

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет
гражданской авиации» (МГТУ ГА)

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Халютин Сергей Петрович

Москва 2023

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Анализ систем контроля общесамолетного оборудования.....	14
1.1 Анализ исследований в области технической диагностики авиационного оборудования	14
1.2 Анализ построения питающих цепей авиационного оборудования.....	18
1.3 Анализ существующих методов и средств для диагностирования авиационного электрооборудования	27
1.4 Возможности диагностирования и прогнозирования состояния потребителей электроэнергии в процессе эксплуатации воздушных судов...	30
1.5 Анализ свойств и причин выхода из строя реактивных элементов	38
1.6 Выбор объекта, предмета и определение задач исследования.....	42
Выводы по 1 главе:.....	46
Глава 2. Исследование возможности диагностирования приемников электроэнергии на основе частотных свойств импедансов цепей питания.....	48
2.1 Анализ возможности диагностирования входных цепей приемников электроэнергии средствами цифровых систем распределения электроэнергии на основе определения параметров реактивных элементов схем замещения	48
2.2 Методика анализа амплитудно-частотных характеристик входных импедансов приемников электроэнергии для определения возможности синтеза электрических схем замещения	58
2.3 Исследование возможности контроля состояния оборудования по цепям питания в обесточенном состоянии	62
2.4 Экспериментальные исследования возможности контроля приемников электроэнергии по амплитудно-частотным характеристикам на примере преобразователей АС-DC, DC-DC	69
Выводы по 2 главе:.....	86

Глава 3. Метод диагностирования технического состояния параметров цепей питания вторичных источников питания в интеллектуальных системах распределения электроэнергии	87
3.1 Синтез электрических схем замещения авиационного оборудования, построенных на основе амплитудно-частотных характеристик	87
3.2 Определение чувствительности изменения контролируемых параметров от измеренных.....	92
3.3 Формирование аналитических зависимостей потребляемых токов и напряжений от параметров объекта исследований на основе метода предельных состояний	95
3.4 Применение цифровых портретов для диагностирования авиационного электрооборудования	102
3.5 Разработка метода диагностирования состояния потребителей электроэнергии в системах распределения ВС	106
Выводы по 3 главе:.....	109
Глава 4. Экспериментальные исследования методики диагностирования технического состояния параметров цепей питания вторичных источников питания по цифровым измерениям переходной функции	111
4.1 Исходные данные и постановка задачи проведения экспериментального исследования	111
4.2 Методика проведения экспериментальных исследований и обработки результатов.....	112
4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований	119
Выводы по 4 главе:.....	124
Выводы по работе.....	126
Список использованной литературы	128
Приложения.....	144

Приложение А. Листинг программного приложения Scilab 6.1.1 «Определение чувствительности изменения контролируемых параметров R, L, C от измеренных».....	145
Приложение Б. Листинг программного приложения Scilab 6.1.1 «Экспериментальные исследования переходных процессов схемы замещения входных цепей вторичного источника питания»	148

Введение

Актуальность темы диссертационного исследования. Развитие авиации характеризуется усложнением бортового авиационного оборудования, в том числе и эксплуатации, а также внедрением перспективных интеллектуальных систем электроснабжения в новых типах воздушных судов, в том числе в беспилотных летательных аппаратах. Кроме того, ведутся исследования [101, 102], направленные на создание полностью электрических летательных аппаратов. Это влечет за собой увеличение вероятности отказов в полете, в том числе и за счет увеличения нагрузки на систему электроснабжения. Несмотря на указанные особенности необходимо обеспечить 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 оборудования. Это необходимо для внедрения стратегии эксплуатации по состоянию [56, 101] и возможности реализации отложенного обслуживания, а также при создании самолетов с повышенной электрификацией оборудования [56, 101].

Функции контроля в системах распределения электроэнергии современных воздушных судов (ВС), благодаря внедрению цифровых технологий, могут быть расширены возможностью диагностирования и прогнозирования состояния источников и потребителей электроэнергии. Использование микропроцессорной техники при управлении распределением электроэнергии создает предпосылки к внедрению интеллектуальных цифровых систем электроснабжения, и за счет совершенствования программного обеспечения позволит реализовать диагностирование и прогнозирование, не внося дополнительные аппаратные изменения. Использование результатов исследований, направленных на создание методики

диагностирования общесамолетных систем, 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.

Построение системы контроля в авиационном оборудовании может зависеть от нескольких факторов. Во-первых, в своем составе она должна иметь встроенные средства самодиагностики. Во-вторых, для разработки такой системы требуется задача дополнительных алгоритмов проверки авиационного оборудования до включения его в работу. Исходя из этого, следует отметить, что обеспечение авиационного оборудования дополнительными средствами встроенного и расширенного контроля выполняется изготовителем на этапе проектирования данного оборудования с учетом включения новых функций в аппаратно-программный комплекс. Кроме системы встроенного контроля средствами цифровой системы распределения можно организовать распределенную систему контроля приемников электроэнергии на борту воздушного судна. При этом локальные центры управления нагрузками (ЛЦУН) и распределительные центры (РЦ) будут являться узловыми точками диагностирования для самолета. Локальные центры управления нагрузками входят в состав системы распределения электрической энергии перспективных воздушных судов [72, 74, 128]. Главной задачей распределительных центров является обеспечение коммутации электрических сетей и нагрузок. Помимо этого, они решают задачи управления подсистемами самолета, в особенности системой генерирования электроэнергии и преобразовательными устройствами [72].

