы управления, также входящие в состав электрооборудования, генерируют высокочастотные кондуктивные низкочастотные ЭМП, которые

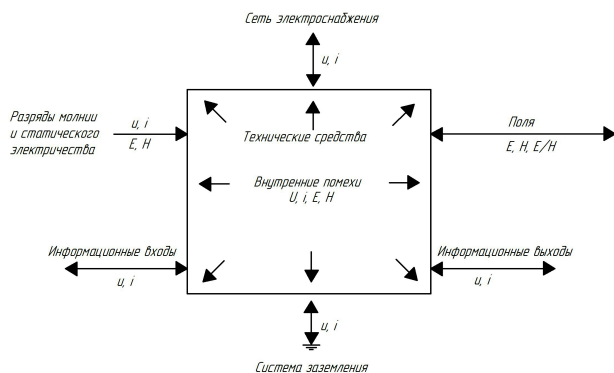


Рис. 3. Пути проникновения электромагнитных помех в техническое средство и излучения из него
Fig. 3. Routes of the electromagnetic interference penetration into technical equipment and the radiation from it

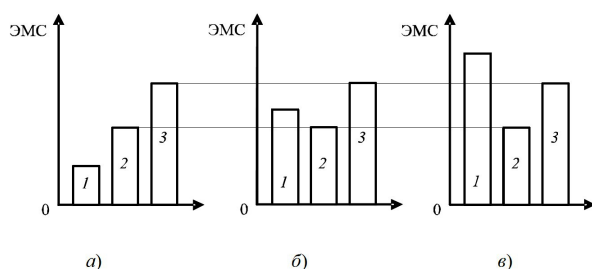


Рис. 4. Электромагнитная обстановка при различных вариантах функционирования электрооборудования:
а) нормальное функционирование технических средств;
б) нормальное функционирование технических средств может быть обеспечено, если воздействие электромагнитных помех ограничено во времени;
в) нормальное функционирование невозможно
Fig. 4. Electromagnetic conditions for various operating modes of electrical equipment:
а) normal functioning of technical equipment;
б) normal functioning of technical equipment can be ensured if the effect of electromagnetic interference is limited in time.;
в) normal functioning is impossible

распространяются по кабельным линиям или излучаются в окружающую среду.

Высоковольтный переменный ток, используемый для передачи электроэнергии на большие расстояния, создает электромагнитные поля [8], которые вызывают появление электрического тока в металлических конструкциях, кабельной продукции и в цепях управления, что приводит к появлению кондуктивных низкочастотных ЭМП электрооборудования в системе радиосвязи. Различные устройства, которые относятся к числу радиочастотных (сотовые вышки, радиопередатчики) излучают электромагнитные волны в широком диапазоне частот, которые негативно воздействуют на промышленное электрооборудование.

Природные воздействия (молнии, грозы и другие атмосферные возмущения) способны генерировать мощные помехи, которые распространяются на огромные расстояния [6]. Данные явления, хоть и кратковременные, вызывают появление напряжения и тока сверхвысокого числового значения в кабельных линиях, что приводит к выходу из строя либо к сбоям работы электрооборудования, особенно находящегося на открытом пространстве.

Факторы окружающей среды (влажность, перепады температур, электромагнитное загрязнение окружающей среды) могут усугубить проблемы,

связанные с кондуктивными низкочастотными ЭМП. Появление поверхностной электропроводности из-за наличия в воздухе влаги и пыли приводит к увеличению воздействия электромагнитных волн и к повышению уровня помех.

Реакция любого электроустройства на воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП зависит от его помеховосприимчивости (иначе — электромагнитной восприимчивости) и помехоустойчивости. Указанные параметры характеризуются способностью или неспособностью выполнять свои функциональные возможности при наличии кондуктивных низкочастотных ЭМП и отсутствию средств защиты.

Электромагнитную обстановку, т. е. совокупность электромагнитных явлений и (или) процессов в данной области пространства и (или) данной проводящей среде в частотном или временном диапазонах демонстрирует рис. 4.

На рис. 4 показаны уровни ЭМП (1) в точке подключения технических средств к электрической сети, помехоустойчивость технического средства (2) и помехоустойчивость (3) электрической сети в целом остаются постоянными, а уровни электромагнитных помех в сети возрастают. Случай а) характеризует нормальное функционирование технических средств; б) воздействие электромагнитных помех было кратковременным, т. е. не утратило своих функциональных возможностей; в) нормальное функционирование технических средств невозможно.

