

На правах рукописи



**ПАВЛОВА ВИКТОРИЯ ИГОРЕВНА**

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

**автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Электротехники и авиационного электрооборудования».

**Научный руководитель:** Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электротехники и авиационного электрооборудования» ФГБОУ ВО МГТУ ГА  
**Халютин Сергей Петрович**

**Официальные оппоненты:** Доктор технических наук, профессор, заместитель по эксплуатации директора ОКБ – Главного конструктора АО «УАПО»  
**Мусин Сергей Миргасович**

Кандидат технических наук, доцент 91 кафедры Электрооборудования (и оптико-электронных систем) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
**Дмитриев Владимир Михайлович**

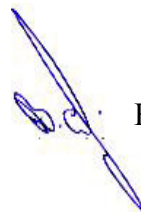
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский институт военно-воздушных сил» Министерства обороны Российской Федерации (ЦНИИ ВВС Минобороны РФ).

Защита состоится «15» ноября 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте [www.mstuca.ru](http://www.mstuca.ru).

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01  
доктор технических наук, профессор



В.М. Самойленко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие авиации характеризуется усложнением бортового авиационного оборудования, а также внедрением перспективных интеллектуальных систем электроснабжения (СЭС) в новых типах воздушных судов, в том числе в беспилотных летательных аппаратах. Кроме того, ведутся исследования, направленные на создание полностью электрических летательных аппаратов. Усложнение оборудования, увеличение мощности и разнообразия нагрузок на систему электроснабжения влечет за собой увеличение вероятности отказов в полете. Несмотря на указанные особенности необходимо обеспечивать высокий уровень безопасности полетов, регулярность перевозок и их экономичность. Настоящая работа направлена на создание научно-технического задела в целях обеспечения высокой эффективности и автономности диагностики и прогнозирования технического состояния бортового электрооборудования. Это позволит решить задачу перехода на стратегию эксплуатации по состоянию и обеспечить возможность отложенного обслуживания, особенно при создании самолетов с повышенной электрификацией оборудования.

Благодаря внедрению цифровых технологий функции контроля в системах распределения электроэнергии (ЭЭ) современных воздушных судов (ВС) могут быть расширены возможностью диагностирования и прогнозирования состояния источников и потребителей электроэнергии на борту ВС. Использование микропроцессорной техники при управлении распределением электроэнергии позволяет внедрить новые алгоритмы диагностирования за счет совершенствования программного обеспечения, не изменяя структуру аппаратной части СЭС. Использование новых возможностей диагностирования позволит в перспективе снизить затраты на эксплуатацию и модернизацию перспективных ВС, что в итоге повысит уровень безопасности полетов в рамках задач по поддержанию летной годности.

Формирование облика системы контроля авиационного оборудования определяется несколькими факторами. Во-первых, в своем составе она должна иметь встроенные средства самодиагностики. Во-вторых, необходимо определить возможность реализации дополнительных алгоритмов проверки авиационного оборудования до включения его в работу со стороны системы распределения электроэнергии. Из этого следует, что обеспечение авиационного оборудования дополнительными средствами встроенного и расширенного контроля должно осуществляться изготовителем на этапе проектирования данного оборудования с учетом включения новых функций в аппаратно-программный комплекс. Кроме реализации системы встроенного контроля конкретного оборудования средствами цифровой системы распределения можно организовать и распределенную систему контроля всех приемников и источников электроэнергии на борту воздушного судна. При этом локальные центры управления нагрузками (ЛЦУН) и распределительные центры (РЦ) будут являться узловыми центрами диагностирования для самолета.

Анализ принципов построения систем электроснабжения показывает необходимость разработки новых типов силовой коммутационной аппаратуры, обеспечивающей возможности управления электроэнергетическим комплексом в рамках концепции интегральной модульной авионики (ИМА), которая в том числе должна выполнять функции контроля.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследования влияния электроэнергетических параметров на отказы в системах электроснабжения на воздушных судах выполнялись в МГТУ ГА, ФГУП ГосНИИ ГА, ЛИИ им. М. М. Громова, ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, НИИ эксплуатации и ремонта авиационной техники (г. Люберцы), а также в НПО НаукаСофт. Вопросам поддержания летной годности, совершенствования процессов технической эксплуатации ВС посвящены работы Воробьева В. Г., Кузнецова С. В., Чинючина Ю. М., Машошина О. Ф., Халютин С. П., Жмурова Б. В., Давидова А. О., Смирнова Н. Н. и других ученых.

В области обеспечения безопасной эксплуатации на воздушном транспорте известны работы Машошина О. Ф., Бачкало Б. И., Воробьева В. В., Саидумарова И. М., Логвина А. И., Гончарова А. В.

Известны работы Савелова А. А., Халютина С. П. и Дмитриева В. М. в области импедансного анализа входных цепей потребителей электроэнергии с целью выявления отказов бортового электрооборудования ВС, а также работы Мусина С. М., посвященные влиянию отказов приемников на качество электроэнергии в бортовых системах электропитания. В работах Старостина И. Е. рассматриваются вопросы создания математических моделей авиационного электрооборудования с целью разработки алгоритмов диагностирования и прогнозирования их состояния.

В научных трудах Майской Е. Р., Гончарова А. В. Логвина А. И. рассматриваются вопросы поддержания заданного уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования. Авторами проведено исследование в части влияния условий и методов технической эксплуатации ВС на техническое состояние комплектующих изделий. Основной упор в работах, представленных авторами, был сделан на обоснование необходимости создания централизованной системы сбора и обработки данных.