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) [41, 94], которая в том числе должна дополнительно 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, а также в НПО НаукаСофт [40, 41, 55, 56, 74, 95]. 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 [15, 54, 55, 62, 78, 79, 108, 109, 120].

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. [15, 59, 62, 75].

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 [59, 60].

Зарубежные разработчики авиационного оборудования, 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 их подход нацелен на устранение неполадок в цифровых системах, как с точки зрения выявления проблем, связанных с программными сбоями, так и с точки зрения выявления проблем с шинами данных, соединениями с

высоким сопротивлением, неправильной изоляцией т.д. Именно поэтому зарубежные разработчики авиационного оборудования в настоящее время предлагают различные системы дистанционной диагностики конкретной самолетной системы [113].

Американская компания Rockwell Collins разработала компьютер для диагностики технического обслуживания (MDC). Этот компьютер будет являться центральным компонентом системы диагностики 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 [123].

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 WITE» под руководством Airbus, основной целью которого является разработка системы мониторинга в реальном времени электропроводки распределения питания самолета с целью обнаружения и локализации дефектов проводов. Методов диагностики и обслуживания проводов и авиационных кабелей в РФ очень мало.

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 в виде модулей, которые являются конструктивными или функциональными компонентами объекта [38, 39].

Однако вопросы диагностирования состояния потребителей электрической энергии средствами перспективных цифровых интеллектуальных систем электроснабжения ВС с целью обеспечения надежной эксплуатации ВС и поддержания летной годности не исследованы.

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

Ввиду того, что 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 [21].

Решение указанных проблем приводит к необходимости использования 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 научного исследования заключается в повышении полноты технического диагностирования приемников электроэнергии за счет расширения диагностических функций в цифровых интеллектуальных системах

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 применения этих возможностей к совершенствованию 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 АЧХ;
- экспериментальные исследования разработанной методики диагностирования.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

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

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: 2 научных статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (по транспорту) (26 страниц) [132, 133]; 6 научных статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (36 страниц) [111, 124, 125, 134, 135, 136]; 1 отчёт НИР (120 страниц) [70].

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, с выводами по каждой их 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 приложениями 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.

Глава 1. Анализ систем контроля общесамолетного оборудования

1.1 Анализ исследований в области технической диагностики авиационного оборудования

Авиационное оборудование представляет в общем случае совокупность программно-аппаратных систем, в которых происходит преобразование энергии, а также получение и передача информации. Диагностика авиационного оборудования предполагает работу именно с информацией – получение информации о диагностируемом объекте посредством системы измерений (аналоговых и/или цифровых), обработку и передачу этой информации.

Наиболее известными в этой области являются работы К. Шенона (1948 г.) для множества событий с разными вероятностями и Р. Хартли (1928г.) для событий с одинаковыми вероятностями [62]. В работах В. А. Котельникова рассматриваются вопросы квантования электрических сигналов [62].

Прогресс в изучении этой области связан в первую очередь с быстрым развитием технических средств связи. Ввиду того, что количество получаемой информации непрерывно растет, важным критерием к используемым данным является их ценность. Анализ научных публикаций показывает, что критериями ценности информации является либо минимум стоимости ее получения в случае высокой вероятности ее получения, либо функция вероятности ее получения [62].

Состояние объекта должно определяться на основе анализа информации, которая воспринимается системой контроля об объекте. Следует отметить, что для диагностики технического состояния объекта необходимо осуществлять выбор наиболее существенных (критических) параметров. Это может быть, как один, так и комбинация параметров, которые достоверно определяют

техническое состояние объекта контроля. Следует отметить, что помимо анализа технического состояния объекта, также следует проводить и анализ диагностических признаков [62].

В настоящее время развитие диагностики, как науки идет по пути расширения возможностей контроля. Иными словами, достижение результата происходит более быстрыми и точными методами распознавания причин отклонений технического объекта от заданных норм [62].

Диагностирование технического состояния объекта является функциональным процессом, в котором нельзя не учитывать разнообразие форм состояния объекта, которое определяется режимами его работы и множеством внешних воздействующих факторов. Также следует учитывать конструктивные и принципиальные особенности технической разработки конкретных средств диагностики [11].

Согласно ГОСТ 20911-89, техническая диагностика – это «область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов» [24].

Теоретические исследования в области основ технической диагностики авиационного оборудования, представлены в научных трудах В. Д. Константинова, В. Г. Воробьева, И. М. Синдеева, В. В. Глухова, в них описаны диагностические процессы, способы построения и анализ диагностических моделей, основные методы контроля работоспособности и методы поиска неисправностей [15, 16, 33].

Эффективность эксплуатации зависит от эффективности диагностирования, задачей которого является определение места и причины появления отказа [15, 32, 38, 50, 59, 60, 80].