По своей природе происхождения кондуктивные низкочастотные ЭМП не представляют опасности для человека, но негативно влияют на различные элементы электроэнергетических систем. Различают множество факторов воздействия кондуктивных низкочастотных ЭМП: мощность оборудования, частота сети, расположение электрооборудования и его чувствительность. Ниже более подробно приведены потенциальные негативные последствия кондуктивных низкочастотных ЭМП для электрооборудования различных сфер производства [6]:

— снижение производительности. Помехи нарушают нормальное функционирование электрооборудования, что приводит к сбоям и полной остановке технологического процесса. Шум, гармонические искажения, вибрации в электрических машинах — все это негативно влияет на потери (электрические и экономические);

— снижение безопасности. В критически важных сферах жизнеобеспечения (больницы, поликлиники), а также в аэрокосмических системах и производствах любые негативные воздействия кондуктивных низкочастотных ЭМП приводят к случаям угрозы здоровью человека и окружающей среде. Из-за широкого использования микропроцессорной техники и датчиков информационно-измерительных систем, которые входят в состав органов управления электрооборудования, навигационного оборудования и т. д., наличие кондуктивных низкочастотных ЭМП может нарушить работу оборудования, что влечет за собой угрозу здоровью людей и целостности имущества;

— несоответствие требованиям нормативно-технической документации. Различные контролирующие органы, которые регламентируют качество электроэнергии и электромагнитную совместимость, ссылаясь на государственные стандарты, устанавливают строгие запреты на несоответствие различных показателей качества электроэнергии

требованиям стандартов. Несоблюдение этих условий может привести к юридическо-правовым санкциям, которые в дальнейшем негативно скажутся на производительности продукции и репутационных показателях предприятий. Необходимо проводить измерение показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости и предпринимать меры по снижению кондуктивных низкочастотных ЭМП на разных этапах проектирования и производственного процесса предприятий [9–11];

— финансовые потери. Последствия снижения производительности электрооборудования, снижения безопасности эксплуатации и невыполнения требований нормативно-технической документации сказываются на производственных мощностях промышленных предприятий. Выход из строя любого электрооборудования в технологическом процессе производства продукции (простой, сбой, ремонт) сказывается на его качестве и количестве. Дорогостоящий ремонт, покупка нового оборудования, установка дополнительной защиты, перепроектирование электрической сети предприятий приводят к существенным финансовым убыткам. Также не стоит забывать про косвенные расходы (репутация, юридическая ответственность), которые вносят свой вклад в денежные потери.

Методы

Существуют различные способы повышения качества электроэнергии и ЭМС:

— экранирование [12]. Используется в основном в радиоэлектронике. Правильное размещение чувствительных элементов в корпусе позволяет блокировать внешние электромагнитные поля, что исключает попадание ЭМП в электроприбор. Также использование специальных экранирующих материалов (алюминий, медь, пластмасса) снижает внешнее воздействие ЭМП. В перспективе возможно применение многофункциональных материалов, графена и углеродных нанотрубок для расширения функциональных возможностей использования данного способа;

— фильтрокомпенсирующие устройства. Применение в электрических сетях получили пассивные, активные и гибридные фильтры [13]. Принцип действия активного фильтра гармоник основан на непрерывном анализе гармонического состава нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник, но с противоположной фазой. Пассивные фильтры состоят из пассивных элементов: конденсаторов, индуктивностей и/или резисторов. Для фильтрации высших гармоник тока и напряжения фильтрокомпенсирующие устройства подключаются параллельно существующей нелинейной нагрузке. Установка пассивных фильтров позволяет создать линии для протекания токов одной или нескольких гармоник, что приводит к их поглощению и препятствует их генерированию в питающую сеть. Гибридные фильтры — это новый класс силовых фильтров, сочетающих свойства силовых пассивных и активных фильтров, имеющих меньшую мощность активной части по сравнению с чисто активными фильтрами. Гибридные фильтры представляют собой комбинацию резонансного LC-фильтра и активного элемента на базе малоомощного активного фильтра. Гибридный фильтр содержит один или два резонансных контура, настроенных на наиболее значимые гармоники тока (напряжения). В большинстве схем это один контур, настроенный на 5-ю гармонику. Перспективность ис-

пользования фильтрокомпенсирующих устройств заключается в развитии алгоритмов управления, использовании сверхпроводниковых материалов и интеграции с системами хранения энергии;