Зарубежные компании, такие как Honeywell, Rockwell Collins в настоящее время занимаются разработкой встроенных в оборудование диагностических средств, которые взаимодействуют с цифровыми системами и выдают результат контроля на бортовой компьютер в режиме реального времени. В результате того, что состав авионики на зарубежных типах ВС, таких как Airbus и Boeing более-менее уже определен, в отличие от отечественных самолетов, на которых на данном этапе только проходит модернизация в части замены электромеханических приборов на электронную индикацию и т.д., разработчики импортного оборудования исследуют процесс диагностики двумерно. Это значит, что неполадки в цифровых системах рассматриваются как с точки зрения выявления проблем, связанных с программными сбоями, так и с точки зрения выявления аппаратных проблем с шинами данных, соединениями с высоким сопротивлением, неправильной изоляцией т.д., Кроме того, зарубежные разработчики авиационного оборудования в настоящее время предлагают различные системы дистанционной диагностики конкретной самолетной системы.

Американская компания Rockwell Collins разработала компьютер для диагностики технического обслуживания (MDC). Этот компьютер будет являться центральным компонентом системы диагностики и технического обслуживания самолета. Целью MDC является помощь пользователям воздушных судов и обслуживающему персоналу в обнаружении и устранении неисправностей компонентов авионики и/или отказов проводки. MDC регистрирует (или сохраняет) информацию об отказах и делает ее доступной для просмотра на многофункциональном дисплее или делает ее доступной для загрузки (на дискету или ПК), где ее затем можно просмотреть или распечатать.

Возрастающая сложность электроэнергетического комплекса, в частности увеличение количества потребителей электроэнергии, увеличение суммарной мощности потребления электроэнергии явились причиной того, что FAA и EASA теперь рассматривают бортовую кабельную сеть самолетов как отдельную самостоятельную систему. Основные промышленные игроки авиации во Франции работали над совместным исследовательским проектом под названием «Harness VITE» под руководством Airbus, основной целью которого является разработка системы мониторинга в реальном времени электропроводки распределения питания самолета с целью обнаружения и локализации дефектов проводов. Методы диагностики и обслуживания бортовой кабельной сети в реальных условиях полета в РФ не известны. В рамках импортозамещения авиационного оборудования остро встает вопрос о разработке систем диагностирования отечественного производства.

В публикациях Ергалиева Д. С. указывается на то, что необходимо рассматривать объекты контроля и диагностики как элементы сложной системы, с учетом их физических свойств, назначения и происходящих в них переходных процессов, а также с учетом их конструктивных или функциональных особенностей.

Однако вопросы диагностирования состояния потребителей электрической энергии средствами перспективных цифровых интеллектуальных систем электропитания ВС с

целью обеспечения надежной эксплуатации ВС и поддержания летной годности исследованы недостаточно.

Системная проблема эксплуатации современных ВС состоит в недостаточном внимании к диагностике и определению предотказного состояния в системах распределения и, как следствие, в снижении эксплуатационной надежности общесамолётного оборудования и ряда других систем.

Проблемы надежности систем электроснабжения приводят к необходимости авиакомпаниям избегать длительного нахождения и ночных стоянок в аэропортах базирования, что влияет на процессе сохранения летной годности ВС.

Решение указанных проблем приводит к необходимости проведения научных, методических, технологических, аппаратных, экспериментальных и системных исследований и разработки методики и практических решений для диагностирования потребителей электроэнергии в современных системах электроснабжения.

**Объектом исследования** являются приемники электрической энергии, подключенные к цифровым интеллектуальным системам распределения электроэнергии.

**Предметом исследования** является методика диагностирования критических параметров электрических цепей входных каскадов приемников электрической энергии на основе измеряемой в реальном масштабе времени информации о потребляемой электрической энергии (токе и напряжении питания) постоянного тока.

**Цель работы** заключается в повышении полноты технического диагностирования приемников электроэнергии за счет внедрения диагностических функций в цифровые интеллектуальные системы распределения электроэнергии ВС, что напрямую оказывает влияние на обеспечение летной годности ВС.

*Практическое* противоречие между стремлением повысить эффективность диагностирования потребителей электроэнергии и отсутствием такой возможности средствами встроенного контроля, а также противоречие *в теории* между новыми возможностями цифровых интеллектуальных систем распределения (ЦИСР) электроэнергии и отсутствием методов использования этих возможностей для совершенствования системы диагностирования, приводит к необходимости решения **научной задачи** разработки метода диагностирования потребителей электроэнергии на основе имеющейся в ЦИСР ЭЭ информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения питания.

**Научная задача разбита на ряд частных задач:**

- исследование влияния отклонения параметров реактивных элементов цепей питания приемников электроэнергии на их работоспособность и определение критических значений отклонений этих параметров, характеризующих переход приемников электрической энергии в неработоспособное состояние;
- разработка методики определения параметров реактивных элементов входных цепей приемников электрической энергии на основе измерения мгновенных значений входного тока и напряжения;
- исследование возможности синтеза эквивалентных электрических схем замещения входных цепей приемников электроэнергии по критерию минимума отклонения их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) входного импеданса от АЧХ исходного объекта;
- определение зависимости чувствительности определения контролируемых параметров электрических схем замещения к погрешностям измерения при получении АЧХ;
- экспериментальные исследования разработанной методики диагностирования.

**Личный вклад автора.** Основные исследования, представленные в диссертации, а именно теоретические и экспериментальные исследования по определению параметров эквивалентных схем замещения, разработке методики диагностирования входных цепей потребителей ЭЭ, а также экспериментальные исследования разработанной методики диагностирования, проведены автором лично.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

- получены результаты исследования влияния отклонения параметров реактивных элементов ВИП на работоспособность приемников электроэнергии и определены пути оценки

критических значениях отклонений этих параметров, характеризующих переход приемников электрической энергии в неработоспособное состояние;

- определена возможность синтеза эквивалентных электрических схем замещения цепей питания приемников электроэнергии по критерию минимума квадратичной ошибки отклонения их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) входного импеданса от АЧХ исходного объекта для использования при диагностике их состояния, что предоставляет новые возможности создания универсальных моделей входных цепей ПЭЭ в условиях отсутствия их принципиальных электрических схем;
- исследована чувствительность контролируемых параметров электрических схем замещения к погрешностям измерения параметров АЧХ, что позволяет оценивать общие погрешности определения диагностируемых параметров исследуемого объекта;
- обоснованы рекомендации по новому использованию универсального алгоритма метода предельных состояний для получения частотных функций и дифференциальных уравнений переходных процессов в электрических цепях с реактивными элементами, который лег в основу расчета реактивных параметров;
- разработан новый метод диагностирования потребителей электроэнергии, основанный на информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии.