Диагностирование технического состояния объекта предполагает наблюдение за контролируемыми параметрами, а также способа их получения, обработку полученной информации с учетом режимов работы, определение временных интервалов контроля [11].

В работе [3] авторы рассматривают прямую задачу оценки эффективности процесса диагностирования, при этом основное внимание в статье уделяется расчету плотности распределения вероятностей для продолжительности диагностирования, также авторы подтверждают свои результаты моделированием для проверки адекватности своих расчетов.

Для эксплуатации авиационного оборудования по техническому состоянию в первую очередь необходимо обеспечить эффективное техническое обслуживание. На сегодняшний момент для этого существует ранняя диагностика. Подобного рода мониторинг позволяет находить неисправности в авиационном оборудовании заблаговременно еще на стадии их развития. После этого принимается решение о продолжении эксплуатации или немедленной замены контролируемого оборудования на ВС. Благодаря обнаружению неисправностей на ранней стадии имеется возможность предотвращения отказов в процессе эксплуатации, тем самым повышая надежность авиационного оборудования [62].

О. Ф. Машошин в [62] использует классификацию методов диагностики по Биргеру И. А. (рис. 1.1), которую можно использовать для выбора конкретного направления исследований.



Рисунок 1.1. Классификация методов диагностики [62]

Для гражданской авиации нашей страны, на этапе полного импортозамещения авиационного оборудования, в том числе важных приемников электрической энергии, важно как можно быстрее решить проблему достоверной оценки состояния и возможности увеличения ресурса оборудования. Это в свою очередь обусловлено повышением отказоустойчивости элементов в системах распределения электроснабжения, для дальнейшей безопасной эксплуатации ВС [10].

Для методов диагностирования, проведенных в режиме off-line, в настоящее время, разработаны научно обоснованные апробированные и практически доказанные методы. Для этих методов на авиаремонтных предприятиях разрабатываются специальные программы стендовых испытаний для различных электротехнических устройств. Эти методы могут быть реализованы при периодическом техническом обслуживании [10].

Выбор конкретного метода диагностирования зависит от множества требований (оперативность и точность представления информации, влияние отказов каналов измерения и запаздывания при передаче информации, наличие переходных процессов, параметров возмущений детерминированного и стохастического характера) [32].

Разработчик конкретного авиационного оборудования обязан разработать критерии, определяющие предельное состояние своего изделия для решения вопросов о ресурсе, о функционировании. В случае невозможности обеспечения диагностического контроля разработчик обязан указать это в конструкторской и эксплуатационной документации. Перечень критериальных параметров определяет возможности выполнения заданных функций (основное назначение конкретного оборудования) и служит для квалификации в категориях «работоспособно – частично работоспособно – неработоспособно» [81].

Применение методов диагностирования в авиационном оборудовании необходимо с точки зрения сохранения должного уровня отказоустойчивости авиационной техники. Системы диагностики позволяют предупредить отказы в

различных самолетных системах (СЭС, СКВ, ГС и т.д.), определить готовность оборудования в рамках дальнейшей эксплуатации, устанавливать сроки и объемы ремонтных работ. По результатам диагностирования может быть сделано заключение о возможности дальнейшей эксплуатации исследуемого оборудования или вывод о том, что дальнейшая эксплуатация может привести к снижению уровня безопасности полетов, поэтому необходимо произвести замену испытуемого оборудования.

Анализируя зарубежный опыт диагностирования электрооборудования, можно убедиться в том, что выявление причины неработоспособности того или иного компонента в исследуемом контуре является изученной задачей. Например, Джейкокс Дж. описывает логическую процедуру поиска неисправностей любой аппаратуры: выявление признаков неисправности, углубленный анализ признаков неисправности, составление перечня возможных неисправных функциональных узлов, локализация неисправного функционального узла, локализация неисправности в схеме, анализ отказов компонентов [31].

1.2 Анализ построения питающих цепей авиационного оборудования

Летательные аппараты имеют в своей комплектации большое количество приемников электрической энергии. Анализ мирового опыта создания нового и модернизация действующего технологического оборудования систем электроснабжения показывает высокую динамику внедрения новых приёмников электроэнергии. Это обусловлено стремлением к максимальному повышению надежности в эксплуатации ВС. Приемник электрической энергии – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в другой вид энергии (или электрическую энергию, но с другими параметрами) [48].

Разнообразие приемников электроэнергии обусловлено разнообразием функций, которые они выполняют, переводом ряда исполнительных устройств на питание от электрической энергии, а также появлением новых задач, вытекающих из тенденции повышения электрификации бортового оборудования.

Приемники ЭЭ классифицируют по следующим признакам:

- по функциональному назначению;
- по электротехническим и энергетическим показателям;
- по режиму работы;
- по требованиям к надежности электроснабжения;
- исполнению защит от воздействия внешних воздействующих факторов [48].

По надежности электропитания приемники электроэнергии делятся на три категории [28]:

- приемники, необходимые для безопасного завершения полета и посадки;
- приемники, используемые для безопасного продолжения полета, выполнения задания и посадки;
- приемники, выход которых из строя не влияет на безопасность полета.

По функциональному назначению ПЭЭ можно условно разделить на бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) и электрооборудование – электроприводы, нагревательное, осветительное оборудование [72].