— заземление [14]. Данный способ в основном направлен на снижение синфазных помех благодаря подключению контура заземления. Металлический стержень должен быть эффективно проложен, чтобы обеспечить путь наименьшего сопротивления и снизить помехи. Заземляющая полоса, которая соединяет между собой металлические стержни, позволяет выровнять разность потенциалов. Все это дает возможность эффективно бороться с синфазными помехами. Существуют разные виды заземлителей помимо металлического стержня:

1) гибкий графитовый композитный материал — неметаллический материал на основе чешуйчатого графита высокой чистоты с иерархической структурой многожильных проводов. Обладает высокой физической и химической стабильностью, устойчив к коррозии, что увеличивает срок службы заземляющих устройств;

2) углеродные композиты и нанотрубки улучшают проводимость заземляющих систем, снижая сопротивление и повышая эффективность растекания тока. Такие материалы особенно полезны в условиях высокого удельного сопротивления грунта;

3) K2M-MO3 — грунтовый наполнитель с низким удельным сопротивлением растеканию тока. Применяется в грунтах с высоким удельным сопротивлением.

Различные методы экранирования, фильтрокомпенсирующие устройства (активные, пассивные, гибридные), заземление и зануление может свести к минимуму воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП и обеспечить надежную и эффективную работу энергосистемы. Для более эффективного снижения уровня кондуктивных низкочастотных ЭМП возможно сочетание нескольких способов.

Внедряя эти методы снижения уровня ЭМП при проектировании, установке и эксплуатации электрических систем, инженеры и технические специалисты могут свести к минимуму воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП, обеспечить надежность оборудования и соответствие стандартам. Комплексное решение этой задачи оказывается целесообразным с экономической точки зрения.

По мере того как электронные устройства становятся всё более распространёнными, методы борьбы с кондуктивными низкочастотными ЭМП совершенствуются для решения данной проблемы. Существуют перспективные тенденции и методы для устранения ЭМП:

— устранять последствия кондуктивных низкочастотных ЭМП на стадии разработки. Такой способ возможен при моделировании и проектировании электрической сети. Он позволяет выявить потенциальные источники кондуктивных низкочастотных ЭМП на ранней стадии, что способствует снижению финансовых затрат [15];

— искусственный интеллект [16]. Внедрение искусственного интеллекта в прогнозирование позволяет заранее оценить влияние кондуктивных низкочастотных ЭМП. Благодаря инструментам искусственного интеллекта возможно анализировать большое количество данных об ЭМП, а также усовершенствовать стратегию по устранению кондуктивных низкочастотных ЭМП и повысить ЭМС.

Однако необходима теоретическая и практическая реализация перспективных тенденций и мето-



Рис. 5. Функциональные возможности программы
Fig. 5. Program functionality

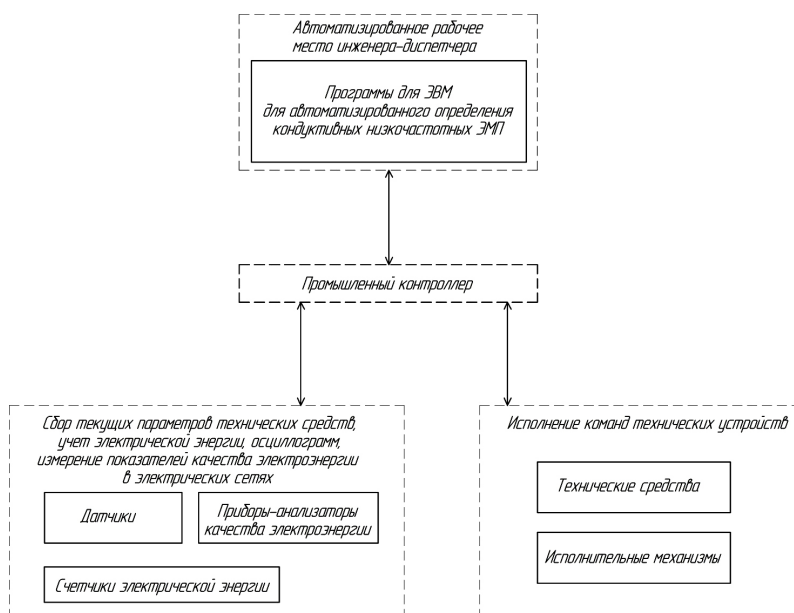


Рис. 6. Структурная схема метода автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных ЭМП

Fig. 6. Structural diagram of the method for the automated determination of the conductive low-frequency electromagnetic interference

дов совместно. При использовании математического аппарата теории вероятности и математической статистики созданы алгоритмы и программные обеспечения для определения кондуктивных низкочастотных ЭМП. Функциональные возможности данных программ представлены на рис. 5. Благодаря этим программам возможно производить автоматизированный расчёт параметров кондуктивных низкочастотных ЭМП: математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и расчёт вероятности выхода значения за нормируемый предел [17–20].

