

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.8>

УДК: 621.391.82; 621.31

## МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, Р.Р. Мубаракوف

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Статья поступила в редакцию 15 марта 2023 г.

**Аннотация.** Широкое применение преобразователей электроэнергии, работающих на высоких частотах и обладающих улучшенными массогабаритными показателями, обостряет проблему внутрисистемной электромагнитной совместимости технических систем. При этом, часто, задачи электромагнитной совместимости проявляются только уже в условиях полного монтажа и эксплуатации. Поэтому, целью данной работы является разработка методики и средств для исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации. Создан емкостной датчик для измерения кондуктивных помех в корпусе преобразователя электроэнергии и в проводящих элементах конструкции технических систем. Приведены примеры исследования кондуктивных помех от импульсного источника электропитания во временной и частотной областях. Предложена схемотехническая модель и проведен расчет реальных параметров кондуктивных помех. В рассмотренном примере амплитуда помех достигает нескольких десятых долей вольта, и существенная часть энергии находится в диапазоне до 10 МГц. Представлены зависимости снижения амплитуды кондуктивных помех от расстояния до источника. Помехи без существенного ослабления могут распространяться до

нескольких метров по проводящим элементам конструкции. При этом с увеличением расстояния увеличивается колебание напряжения на переднем и заднем фронте импульсов. Предложенную методику и средства можно использовать для исследования возможных путей распространения и параметров кондуктивных помех от разных источников в области их эксплуатации, а также для оценки эффективности принимаемых мер по снижению помех.

**Ключевые слова:** преобразователь электроэнергии, импульсный источник электропитания, кондуктивная помеха, электромагнитная совместимость, методика, измерение, ёмкостной датчик, схемотехническая модель.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-20092, <https://rscf.ru/project/22-29-20092/> и Кабинета Министров Республики Татарстан.

**Автор для переписки:** Гизатуллин Зиннур Марселевич, [zmgizatullin@kai.ru](mailto:zmgizatullin@kai.ru)

## Введение

Преобразователи электроэнергии, входящие в состав любых электронных, радиоэлектронных средств, систем автоматизации, различного оборудования, являются связующим звеном между потребителями и системой электроснабжения [1,2]. При этом низкочастотные помехи в электросетях чаще всего создаются работой электромеханического оборудования, например, электродвигателями. Современные импульсные преобразователи электроэнергии также создают мощные высокочастотные электромагнитные помехи [3-6]. Таким образом, бурное развитие преобразователей электроэнергии, работающих на высоких частотах преобразования и обладающих высокой экономичностью и улучшенными массогабаритными показателями, обострило проблему внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) сложных технических систем. Высокочастотные помехи обладают большой проникающей способностью. Наиболее чувствительны к электромагнитным помехам воспроизводящая аппаратура, устройства обработки изображений, вычислительная техника и др. [7-11]. Разработчику электронной

аппаратуры приходится учитывать возможность существования помех, как в питающей сети, так и в окружающем пространстве, что вызывает необходимость защищать свои электронные схемы от их воздействия.

Что же касается непосредственного источника электромагнитных помех в составе преобразователей электроэнергии, то основной вклад – это следствие быстрого переключения силовых элементов. Время нарастания и спада фронта импульса силовых элементов измеряется в наносекундах. Это, собственно, и необходимо для достижения высокой эффективности. Высокочастотные электромагнитные помехи распространяются как по проводам (кондуктивные помехи), так и через окружающее пространство (излучаемые помехи). Кондуктивные помехи можно разделить на две составляющие: синфазные и дифференциальные. Дифференциальные помехи проходят по линиям электропитания и не связаны с заземлением. Они измеряются между двумя проводами линии. Синфазные помехи измеряются между одним из проводов и землей [3,4,12,13].

Цель данной работы – разработка методики и средств для исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации.

## **1. Методика и средства для исследования кондуктивных помех**

Для экспериментального исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации предлагается сравнительно простая методика. На первом этапе предполагаются измерения существующих (фоновых) кондуктивных помех при функционировании штатных энергетических устройств. Далее включается новый преобразователь электроэнергии (объект исследования) и измерения повторяются. Например, такой подход может был предложен для исследования помех на борту самолета в условиях его модернизации за счет добавления новых преобразователей электроэнергии. При этом область интереса, расположение и ориентация датчика, и другие параметры должны изначально выбираться с учетом

добавления нового источника помех. Также они не должны изменяться в течение последующих исследований.