Время работы СЭС в аварийном режиме при питании приемников электроэнергии первой категории от аккумуляторной батареи составляет не менее 30 мин [1].

Для питания приемников электроэнергии первой категории, должны устанавливаться аварийные (альтернативные) источники электропитания, которые обособлены и не зависят от основной системы генерирования. Такие источники должны обеспечивать в течение всего оставшегося времени полета электропитанием приемников первой категории [2].

В число приемников электроэнергии, на которые должно подаваться электропитание от аварийных источников, должны входить:

- приемники электроэнергии, функционирование которых немедленно необходимо для обеспечения безопасности и которые должны продолжать работать без вмешательства экипажа после отказа системы генерирования;
- приемники электроэнергии, необходимые для продолжения управляемого полета;
- приемники электроэнергии, требуемые для снижения, захода на посадку и посадки [2].

В следствии большого разнообразия приемников, каждый должен иметь встроенную систему контроля, работоспособность которой обеспечивается, как правило, при работе приемника под токовой нагрузкой.

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).

Основным назначением ВИП является получение напряжения для непосредственного питания электрической энергией электронных и других устройств [72]. В свою очередь ВИП получают энергию от первичных источников электроэнергии (питания), вырабатывающих электричество от генераторов, аккумуляторов и т.д. ВИП представляют собой преобразователи электрической энергии (Рис. 1.2). В большинстве случаев ВИП преобразует энергию переменного и/или постоянного тока электрической сети в электроэнергию постоянного напряжения требуемого уровня [13].

Можно выделить задачами, выполняемые ВИП [13]:

- обеспечение передачи мощности с наименьшими потерями и соблюдением заданных характеристик [18];
- преобразование вида электроэнергии (преобразование переменного напряжения в постоянное, и наоборот, преобразование частоты, формирование импульсов напряжения и т. д.);
- преобразование уровня напряжения;

- стабилизация параметров (напряжения, тока и других параметры на выходе источника питания в зависимости от его назначения) при влиянии всей совокупности дестабилизирующих факторов;
- защита в случае возникновения неисправности (коротких замыканий, обрывов и др.);
- гальваническая развязка цепей;
- регулировка и настройка для обеспечения правильной работы электроприбора в соответствии заданными требованиями;
- управление (регулировка, включение/отключение каких-либо цепей, или источника питания в целом);
- контроль (отображение или индикация параметров на входе и на выходе источника питания, включения/выключения цепей, срабатывания защит), который может быть встроенным или дистанционным [70].



Рисунок 1.2. Обобщенная структурная схема ИВЭП

Модули вторичных питающих напряжений, входящие в блоки, имеют в своем составе схему допускового контроля выходных напряжений, формирующую сигнал исправности модуля (рис. 1.2). Сигналы исправности

блоков используются в комплексе БРЭО для обеспечения его отказоустойчивости путем резервирования на уровне блоков и систем.

Все модули вторичных питающих напряжений, предназначенные для питания блоков, содержащих в своем составе вычислительные модули, вырабатывают и выдают в вычислительные модули сигнал аварии сети питания (АСП). Сигнал АСП вырабатывается в том случае, когда входное напряжение, поступающее на блок от системы электроснабжения, и напряжение аварийного источника снижаются до величин, соответствующих аварийному режиму.

Модули вторичных питающих напряжений и системы вторичного электропитания блоков выполняются по одноуровневой (рис.1.3), двухуровневой (рис.1.4) и трехуровневой схемам (рис.1.5).



Рисунок 1.3. Одноуровневый стабилизатор

В трехуровневой схеме на вход модуля вторичных питающих напряжений поступает напряжение от системы электроснабжения переменного тока $U = 115$ В, $f = 400$ Гц и напряжение от аварийного источника $U = 27$ В. Эти модули применяются для питания БЦВМ [70].