**Практическая значимость результатов работы** определяется возможностью практического внедрения разработанной методики при проектировании локальных центров управления нагрузками перспективных интеллектуальных системы распределения электроэнергии, что позволит перевести системы электроснабжения ВС на эксплуатацию по состоянию. Внедрение полученных результатов позволит провести глобальную модернизацию перспективных отечественных ВС, что в итоге повысит их текущий уровень эксплуатационной надежности и обеспечит поддержание заданного уровня безопасности полетов. Полученные результаты предназначены для использования в деятельности авиастроительных предприятий, а также на предприятиях, осуществляющих разработку устройств систем электроснабжения ВС.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния отклонения параметров реактивных элементов вторичных источников питания на функционирование приемников электроэнергии.
2. Методика использования эквивалентных электрических схем замещения для получения цифровых двойников входных цепей приемников электроэнергии по критерию минимума отклонения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) их входного импеданса от АЧХ исходного приемника электроэнергии.
3. Результаты применения единого алгоритма метода предельных состояний для расчета реактивных параметров по полученным частотным функциям и дифференциальным уравнениям переходных процессов в электрических цепях с реактивными элементами.
4. Метод диагностирования потребителей электроэнергии на основе информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии.
5. Результаты экспериментальных исследований разработанной методики.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.**

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов эксперимента с расчетными данными, а также применением 13 известных апробированных методов и законов электротехники и технической диагностики.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 научно-технических и научно-практических конференциях в период с 2019- 2022 гг., а именно на 2 всероссийских и 5 международных конференциях. Также результаты обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Электротехники и авиационного электрооборудования» МГТУ ГА в 2019-2023 гг.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 печатных работах (62 страницы), в том числе: в 2-х научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (по транспорту) (26 страниц); 6

научных статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (36 страниц); 1 отчёте о НИР (120 страниц).

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, с выводами по каждой из них, общих выводов по диссертационной работе, списка литературы и приложений. Основная часть работы содержит 143 страницы, 81 рисунок и 8 таблиц. Общий объем работы с приложением составляет 151 страницу. Библиографический список литературы включает в себя 136 научных работ отечественных и зарубежных авторов. Общий объем приложений составляет 8 страниц, содержит 2 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области диагностирования потребителей электроэнергии, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ исследований в области технической диагностики авиационного оборудования, а также анализ методов и средств технической диагностики. Проведен обзор схемотехнических решений цепей питания авиационного оборудования и обзор свойств и причин деградации свойств реактивных элементов. Проведен анализ возможностей диагностирования и прогнозирования состояния потребителей электроэнергии в процессе эксплуатации ВС.

Рассмотрена возможность использования цифровых двойников на этапах жизненного цикла бортового оборудования, а также возможность их применения с учетом реализации дополнительных алгоритмов обработки измеряемых мгновенных значений токов и напряжений питания в процессе функционирования систем.

Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) современных и перспективных ВС, таких как Ил-114-300, МС-21-310, RRJ-NEW и т.д. имеет в своем составе встроенные источники вторичного электропитания (ВИП), которые и связаны с системой распределения электроэнергии через цепи электропитания.

ВИП принято разделять на линейный и импульсные (рис.1).

Все типы ВИП оснащены стабилизаторами входного напряжения, а также входными фильтрами, в состав которых обязательно входят реактивные элементы. Конденсаторы и дроссели в процессе эксплуатации имеют свойство изменять свои параметры ввиду старения и по причине воздействия внешних воздействий (температуры, влажности, вибрации и т.п.).

Проведенный анализ показал, что входные цепи приёмников электроэнергии могут быть диагностированы двумя способами:

а. частотным методом, путем снятия амплитудно-частотных характеристик входного импеданса, который предполагает наличие дополнительной аппаратной оснастки (генератора синусоидальных сигналов, точных цифровых измерителей токов и напряжений, достаточно мощные вычислительные ресурсы для обработки измерений);

б. методом, основанным на анализе переходных функций по току и напряжению, который позволяет использовать естественное воздействие на объект контроля (подключение к бортовой сети), но требует решения задачи определения параметров (в первую очередь реактивных элементов) объекта исследования на основе исследования полученного цифровыми измерениями переходного процесса по току и напряжению питания, а также реализации алгоритма контроля в микроконтроллерах локальных центров управления нагрузками. Теоретическая возможность реализации такой методики обусловлена изоморфизмом свойств объекта в частотной и временной областях. То есть изменения АЧХ эквивалентно изменению параметров переходных процессов при ступенчатом воздействии (рис. 2 и 3).