Одним из наиболее распространённых типов преобразователей электроэнергии являются импульсные источники электропитания [1,2]. В данной работе, в качестве тестового объекта исследования рассматривается импульсный источник со следующими параметрами: входное напряжение 220 В 50 Гц; выходное напряжение 12 В; ток потребления до 1,25 А (рис. 1).

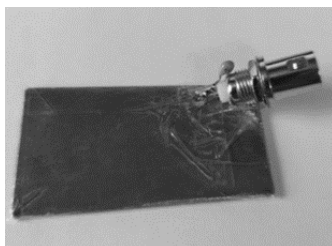


Рис. 1. Тестовый импульсный источник электропитания

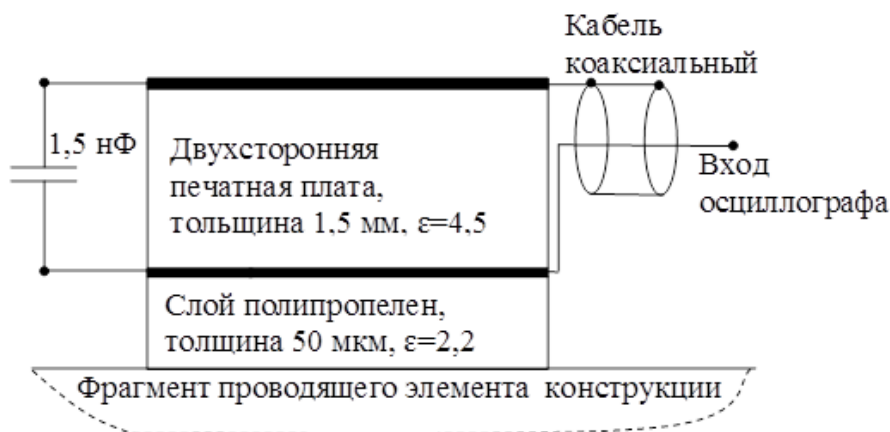
Для исследования кондуктивных помех, возникающих в импульсном источнике электропитания, разработан емкостной датчик (рис. 2). Основанием датчика является двухсторонний фольгированный стеклотекстолит с размерами 60x30 мм. На измерительную сторону основания припаяна центральная жила гнезда BNC. Общий провод гнезда BNC припаян к другой стороне основания. Между центральным и общим проводом подключена компенсационная емкость 1,5 нФ.

В рассматриваемом примере импульсный источник электропитания имеет внешний диэлектрический корпус. Поэтому, когда емкостной датчик прикладывается к корпусу то он измеряет напряжение во внутреннем проводящем экранирующем слое, который также выполняет роль радиатора для отвода тепла от элементов. В случае, когда импульсный источник электропитания имеет проводящий корпус, датчик позволяет измерять кондуктивные помехи, возникающие непосредственно на его корпусе. Также, емкостной датчик (1) позволяет измерять наведенные кондуктивные помехи на близлежащих проводящих элементах конструкции технических систем (рис. 3). Для исследования данного случая используется проводящая дюралюминиевая

пластина толщиной 1 мм, на котором располагаются тестовый (2) и фоновый импульсный источник электропитания (3).



а



б

Рис. 2. Фото (а) и конструкция (б) емкостного датчика

В рассматриваемом примере импульсный источник электропитания имеет внешний диэлектрический корпус. Поэтому, когда емкостной датчик прикладывается к корпусу то он измеряет напряжение во внутреннем проводящем экранирующем слое, который также выполняет роль радиатора для отвода тепла от элементов. В случае, когда импульсный источник электропитания имеет проводящий корпус, датчик позволяет измерять кондуктивные помехи, возникающие непосредственно на его корпусе. Также, емкостной датчик (1) позволяет измерять наведенные кондуктивные помехи на близлежащих проводящих элементах конструкции технических систем (рис. 3). Для исследования данного случая используется проводящая дюралюминиевая пластина толщиной 1 мм, на котором располагаются тестовый (2) и фоновый импульсный источник электропитания (3).

Для измерения напряжения кондуктивных помех используется осциллограф Tektronix TDS2022B. Осциллограф имеет полосу пропускания до 200МГц и максимальную частоту дискретизации в реальном времени 2 ГГц.