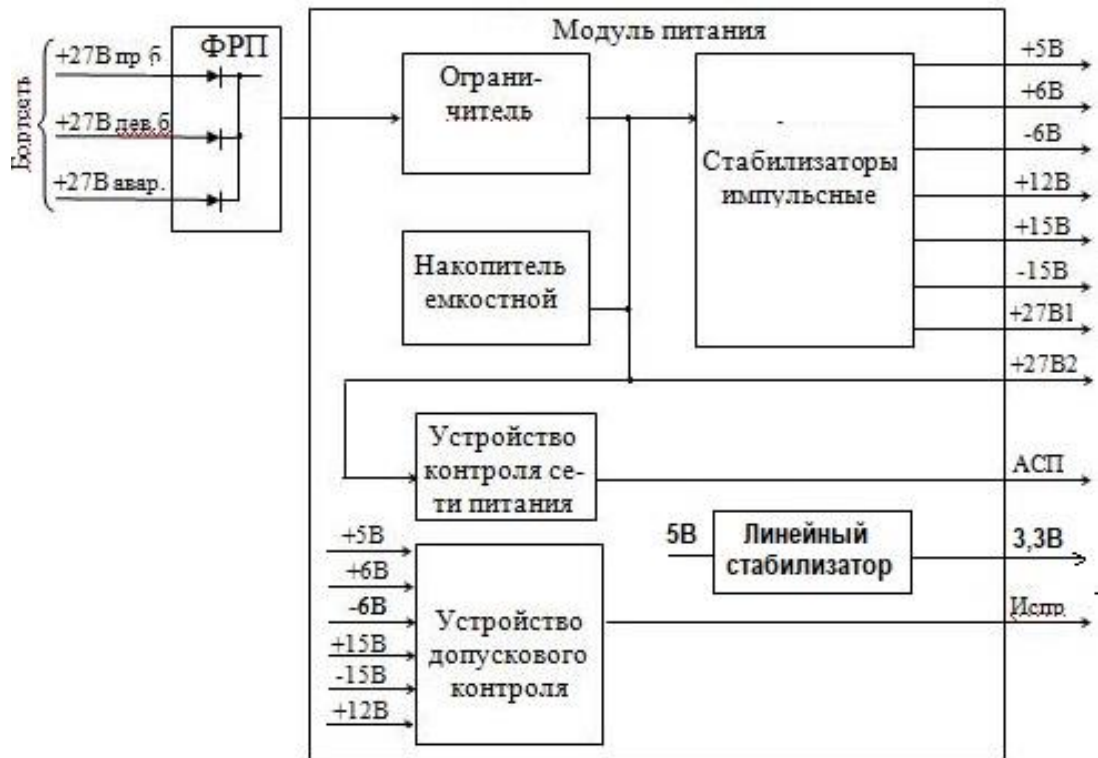


Рисунок 1.4. Двухуровневая схема питания

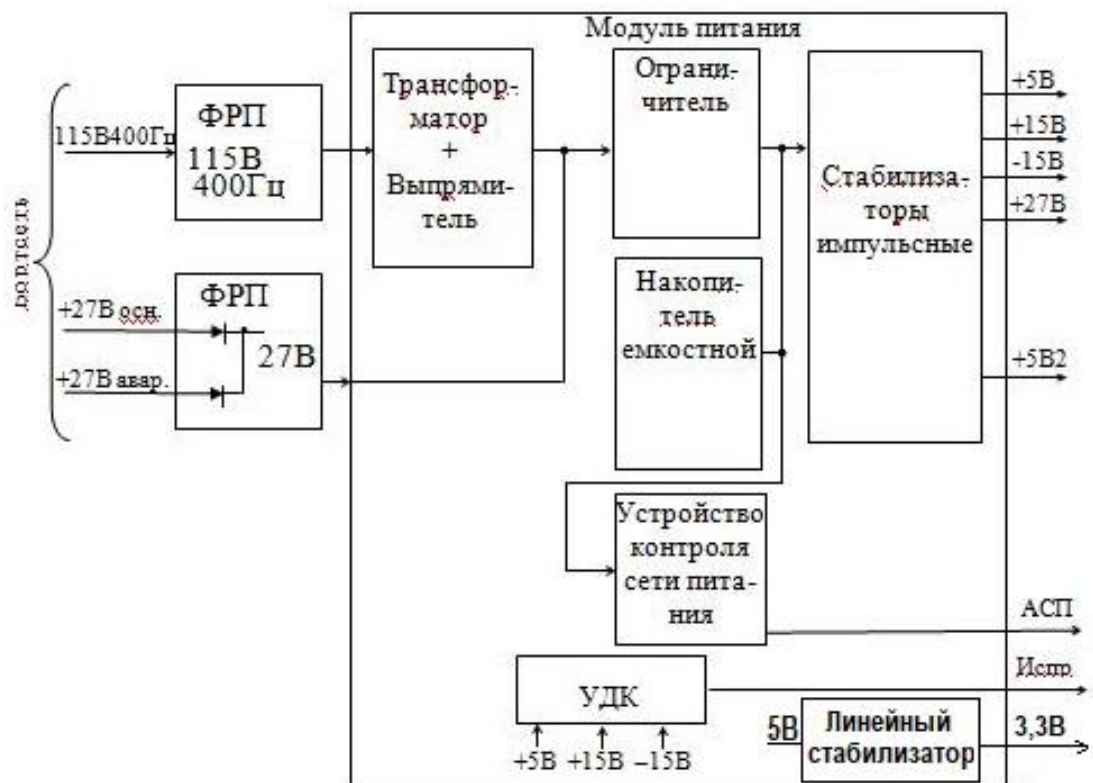


Рисунок 1.5. Трехуровневая схема питания [72]

В составе каждого из вышеуказанных блоков входит фильтр радиопомех (ФРП). Данный фильтр служит для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры комплекса БРЭО.

В развивающейся концепции интегральной модульной авионики аппаратура БРЭО должна быть выполнена в виде стандартных стеллажей (крейтов) с установленными в них унифицированными функциональными модулями [72]. Каждый крейт включает в свой состав ИВЭП и ФРП. Питание источников вторичного электропитания крейтов обеспечивают от двух каналов первичной системы электроснабжения и от аварийного источника электропитания, что существенно увеличивает сложность источников и требует установки дополнительных фильтров радиопомех [72]. Структура электропитания крейта показана на рисунке 1.6.