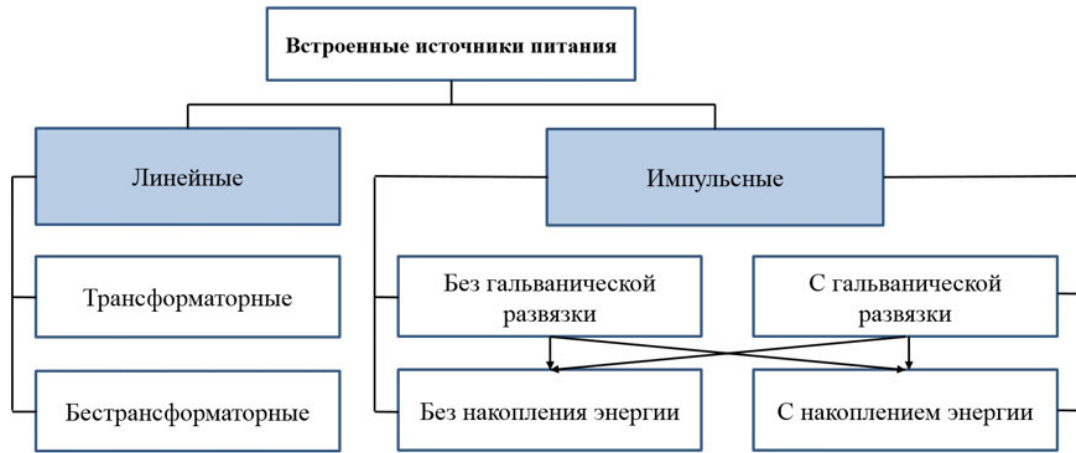


Рис. 1 – Виды встроенных вторичных источников питания

Так как электрические схемы входных каскадов конкретного оборудования как правило неизвестны, поэтому математическую модель каждого приемника электрической энергии для создания цифрового двойника получить не представляется возможным. В работе предложено использовать эквивалентные электрические схемы замещения, эквивалентность которых определяется эквивалентностью соответствующих АЧХ объекта и АЧХ схемы замещения. При этом АЧХ объекта можно получить экспериментальным путем, а АЧХ типовых электрических схем замещения известны заранее.

Использование параметров электрической схемы замещения позволяет однозначно определить параметры дифференциального управления, описывающего переходный процесс при включении потребителя. Решая обратную задачу, то есть определяя в процессе

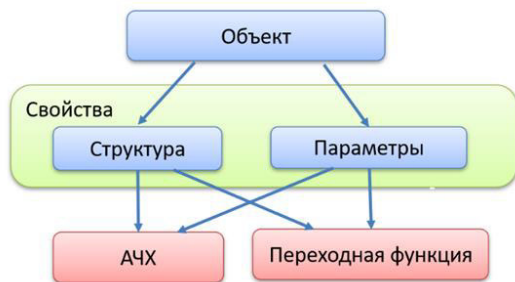


Рис. 2 - Определение динамических свойств объекта исследования

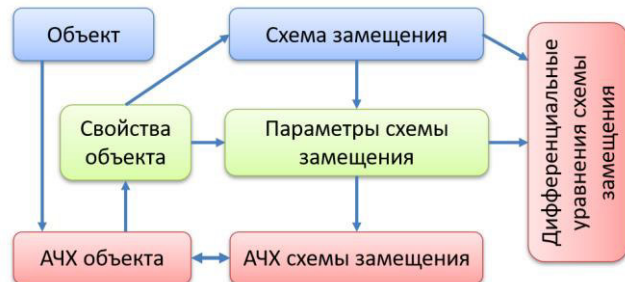


Рис. 3 – Определение параметров дифференциальных уравнений по АЧХ

функционирования параметры реактивных элементов схемы замещения по рассчитанным токам и их производным, появляется возможность прогнозирования технического состояния потребителей электроэнергии. Это позволит обеспечить возможность использовать отложенное обслуживание.

**Во второй главе** проведены исследования, направленные на обоснование возможности диагностирования входных цепей приемников электроэнергии средствами цифровых систем распределения электроэнергии на основе определения параметров реактивных элементов схем замещения.

Перспективные цифровые интеллектуальные системы электроснабжения предусматривают:

- цифровое измерение параметров (токов и напряжений) всех потоков электроэнергии между источниками и потребителями;
- управление этими потоками во всех режимах работы СЭС на основе цифровых алгоритмов обработки данных;
- получение управляющих команд от систем управления верхнего уровня (общесамолетным/общеввертолетным оборудованием) и передачу информации о состоянии СЭС;



- реализацию в цифровых микроконтроллерах функций диагностирования и прогнозирования состояния СЭС с целью недопущения возникновения аварийных режимов.

Ядром таких систем электроснабжения являются цифровые системы распределения энергии, к которым подключены все источники и потребители электроэнергии, поэтому имеется теоретическая возможность реализовать функцию диагностирования состояния источников и потребителей электроэнергии, используя цифровое измерение мгновенных значений токов и напряжений потоков энергий, проходящих через систему распределения (рис. 4).

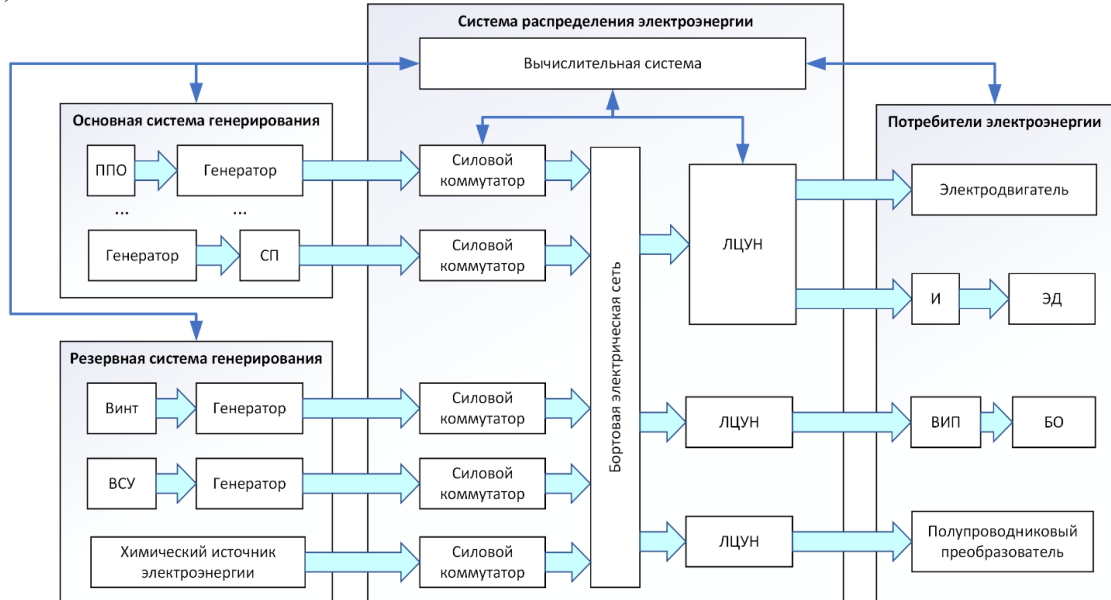


Рис. 4 – Цифровая система распределения электроэнергии на ВС

Использование микроконтроллеров в коммутационной аппаратуре современных самолетов приводит к возможности создания интегрированной системы управления электрической нагрузкой ВС.