Устройство также имеет анализатор спектра на основе быстрого преобразования Фурье. Входной импеданс осциллографа 1 МОм, входная емкость 20 пФ. Указанных параметров осциллографа достаточно для исследования большинства задач исследования кондуктивных помех от современных преобразователей электроэнергии.

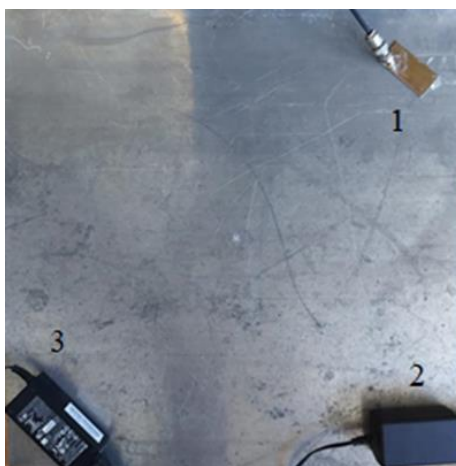


Рис. 3. Фото стенда для измерения наведенных кондуктивных помех в проводящих элементах вблизи импульсного источника

Для вычисления реального значения напряжения кондуктивных помех на проводящей поверхности, на основе измеренного осциллографом напряжения, используется схемотехническая модель, представленная на рис. 4. Модель реализована в отечественном программном комплексе схемотехнического моделирования ПА-9 (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [14].

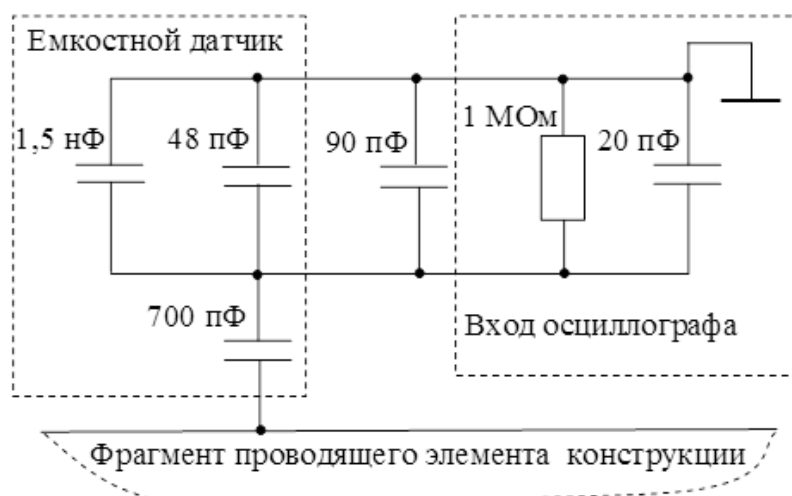


Рис. 4. Схемотехническая модель для расчета реального напряжения кондуктивных помех

Таким образом, в данном разделе предложена методика и разработаны средства для измерения кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации. Данные инструменты могут быть использованы для исследования, выявления путей распространения и оценки эффективности принимаемых мер для снижения кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в составе технических систем.

## 2. Результаты исследования кондуктивных помех

На рис. 5 представлены результаты измерений в виде осциллограмм напряжений кондуктивных помех на элементах конструкции импульсного источника электропитания. Результаты показывают, что длительность импульсов напряжения составляет примерно 1 мкс, частота повторения 47 кГц (рис. 5а, б). Также, результаты измерения в области малых времен позволяет выявить динамические временные параметры импульсов. Передний фронт импульса (в данном случае спад) составляет около 80–100 нс, задний фронт около 200 нс (рис. 5в).