Таким образом, реализация обеспечения качества электроэнергии с помощью программ для ЭВМ является основой метода автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных ЭМП (рис. 6). Метод сводится к оригинальному способу обработки программой для ЭВМ данных, полученных в ходе измерения показателей качества

электрической энергии, что позволит научно обоснованно оценивать электромагнитную обстановку в электрических сетях и принимать необходимые эффективные технические решения для подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП при их наличии.

Искусственный интеллект способен функционировать в ключевых направлениях электроэнергетики: мониторинг и диагностика в реальном времени, прогнозирование качества электроэнергии, оптимизация работы компенсационных устройств и т. д.

В основном применяют следующие технологии искусственного интеллекта:

- искусственные нейронные сети — для анализа многомерных данных и выявления скрытых закономерностей;
- глубокое обучение (Deep Learning) — для классификации типов искажений и прогнозирования качества электроэнергии;

— методы кластеризации (K-means, DBSCAN) — для группировки схожих режимов работы сети;

— алгоритмы временных рядов (LSTM, Prophet) — для прогнозирования нагрузки и отклонений параметров.

Интеграция технологий искусственного интеллекта в промышленные контроллеры открывает новые возможности для адаптивного и интеллектуального управления технологическими процессами и позволяет:

1) адаптировать управление под изменяющиеся условия;

2) компенсировать нелинейности объекта управления;

3) прогнозировать поведение системы;

4) обнаруживать аномалии и предсказывать отказы.

Таким образом, применение искусственного интеллекта в задачах обеспечения качества электроэнергии — это не просто технологическая модернизация, а фундаментальный переход к интеллектуальным, самообучающимся энергосистемам. При грамотной реализации такие решения способны радикально повысить надёжность, экономичность и устойчивость электроснабжения, адаптируясь к динамике современных нагрузок и условий эксплуатации. Они трансформируют подход от ручного анализа и периодических проверок к непрерывному автоматизированному управлению качеством электроэнергии в режиме реального времени.

Заключение

Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи являются следствием дисбаланса в работе электроэнергетической системы и отражают нарушение параметров качества электроэнергии. Их анализ и контроль важны для поддержания надёжности и эффективности работы оборудования, а также для обеспечения электромагнитной совместимости технических средств в сети.

Искусственный интеллект становится системообразующим элементом современной электроэнергетики, трансформируя её из статичной иерархической структуры в динамичную, самонастраивающуюся систему. Его внедрение не сводится к автоматизации отдельных процессов — оно меняет саму логику функционирования энергокомплексов и выстраивает их работу вокруг данных, прогнозов и адаптивных алгоритмов.

Список источников / References

1. Иванов М. Н., Смыков Ю. Н. Электромагнитная обстановка в электрических сетях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 252–255. EDN: THBWJV.

Ivanov M. N., Smykov Yu. N. Electromagnetic environment in electric networks. *Nauchnyye Problemy Transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014;1-2:252–255. EDN: THBWJV. (In Russ.).

2. Горелов Ю. И., Кузнецова А. Д., Лыпырева П. С., Шашаева В. А. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях с резкопеременными нелинейными нагрузками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 209–214. EDN: YTEKMX.

Gorelov Yu. I., Kuznetsova A. D., Lypireva P. S., Shashayeva V. A. Improving the quality of electric power in electrical networks with rapidly changing nonlinear loads. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2018;12:209–214. EDN: YTEKMX. (In Russ.).

3. Васенин А. Б., Степанов С. Е., Подшивалов Е. С., Крюков О. В. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 9 (170). С. 34–43. EDN: IYBDSO.

Vasenin A. B., Stepanov S. E., Podshivalov E. S., Kryukov O. V. Support problems qualities electricity in industrial power supply systems. *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2023;9(170):34–43. EDN: IYBDSO. (In Russ.).