Проведены исследования влияния отклонения параметров реактивных элементов входных каскадов вторичных источников питания на АЧХ их входных импедансов.

В качестве примера рассмотрена схема импульсного источника тока (рис.5), которая в настоящее время используется в качестве ВИП в бортовом электрооборудовании.

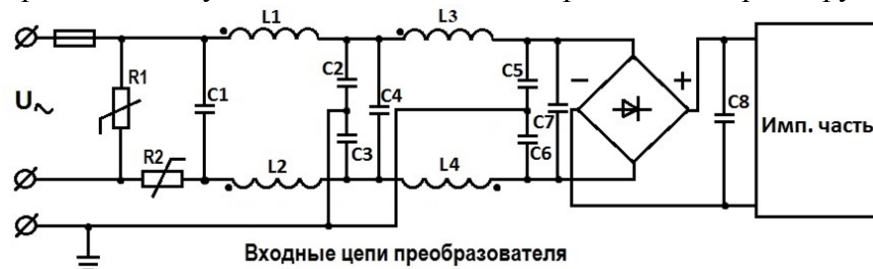


Рис. 5 - Входная цепь импульсного преобразователя напряжения

АЧХ модуля входного импеданса (рис. 6) соответствует характеристическая строка, на которой последовательность расположения нулей и полюсов характеризует исправное состояние устройства (рис. 7).

Расположение нулей и полюсов характеристической строки может служить диагностическим признаком состояния изделия.

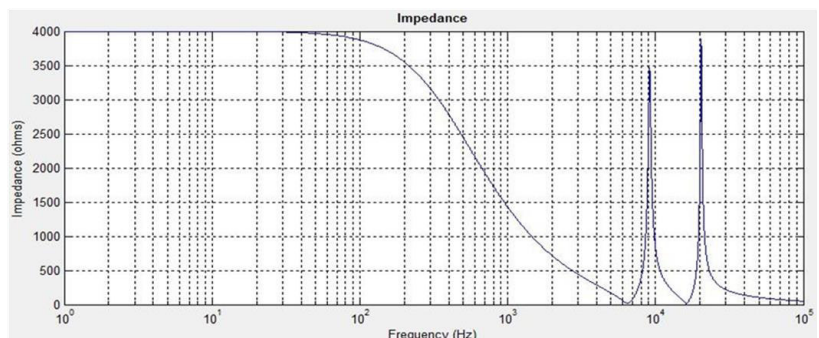


Рис. 6 - Зависимость модуля входного импеданса от частоты для схемы при номинальных значениях параметров



На земле снимается АЧХ нового (исправного объекта) и выбирается структура электрической схемы замещения по типу АЧХ исправного объекта. Тип АЧХ определяется количеством максимумов и минимумов (полюсов и нулей характеристической строки), что соответствует количеству реактивных элементов в схеме замещения. Множество типовых электрических схем замещения с разным количеством каскадов с реактивными элементами (цепные схемы) выбирается заранее. Экспериментальные исследования АЧХ входных каскадов ВИП показали, что в максимальном случае достаточно двух каскадов с четырьмя реактивными элементами для получения необходимой структуры. Далее проводится идентификация параметров электрической схемы методом наименьших квадратов (критерием в задаче идентификации является близость АЧХ объекта и АЧХ электрической схемы замещения) и составление системы дифференциальных уравнений (математической модели) схемы замещения. Полученная математическая модель и является основой (ядром) для создания цифрового двойника (ЦД), который используется в задаче диагностирования, а идентификация параметров электрической схемы замещения – это первый шаг верификации математической модели объекта.

В полёте (после каждого включения приемника электроэнергии) на основе цифровых измерений потребляемого тока получается переходная функция, по которой идентифицируются параметры дифференциальных уравнений (верификация математической модели) и рассчитываются текущие параметры электрической схемы замещения.

Для того, чтобы получить аналитические зависимости, используемые для поиска контролируемых параметров следует подобрать вариант схемы замещения по полученной АЧХ вторичного источника электропитания.

В качестве примера рассмотрим АЧХ исправного исходного объекта, снятую экспериментальным путем.

На АЧХ (рис. 10), можно выделить 3 экстремума – два максимума и один минимум. Это свидетельствует о необходимости выбора двухкаскадной эквивалентной схемы замещения (рис. 11).

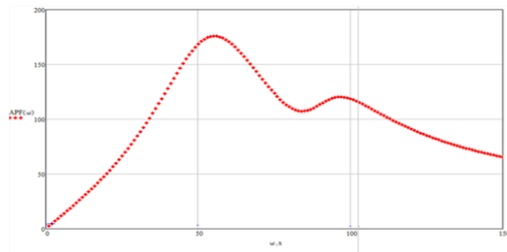


Рис. 10 – АЧХ исправного объекта

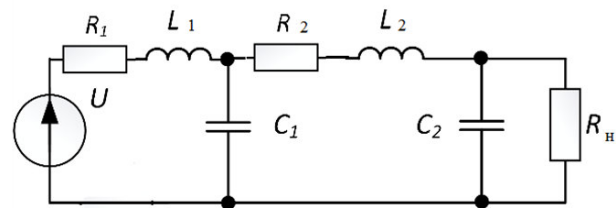


Рис. 11 – Электрическая схема замещения

Типовые схемы замещения с заданной топологией (рис.11) можно масштабировать добавлением справа RLC каскадов. Увеличение количества каскадов в схеме замещения соответствует увеличению количества экстремумов в АЧХ входного импеданса схемы.