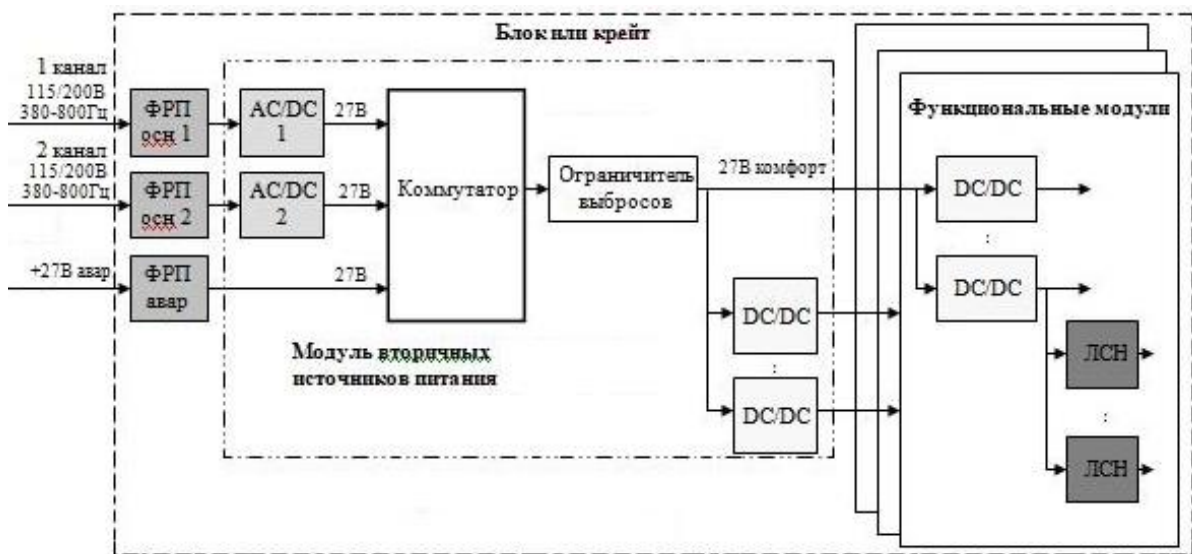


Рисунок 1.6. Схема питания крейта

Приемники электрической энергии можно разделить по виду электрической энергии необходимой для их работы и по структуре их входных цепей, подключаемых к источнику питания.

Анализ БРЭО современных воздушных судов показывает, что их входные цепи имеют структуру, представленную на рисунке 1.7 и 1.8. Схема на рисунке

1.2.5 отображает структуру питания переменным током, схема на рисунке 1.2.6 - отображает структуру при питании на постоянном токе [72].



Рисунок 1.7. Организация цепей питания БРЭО электроэнергией переменного тока [72]

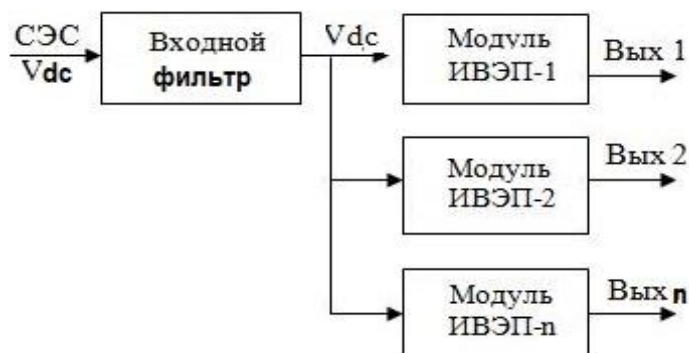


Рисунок 1.8. Организация цепей питания БРЭО от источников постоянного тока [72]

Анализ устройств вторичного электропитания современного БРЭО показал, что эти устройства имеют импульсные блоки питания и оснащены входными фильтрами, обеспечивающими электромагнитную совместимость на ВС.

Мощные приемники ЭЭ – это нагревательное оборудование и электродвигатели приводов. Для контроля нагревательных элементов достаточно определять их сопротивления. Двигатели могут быть либо управляемые (тогда есть полупроводниковый преобразователь электроэнергии) и неуправляемые, которые подключаются непосредственно к источнику [72].

Существующие системы электроприводов современных самолетов А380, А350, В787, МС-21 используют управляемые электродвигатели, а концепция «Полностью электрический самолет» предполагает еще более значительное увеличение управляемых электрических приводов различного назначения: для отклонения руля высоты, элеронов, руля управления, перемещения предкрылков и закрылков, выпуска и уборки шасси и т.п.

Использование для топливных насосов электроприводов с регулируемой частотой вращения позволяет улучшить массовые характеристики агрегатов системы топливопитания за счет исключения традиционного дозатора топлива. Активно ведутся работы по системам управления силовой установкой с электроприводными агрегатами и электрическому запуску авиадвигателей с помощью стартер-генераторов.

Управляемые приводы большой мощности установлены в системах кондиционирования самолета Boeing 787.

Обычно в качестве электрических двигателей в таких приводах используются вентильные двигатели постоянного тока (ВДПТ) с постоянными магнитами на базе интерметаллических соединений редкоземельных элементов с кобальтом (РЗМ-магнитов) или вентильно-индукторные двигатели.