4. Ананьина Т. В., Иванова Е. В., Переладов М. Е. [и др.]. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи при изменении перетока мощности в сетях с глухозаземлённой нейтралью // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2024. № 1. С. 196–202. EDN: BEAGBF.

Ananina T. V., Ivanova E. V., Pereladov M. E. [et al.]. Conductive low-frequency electromagnetic interference when changing power flow in networks with a solidly grounded neutral. *Nauchnyye Problemy Transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2024;1:196–202. EDN: BEAGBF. (In Russ.).

5. Аполлонский С. М. Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике: монография. Москва: Издательство «Русайнс», 2016. 324 с. ISBN 978-5-4365-0624-1. <https://doi.org/10.15216/978-5-4365-0624-1>. EDN: VQOWSX.

Apollonskiy S. M. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i funktsional'naya bezopasnost' v elektroenergetike*. Moscow, 2016. 324 p. ISBN 978-5-4365-0624-1. <https://doi.org/10.15216/978-5-4365-0624-1>. EDN: VQOWSX. (In Russ.).

6. Цицикян Г. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: монография. Санкт-Петербург: ЭЛМОР, 2007. 182 с. ISBN 5-7399-0141-3. EDN: QMJWJV.

Tsitsikyan G. N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike*. Saint Petersburg, 2007. 182 p. ISBN 5-7399-0141-3. EDN: QMJWJV. (In Russ.).

7. Шабалина Н. А. Электромагнитные помехи в промышленности: принципы возникновения и влияние на электронное оборудование // Инновации в науке. 2012. № 13-1. С. 103–109. EDN: PENTZX.

Shabalina N. A. Industrial electromagnetic interference: origin and impact on electronic equipment. *Innovatsii v Nauke*. 2012;13-1:103–109. EDN: PENTZX. (In Russ.).

8. Смыков Ю. Н. Аспекты повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 17–23. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.64.78.003>. EDN: XQHTFX.

Smykov Yu. N. Issues of improving the quality of electric energy in autonomous power supply systems. *Promyshlennaya Energetika*. 2022;11:17–23. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.64.78.003>. EDN: XQHTFX. (In Russ.).

9. Кузнецов А. В., Чикин В. В. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 2 (22). С. 90–100. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_90. EDN: HYGymT.

Kuznetsov A. V., Chikin V. V. Assessment of cost of harmful effects of transmission and consumption of electricity of reduced quality in power supply systems. *Smart Electrical Engineering*. 2023;2(22):90–100. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_90. EDN: HYGymT. (In Russ.).

10. Петров А. Р., Грачева Е. И. Разработка методики оценки потерь электроэнергии в промышленных сетях электроснабжения // Вестник ПИТТУ имени академика М. С. Осими. 2024. № 4(33). С. 48–56. EDN: PWCJGT.

Petrov A. R., Gracheva E. I. Development of a methodology for assessing electricity losses in industrial power supply networks. *Bulletin of PITTU*. 2024;4(33):48–56. EDN: PWCJGT. (In Russ.).

11. Большаков О., Воронин В., Шамонов Р., Тульский В. Подходы к обеспечению нормативного качества электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1 (22). С. 48–51. EDN: TXUPHP.

Bolshakov O., Voronin V., Shamonov R., Tulskey V. Approaches to ensuring the regulatory quality of electricity. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2014;1(22):48–51. EDN: TXUPHP. (In Russ.).

12. Калашникова О. П., Петров П. Э., Андреев П. Г. [и др.]. Экранирование как метод обеспечения электромагнитной совместимости // Современные информационные технологии. 2019. № 29. С. 133–139. EDN: NZFXLC.

Kalashnikova O. P., Petrov P. E., Andreev P. G. [et al.]. Shielding as method of ensuring electromagnetic compatibility. *Contemporary Information Technologies*. 2019;29:133–139. EDN: NZFXLC. (In Russ.).

13. Платонова Е. В., Коловский А. В., Торопов А. С., Метелев В. А. Применение фильтрокомпенсирующих устройств для повышения качества напряжения угольных разрезов // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 8 (134). С. 9. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.35>. EDN: TNBOZC.

Platonova Y. V., Kolovskii A. V., Toropov A. S., Metele V. A. Application of filter compensating devices to improve voltage quality at coal mines. *International Research Journal*. 2023;8(134):9. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.35>. EDN: TNBOZC. (In Russ.).

14. Скворцов В. Заземление и экранирование как способы обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств // Силовая электроника. 2020. № 2 (83). С. 52–59. EDN: EZJDPV.