Значения параметров элементов неизбежно отличаются от расчетных значений, которые заданы в технических условиях, что приводит к отличию теоретической АЧХ от полученной экспериментально. Некоторые параметры элементов схемы определяются с достаточно большой погрешностью, это может повлиять на отклонение полученной АЧХ от реальной.

Экспериментальные исследования показали, что полученные параметры элементов схемы замещения (рис. 11) путем аппроксимации (методом наименьших квадратов) АЧХ, могут существенно отличаться от номинальных значений (рис. 12), что необходимо учитывать при диагностировании.

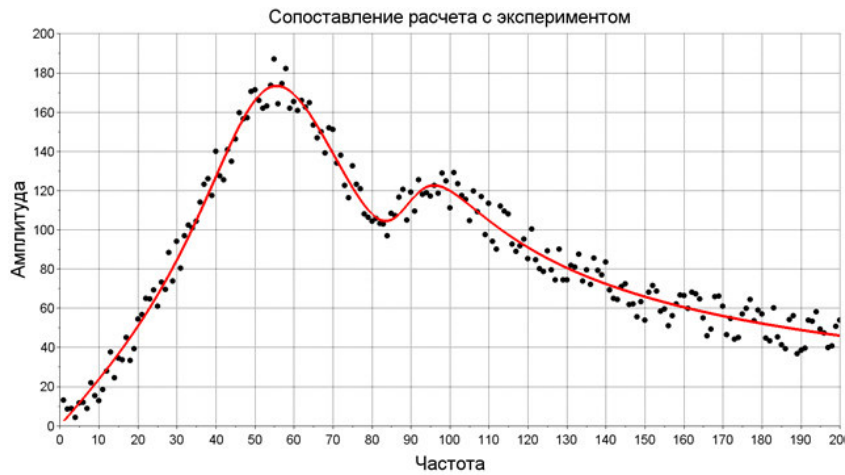


Рис. 12 – Аппроксимация АЧХ при измерениях с погрешностью 7.5%

Варьируя погрешности определения АЧХ (добавляя случайную составляющую, пропорциональную величине заданной погрешности), получаем погрешности определения параметров схемы замещения (рис. 13). Наиболее чувствительными оказались погрешности определения параметров реактивных элементов схем.

Диагностирование состояния потребителей электроэнергии состоит в последовательности выполнения ряда задач (рис. 14), часть из которых является подготовительными (снятие АЧХ диагностируемого устройства, синтез и определение параметров схемы замещения, загрузка этих параметров в бортовой микропроцессор цифрового коммутационного устройства системы распределения - в цифровой двойник), а остальные задачи выполняются во время полета каждый раз при включении диагностируемого устройства (расчет параметров эквивалентной схемы замещения, сравнение с эталонными значениями, расчет относительной величины отклонения от исходных значений и определение факта превышения/не превышения предельного состояния, принятие управленческого решения).

Рассмотрим процедуру получения расчетных уравнений для параметров схемы замещения на основе дифференциальных уравнений, записанных на основе метода предельных состояний, с учетом того, что в диссертационном исследовании рассматривался вариант, при котором входным напряжением является постоянное напряжение бортовой сети.