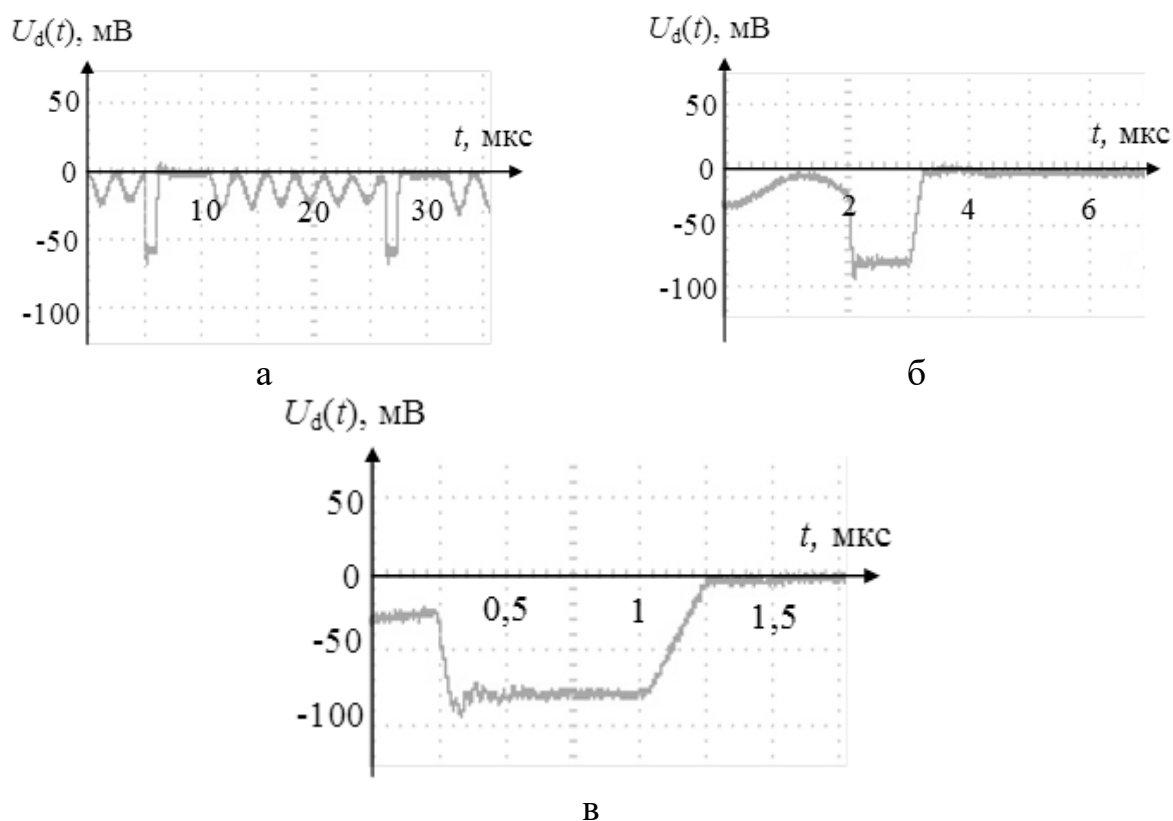


Рис. 5. Осциллограммы напряжения кондуктивных помех

Для расчета реальных значений параметров кондуктивных помех используется схемотехническая модель, представленная на рис. 4 (рис. 6).

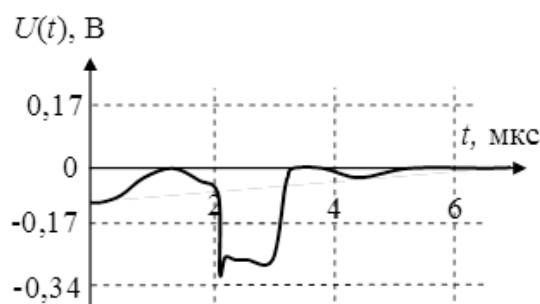


Рис. 6. Расчетная кондуктивная помеха

На рис. 7 приведена относительная амплитуда напряжения кондуктивной помехи ( $A_K(r)$ ) в проводящем элементе в зависимости от расстояния на котором установлен импульсный источник электропитания (рис. 3) [15,16]. Как видим, кондуктивные помехи без существенного ослабления могут распространяться на достаточно большие расстояния (до нескольких метров). При этом с увеличением расстояния увеличивается «звон» (колебания) напряжения на переднем и заднем фронте импульсов.