Skvortsov V. Zazemleniye i ekranirovaniye kak sposoby obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti elektronnykh ustroystv. *Silovaya Elektronika*. 2020;2(83):52–59. EDN: EZJDPV. (In Russ.).

15. Куликов О. Е., Шалумов А. С. Обеспечение электромагнитной совместимости на ранних стадиях проектирования радиоэлектронной аппаратуры: средства и методы реализации // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 12–18. EDN: NTMIOD.

Kulikov O. E., Shalumov A. S. Electromagnetic compatibility in early stages of design of electronic equipment: means and methods of implementation. *Achievements of Modern Radioelectronics*. 2011;1:12–18. EDN: NTMIOD. (In Russ.).

16. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В., Белецкая С. Ю. Использование искусственных нейронных сетей для оценки воздействия электромагнитных помех // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 8. С. 21–27. EDN: OVTIGB.

Romashchenko M. A., Vasilchenko D. V., Beletskaia S. Yu. Use of artificial neural networks to assess the impact of electromagnetic interference. *Radio Engineering*. 2023;87(8):21–27. EDN: OVTIGB. (In Russ.).

17. Руди Д. Ю., Вишнягов М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78>. EDN: ITCMBE.

Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel A. A. Computer program for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage. *The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:65–78. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78>. EDN: ITCMBE. (In Russ.).

18. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. Моделирование несимметричных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 48–54. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-48-54>. EDN: XMRQFN.

Antonov A. I., Denchik Yu. M., Zubanov D. A. [et al.]. Simulation of asymmetric modes of operation of electrical network and processing of results using computer program. *Omsk Scientific*

Bulletin. 2018;2(158):48–54. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-48-54>. EDN: XMRQFN. (In Russ.).

19. Котова Н. В., Власьевский С. В., Малышева О. А. Виртуальный прибор для измерения расхода и показателей качества электроэнергии электровозов переменного тока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 3 (24). С. 56–58. EDN: OKYRJB.

Kotova N. V., Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A. Virtual instrument for measuring the flow rate and quality indicators of ac electric locomotives. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo Regiona*. 2020;3(24):56–58. EDN: OKYRJB. (In Russ.).

20. Губская Е. И. Решение задач электромагнитной совместимости специализированными программными средствами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 68–78. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.3.007>. EDN: QHWSFN.

Gubskaya E. I. Solving the problems of electromagnetic compatibility by using specialized software. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences*. 2022;13(3):68–78. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.3.007>. EDN: QHWSFN. (In Russ.).

Вклад авторов:

К. С. Мочалин. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, формулирование выводов.

Ю. М. Денчик. Проведение обзора литературы на тему исследования и анализ проведённых результатов.

А. И. Антонов. Проведение обзора литературы и анализ проведённых результатов.

Д. Ю. Руди. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, оценка результатов исследований, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

А. А. Руппель. Проведение обзора литературы и анализ проведённых результатов.

Authors' contribution:

Konstantin S. Mochalin. Setting the research aim and objectives, analysing the state of the issue, formulating conclusions.

Yuliya M. Denchik. Conducting a literature review and analysing the results.

Aleksandr I. Antonov. Conducting a literature review and analysing the results.

Dmitriy Yu. Rudi. Setting the research aim and objectives, analysing the state of the issue, evaluating research results, formulating conclusions, preparing the text of the article.

Aleksandr A. Ruppel'. Conducting a literature review and analysing the results.

Информация об авторах:

МОЧАЛИН Константин Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ректор Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Новосибирск.

SPIN-код: 9418-7320

AuthorID (РИНЦ): 564384

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

ДЕНЧИК Юлия Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Новосибирск.

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

АНТОНОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водно-

го транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

e-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

e-mail: dima_rudi@mail.ru

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование», ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 3386-9834

AuthorID (РИНЦ): 423886

e-mail: elektrotex@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 09.03.2026; принята к публикации 03.06.2026.

Information about the authors:

МОЧАЛИН Konstantin Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Rector, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 9418-7320

AuthorID (RSCI): 564384

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

DENCHIK Yuliya Mikhaylovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric

Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

ANTONOV Aleksandr Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

e-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUDI Dmitriy Yur'yevich, Senior Lecturer of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

e-mail: dima_rudi@mail.ru

RUPPEL' Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 3386-9834

AuthorID (RSCI): 423886

e-mail: elektrotex@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 09.03.2026; accepted for publication 03.06.2026.