Несмотря на функциональное отличие БРЭО и приводов их входные цепи по электропитанию содержат сходные элементы, что упрощает контроль авиационного оборудования по цепям питания [70].

В результате анализа состава оборудования современных воздушных судов рассмотрены схемы построения питающих цепей авиационного оборудования. Далее будут рассматриваться возможности контроля и диагностирования параметров потребителей электрической энергии.

1.3 Анализ существующих методов и средств для диагностирования авиационного электрооборудования

На сегодняшний момент, можно наблюдать большое количество различных приборов для оперативного определения технического состояния авиационного оборудования. Такие приборы могут с определенной точностью измерять сигналы, которые соответствуют диагностическим параметрам объекта технической диагностики [4].

Основные методы диагностирования технического состояния объектов авиационной техники более детально изложены в работах О. Ф. Машошина, И. М. Макаровского, Ю. П. Иванова, В. Г. Никитина и В. Ю. Чернова [43, 31]. В научных трудах рассмотрены принципы организации, основные вопросы информационно-методического обеспечения прогнозирования технического состояния авиационного оборудования, способы реализации диагностирования и прогнозирования с помощью автоматизированных средств контроля [4].

Первоначально перед разработкой методов и средств технической диагностики стоит задача определения параметров, характеризующих работоспособность контролируемого оборудования и определяющих надежность объекта в целом. После этого необходимо определить конкретные диагностические критерии, т.е. определить количественную величину параметров и только на основании соблюдения предписанных условий следует разработать соответствующие методы и средства определения технического состояния объекта [4].

Рассматривают параметрические и физические методы технического диагностирования [4].

Методы технического диагностирования разделяют на следующие группы:

- диагностирование в процессе функционирования, учитывающая динамику объекта: по непосредственным параметрам рабочих процессов

(мощности, производительности и т.п.); по косвенным диагностическим параметрам, характеризующим техническое состояние (температура, шум, вибрации);

- диагностирование по структурным параметрам (износ, деградация свойств и т.п.);

- по виду объекта, методам и глубине операций она может быть комплексной или поэлементной.

Комплексная диагностика позволяет определить соответствие нормам выходных эксплуатационных показателей оборудования в целом.

При поэлементной диагностике, которая как правило проводится по косвенным признакам, выявляется техническое состояние и потребность снятия или разборки конкретного проверяемого изделия [4].

В зависимости от реализации различают уровни диагностики: уровень объекта в целом; уровень конкретных блоков и агрегатов; уровни систем, блоков и элементов, механизмов и деталей [4].

Диагностирование может проводиться последовательно, начиная с уровня объекта и, при необходимости, может доходить до уровня конкретных элементов [4]. Методы и средства диагностирования объектов определяются выполняемыми функциями и их свойствами (структурными и параметрическими) [4].

Средства, необходимые для диагностирования авиационного электрооборудования, предназначаются для получения и анализа диагностических признаков, которые определяются разработчиком при его проектировании. При испытаниях, эксплуатации, на ремонтных предприятиях используют приборы, приспособления и стенды, которые применяются для определения конкретных диагностических признаков и применения методов диагностирования [4].

Отечественная и зарубежная статистика работ многих известных авиакомпаний показывает, что на данном этапе выявляется большая

конкуренция с точки зрения снижения расходов на ТОиР, под чем подразумевается повышение эффективности эксплуатации ВС [4].

Для решения указанной проблемы необходимо проведение специальных исследований в части разработки и внедрения в эксплуатацию прогрессивных методов и средств контроля технического состояния комплектующих изделий, входящих в состав ВС, а также важным аспектом в решении данной проблемы является поиск конкретных мест отказов [4].

Первым шагом для решения указанной проблемы следует сформировать перечень диагностических признаков, по которым можно реально отследить работоспособность объекта. Здесь существует несколько методов – малых отклонений, факторного анализа, математического моделирования или полунатурных испытаний объекта, экспертных оценок, методы оптимизации набора контролируемых параметров. [62].

Основные подходы к формированию, оценке и применению диагностических параметров, а также детерминированных и стохастических моделей в задачах контроля изложил в своей монографии А. В. Чернодаров [8]. Автор точно сформулировал задачу оценивания в условиях априорной неопределенности и ее решение с помощью методов вариационного исчисления и робастной статистики.

Следует обратить внимание на то, что если диагностировать оборудование, которое обычно эксплуатируется «по-наработке», то в инструкции по эксплуатации будет отсутствовать информация про постоянный контроль такого оборудования. Для оборудования, функционирование которого крайне важно в полете стоит разрабатывать методику диагностирования его технического состояния на основе математического анализа.

В своих публикация Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В. разработали похожую методику идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем. В своей статье авторы делают акцент на целесообразное расширение перечня применяемых в авиации средств эксплуатационного контроля и формирование

на их основе информационно-диагностической системы воздушных судов [71]. Подобными разработками также занимались ученые Воробьев А. А. и Лагойко О. С. [44].

Из вышеизложенного текста становится очевидным, что не существует универсального метода контроля. Только в зависимости от функционального назначения того или иного оборудования должен быть выбран метод для диагностики технического состояния этого оборудования. Следует правильно выбирать структуру, а также требуемые показатели надежности и достоверности информации [43].