Рис. 13 – Относительная погрешность определения параметров R, L, C

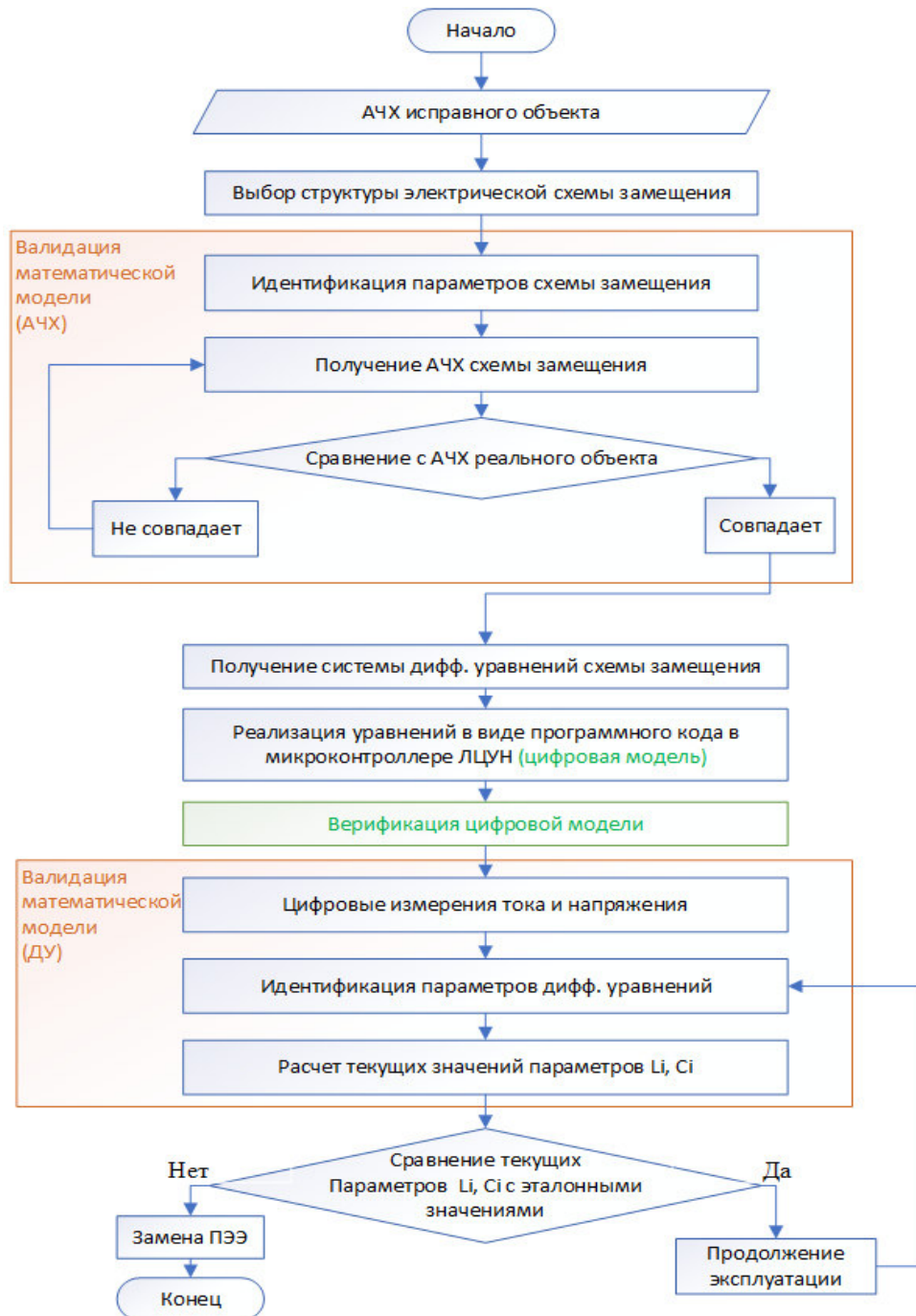


Рис. 14 – Алгоритм метода диагностирования состояния входных каскадов потребителей электроэнергии

Переходный процесс для входного тока математически описывается дифференциальным уравнением, порядок которого определяется количеством реактивных элементов в цепи замещения. Запишем универсальное выражение для частотной и временной области, используя метод предельных состояний

$$(A_0 + pA_1 + p^2 + \dots + p^m A_m)X = B_0 + pB_1 + p^2 B_2 + \dots + p^m B_m \quad (1)$$

где:

$p$  - параметр, который представляется как оператор дифференцирования  $p = d/dt$ ;

$X$  – искомый ток;

коэффициенты  $A_i$  – частные контурные определители при разомкнутых (замкнутых) реактивных элементах;

$B_i$  - выражения, в которых учитываются искомые значения тока при размыкании (замыкании) реактивных элементов.

Применяя последовательно алгоритм метода предельных состояний для цепей с реактивными элементами, получаем выражение для записи дифференциального уравнения относительно входного тока  $I_{in}$  и уравнения АЧХ.

$$p^3 I_{in} C_1 C_2 L R_1 R_2 R_{int} + p^2 I_{in} L (C_1 + C_2) (R_1 R_2 + R_1 R_{int} + R_2 R_{int}) + p I_{in} L (R_1 + R_2 + R_{int}) + I_{in} (R_1 R_2 + R_1 R_{int}) = U [p^3 C_1 C_2 L R_1 R_2 + p^2 L (C_1 R_2 + C_1 R_2 + C_2 R_2) + p (L + C_1 R_1 R_2 + C_2 R_1 R_2)] R_1 \quad (2)$$

Правая часть дифференциального уравнения является ввиду допущения о постоянстве напряжения питания является константой.

Заменяя параметр  $p$  на  $d/dt$  получено дифференциальное уравнение третьего порядка.

$$a \frac{d^3 I_{in}(t)}{dt^3} + b \frac{d^2 I_{in}(t)}{dt^2} + c \frac{d I_{in}(t)}{dt} + d I_{in}(t) = k \quad (3)$$

где:

$$a = C_1 C_2 L R_1 R_2 R_{int}, \quad b = L (C_1 + C_2) (R_1 R_2 + R_1 R_{int} + R_2 R_{int}), \\ c = L (R_1 + R_2 + R_{int}), \quad d = R_1 R_2 + R_1 R_{int}, \quad k = U R_1. \quad (4)$$

Для проверки возможности определения параметров использовался переходный процесс изменения входного тока, полученный путем моделирования. Графики переходного процесса по току и его производных представлены на рисунках 15-18.

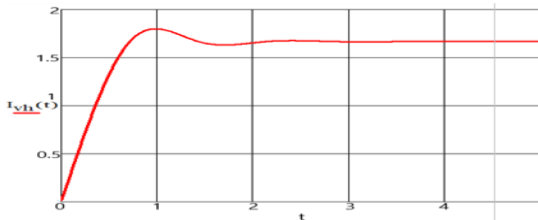


Рис. 15 – Переходный процесс для входного тока

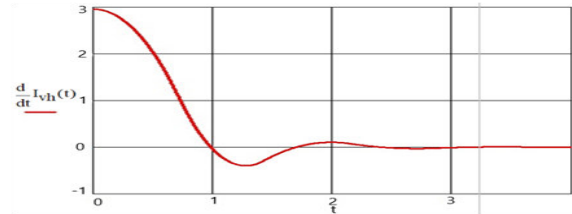


Рис. 16 – Переходный процесс для первой производной тока

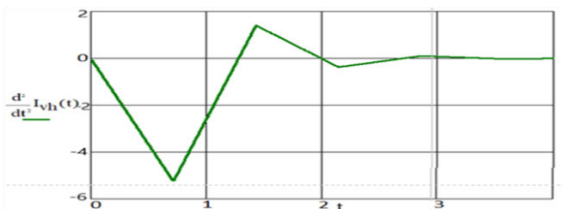


Рис. 17 - Переходный процесс для второй производной тока

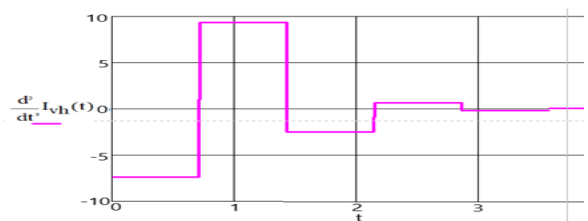


Рис. 18 - Переходный процесс

Получив значения функции и вычислив ее производные как минимум для 3-х моментов времени, можно определить значения искомых реактивных параметров схемы замещения путем решения системы алгебраических уравнений, составленных из (3) с учетом (4).