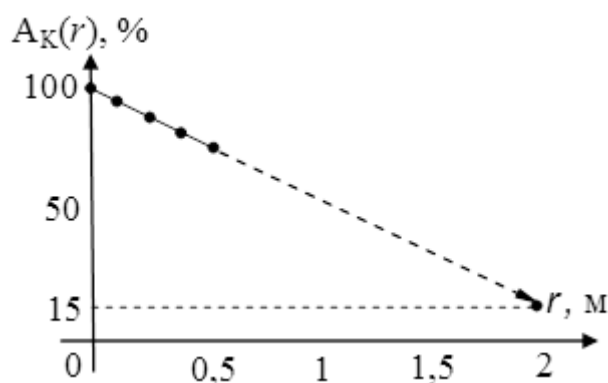


Рис. 7. Зависимость относительной амплитуды напряжения кондуктивных помех от расстояния распространения по проводящему элементу (сплошная линия – измеренные значения; штриховая линия – экстраполяция)

Спектральная плотность рассматриваемых кондуктивных помех импульсного источника электропитания получены путем применения быстрого преобразования Фурье (рис. 8). Как видим, существенная часть энергии данных кондуктивных помех находится в диапазоне до 10 МГц. Можно качественно увидеть и выделить увеличение спектральной плотности кондуктивных помех в



данном диапазоне при включении тестового источника (2) при работе фонового импульсного источника электропитания (3) (рис. 3).

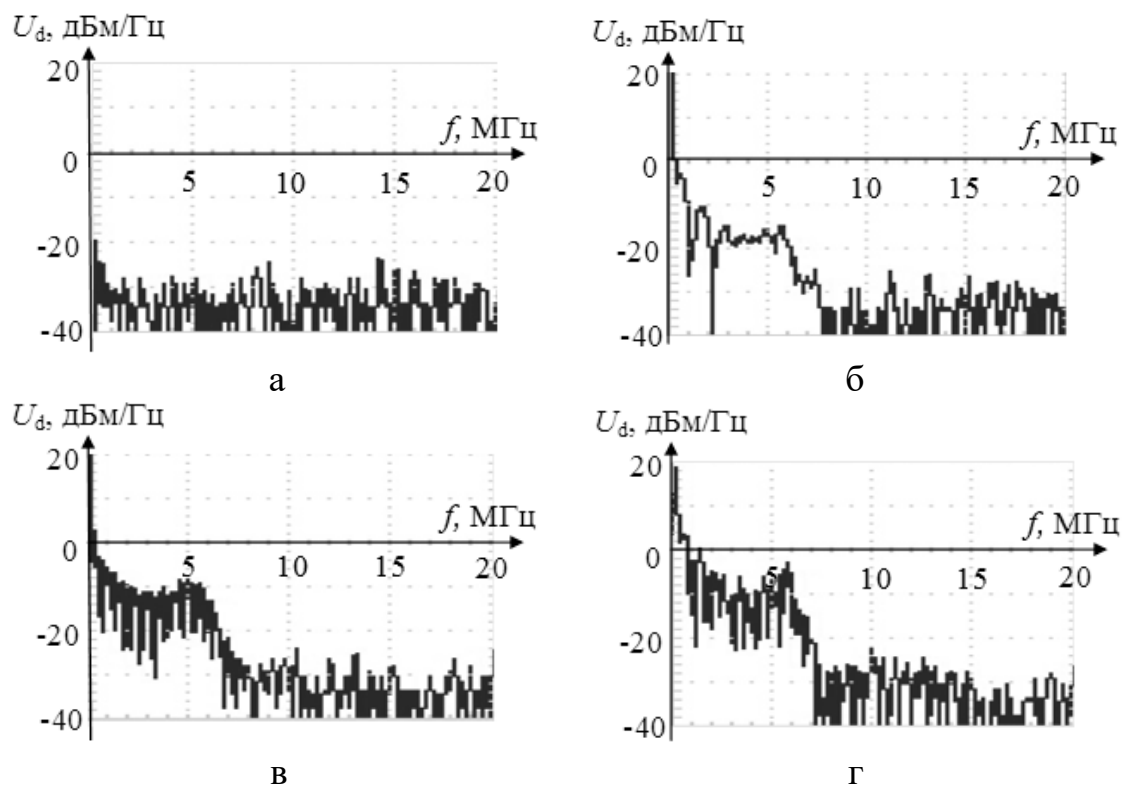


Рис. 8. Спектральная плотность кондуктивных помех (а – все источники выключены; б – включен тестовый импульсный источник электропитания; в – включен фоновый импульсный источник электропитания [15]; г – включены фоновый и тестовый источники)

Таким образом, данную методику и средства можно использовать для исследования возможных путей распространения и параметров кондуктивных помех от разных источников в области их эксплуатации, а также для относительной оценки эффективности принимаемых мер по снижению помех [17-21].

## Заключение

В работе предложена методика и средства для исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации. Необходимость данных инструментов обусловлено тем, что часто на практике нарушение электромагнитной совместимости технических систем, в составе которых есть преобразователи электроэнергии, выявляется уже после полного монтажа всех устройств или на этапе эксплуатации.

Для измерения кондуктивных помех в корпусе устройства или в проводящих элементах конструкции технических систем используется емкостной датчик. Приведены примеры исследования кондуктивных помех от импульсного источника электропитания во временной и частотной областях. Предложена схемотехническая модель и выполнен расчет напряжения кондуктивных помех, которое достигает 0,3 В. При этом существенная часть энергии помех находится в диапазоне до 10 МГц. Представлены зависимости снижения амплитуды напряжения кондуктивных помех от расстояния до источника. Видно, что данные помехи без существенного ослабления могут распространяться до нескольких метров по проводящим элементам конструкции.

Предложенные инструменты можно использовать для выявления источников и путей распространения кондуктивных помех и, при необходимости, последующей оценки эффективности принимаемых мер по их снижению.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-20092, <https://rscf.ru/project/22-29-20092/> и Кабинета Министров Республики Татарстан.

### Литература

1. Шустов М.А. *Преобразователи напряжения. Практическая схемотехника.* Москва, Додека XXI век. 2007. 192 с.
2. Мелешин В.И. *Управление транзисторными преобразователями энергии.* Москва, Техносфера. 2011. 576 с.
3. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. *Силовая электроника.* 2006. №4. С.58-64.
4. Загородских Е.В. Об источниках кондуктивной помехоэмиссии при проектировании мостового инвертора напряжения. *Технологии электромагнитной совместимости.* 2016. №1. С.41-48.

5. Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронных средств объектов электроэнергетики при внешних электромагнитных воздействиях по сети питания. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2007. №9-10. С.37-45.
6. Gizatullin R., Suetina T. Noise Immunity of Computer Equipment with Dynamic Changes in Power Supply Voltage. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*. Vladivostok. 2019. P.8934266. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934266>
7. Williams T., Armstrong K. *EMC for Product Designers*. Oxford, Newnes. 2016. 552 p.
8. Сафина Р.М., Шкиндеров М.С., Мубараков Р.Р. Помехоустойчивость систем контроля и управления доступом в здания при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.9>
9. Ляшева М.М., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Фильтрация изображений с использованием пороговой обработки весовых моделей. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. №10. С.18-21.
10. Ляшева М.М., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Первичная обработка изображения с использованием весовой модели. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. №6. С.33-36.
11. Гизатуллин Р.М., Дроздилов В.А., Константинов Э.С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линии электропередачи. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. Т.11. №4(44). С.13-21.
12. Загородских Е.В. Кондуктивная помехоэмиссия в двухтактных преобразователях с жестким и мягким переключением. *Силовая электроника*. 2019. №2. С.62-65.
13. Gizatullin Z., Nuriev M. Modeling the Electromagnetic Compatibility of Electronic Means under the Influence of Interference Through the Power Supply Network.

2022 *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022*. Sochi. 2022. P.321-326.  
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787186>

14. Жук Д.М., Маничев В.Б., Ильницкий А.О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области. *Информационные технологии*. 2010. №7. С.16-24.
15. Gizatullin Z., Mubarakov R. Technique for Research of Conducted Interference from Power Converters in Operating Conditions. *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2022. P.145-149.  
<https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896342>
16. Гизатуллин З.М., Мубараков Р.Р. Анализ излучаемых электромагнитных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т.14. №2(54). С.29-39.
17. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О. и др. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости. *Техника радиосвязи*. 2014. №2(22). С.11-22.
18. Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Торлупа А.А. Применение радиопоглощающих материалов для ослабления высокочастотных помех в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов. *Электричество*. 2022. №4. С.66-71.
19. Алхадж Х.А., Квасников А.А., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Верификация моделирования проводных антенн методом моментов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11.  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.1>
20. Gibadullin R.F., Nikonorov V.V. Development of the System for Automated Incident Management Based on Open-Source Software. *2021 International Russian*

Automation Conference (RusAutoCon). 2021. P.521-525.

<https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537385>

21. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. №2. С.162-179.

**Для цитирования:**

Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Мубараков Р.Р. Методика и средства для исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.8>