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность предложенного в диссертации метода диагностирования. Экспериментально проведены цифровые измерения мгновенных значений потребляемого тока при коммутациях в схемах и проверка методики определения параметров реактивных элементов для двух вариантов электрических схем замещения входных цепей

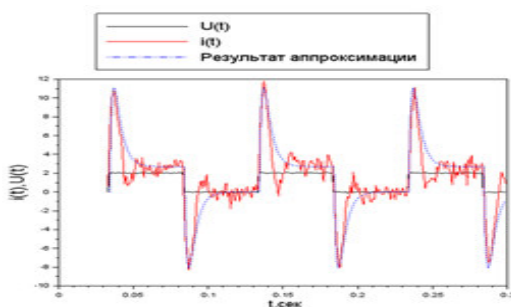


Рис. 19 – Переходные процессы для однокаскадной схемы замещения

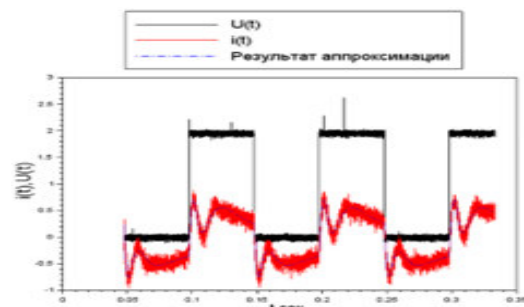


Рис. 20 – Переходные процессы для двухкаскадной схемы замещения

вторичного источника питания – однокаскадной и двухкаскадной (рис. 19-20).

По переходному процессу тока нагрузки аппроксимировалась аналитическая функция, которая дифференцировалась необходимое количество раз для получения численных значений высших производных. Эта процедура позволила избежать проблем, связанных с численным определением производных.

Экспериментальные исследования подтвердили принципиальную возможность применения предложенного пассивного метода для диагностирования потребителей электроэнергии средствами цифровых интеллектуальных систем распределения электроэнергии. Погрешность расчетов по сравнению с опытными данными не превысила 10%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы**:

1. Результаты исследования влияния отклонения параметров реактивных элементов вторичных источников питания на функционирование приемников электроэнергии позволили определить критические с точки зрения работоспособности параметры диагностируемых объектов (цепей питания приемников электроэнергии), в том числе:

- исследование влияния отклонения параметров реактивных элементов цепей питания ВИП на работоспособность приемников электроэнергии позволили определить значения критических отклонений этих параметров, характеризующих переход приемников электрической энергии в неработоспособное состояние;

- показано, что погрешность определения контролируемых параметров электрических схем замещения в зависимости от погрешности измерения параметров АЧХ не превышает 10%.

2. Методика использования эквивалентных электрических схем замещения для получения цифровых двойников входных цепей приемников электроэнергии по критерию минимума отклонения амплитудно-частотных характеристик их входного импеданса от АЧХ исходного приемника электроэнергии позволила получить универсальную модель цифрового двойника для цепей питания приёмников электроэнергии в условиях отсутствия информации об их принципиальных электрических схемах.

3. Применение единого алгоритма метода предельных состояний для расчета реактивных параметров по полученным частотным функциям и дифференциальным уравнениям переходных процессов в электрических цепях с реактивными элементами подтверждает возможность использования универсального метода исследования объектов диагностирования как в частотной, и так и во временной областях.

4. Метод диагностирования потребителей электроэнергии на основе информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии, основанный на применении эквивалентных электрических схем замещения (в смысле эквивалентности АЧХ) позволяет расширить возможности диагностирования приемников электроэнергии средствами бортовых цифровых интеллектуальных систем распределения без изменения их аппаратной архитектуры путем доработки программного обеспечения. Применение предложенного метода позволяет дополнить возможности систем встроенного контроля приемников ЭЭ и, тем самым увеличить полноту их диагностирования.

5. Результаты экспериментальных исследований подтвердили принципиальную возможность реализации разработанного метода диагностирования входных цепей приемников электроэнергии в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии.

6. Использование разработанного метода при разработке новых и модернизации существующих цифровых интеллектуальных систем распределения электроэнергии для повышения полноты диагностирования приемников электроэнергии в режиме реального времени позволит существенно повысить безопасность полётов и существенно снизить эксплуатационные расходы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ  
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. **Павлова В.И.**, Старостин И.Е. Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 78–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93.

2. **Павлова В.И.**, Ищенко Л.В. Синтез эквивалентных электрических схем замещения цепей питания приемников электроэнергии по критерию близости амплитудно-частотных характеристик // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 48-57.

Публикации в других изданиях, рекомендованных ВАК РФ

3. **Pavlova, V.I.**, Khalyutin, S.P., Savelov, A.A., Davidov, A.O. “Monitoring and Diagnostics of the Technical Condition of Built-in Power Sources of Aviation Equipment”. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2019-June, pp. 464–468.

4. **Pavlova, V.I.**, Khalyutin, S.P., “Diagnostics of the State of Secondary Power Supplies Input Circuits Parameters Based on Analytical Expressions”. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2021-June, pp. 305–309.

5. Aleksandr A. Savelov, Nikolay A. Simankov, **Viktoriya I. Pavlova**, “A Frequency Response Technique for Preflight Inspection of Aircraft Equipment”. 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), pp.104-109.

6. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Davidov A.O., Punt E.A., **Pavlova V.I.** “Obtaining a model for the voltage and temperature of the us18650vtc6 series lithium-ion battery in constant current discharge mode from the analysis of physical and chemical processes in the accumulator”. 2021 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021. 18. 2021. С. 109-117.

7. **Viktoriya I. Pavlova**, “Method for Diagnosing the state of input cascades of electric power Consumers in intelligent power supply systems”. 2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh). С. 61-66.

8. **Pavlova, V.I.**, Khalyutin, S.P., Khalyutina O.S., Starostin I.E., “Investigation of errors in the representation of electrical equivalent circuits of aviation equipment, built on the basis of amplitude-frequency characteristics”. 2022 IEEE 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG PROFESSIONALS IN ELECTRON DEVICES AND MATERIALS (EDM). С. 416-420.

Соискатель



Павлова В. И.