Заключительным этапом процесса диагностики является выбор конкретного критерия для принятия решения о работоспособности или неработоспособности объекта исследования и его дальнейшего использования на ВС [43].

1.4 Возможности диагностирования и прогнозирования состояния потребителей электроэнергии в процессе эксплуатации воздушных судов.

Рассматривая анализ, разработку и реализацию процессов технической диагностики различных состояний исследуемых объектов в первую очередь следует обратить внимание на задачи, которые открываются при анализе, разработке и реализации процессов управления в общем. Важной задачей является исследование физических свойств объектов контроля и их отказов. Не менее важной является задача построения математических моделей самих объектов контроля и моделей их отказов. После этого следует приступить к анализу моделей объектов контроля для снятия данных. Получение данных требуется для построения алгоритмов контроля [75]. После проведенного анализа и сбора данных следует решить задачи создания средств технического контроля на основе разработанных алгоритмов. Только после

экспериментальной проверки разработанной системы диагностики с положительным результатом можно говорить о реализации этой системы и внедрения ее в эксплуатацию. В конечном счете, итогом проделанной работы будет являться разработка методов проектирования средств технической диагностики в целом и исследование их характеристик и свойств.

В основном термин «контроль технического состояния» применяется в том случае, когда главной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния (ТС). Если перейти от термина «диагностирование» к термину «прогнозирование», то конечной целью прогнозирования ТС будет являться определение с заданной вероятностью интервала времени, в течение которого сохранится исправное состояние объекта исследования. Также можно спрогнозировать вероятность сохранения исправного состояния в конкретный период времени. Для контроля технического состояния авиационного оборудования крайне важно получение результатов прогноза для исследуемого объекта с точки зрения дальнейшей эксплуатации. Результатами прогноза могут являться поведения отдельных комплектующих изделий, отказ которых может повлиять на работоспособность функциональных систем воздушных судов в будущем [75].

Саидумаров И. М. в своих статьях очень детально изложил роль встроенного контроля в задачах диагностирования авиационного оборудования. Автор указывает, что одним существенно влияющим фактором на эффективность процесса диагностирования, является качество алгоритмов диагностирования, реализуемых встроенным контролем. Решая одну и ту же задачу диагностирования, можно использовать несколько алгоритмов контроля. Они могут различаться между собой либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации, либо тем и другим совместно, при этом используя разные затраты на реализацию [75].

Встроенным средствам контроля присущи следующие основные преимущества:

- значительное сокращение времени восстановления работоспособности системы и, соответственно, повышение общей эксплуатационной готовности;
- уменьшение численности обслуживающего персонала, обеспечивающего ремонтно-восстановительные работы;
- сокращение видов ремонта и запасных частей за счет повышения достоверности контроля [17].

В настоящее время существенно повысилось качество надежности применяемой электроники на ВС. На это повлияло применение микропроцессорных технологий в составе системы распределения ВС. Это повлекло за собой снижение потребляемой мощности, снижение массы электронных компонентов, а значит и самого ВС в целом, и расширение функционала. Следует отметить, что помимо прогресса в средствах передачи данных, разработчики авиационного оборудования сделали большой шаг вперед в части совершенствования средств индикации данных. Разработка модульного конструирования комплектующих изделий с применением цифровых технологий и интегральных схем с высокой надёжностью, а также внедрение электронной аппаратуры с функциональной группировкой электрических цепей, на современных ВС способствует реализации функций встроенного контроля [75]. Следует учесть, что стоимость системы, в которую входят подобные комплектующие изделия сильно не изменится. Создание микропроцессорных технологий повлекло за собой реализацию новых стратегий ТОиР, которые уменьшают время восстановления и сокращают число ложных замен и отказов, выявленных авиационным персоналом, а также уменьшилось время простоя ВС на земле, что повлияло на снижение расходов на эксплуатацию систем авионики.

Еще 40 лет назад на этапе проектирования авионики не закладывались требования по проверке и регулировке ее технического состояния в условиях эксплуатации. Не учитывались условия организации проверок по функционированию, работоспособности, поиску неисправности в условиях

технического обслуживания оборудования ВС. Не был глубоко затронут вопрос об организации эффективных процедур диагностирования. Авиационная техника в то время была на другом этапе автоматизации, поэтому поиск неисправностей приводил к высоким материальным затратам. Если рассматривать ВС с точки зрения его назначения, то это за собой повлекло в первую очередь высокую трудоёмкость работ инженерным составом при профилактике, ремонт и регулировку изделий и систем авионики, и конечно же изменение в расписания полётов из-за временных задержек с точки зрения ТОиР [75].

Таким образом, техническую диагностику как основу повышения надежности и эффективности эксплуатации ВС, можно определить, как совокупность идей, связанных с организацией оптимальных процедур контроля, диагностирования и оценки технического состояния систем ВС и включающих постановку проблем и задач, методов и средств их, а также методы и средства технической реализации контроля и диагностирования для оценки текущего состояния и трендов параметров этой оценки.

Работ по диагностическим системам управления, как показали проведенные исследования, очень мало, и поэтому проводить их классификацию преждевременно [38].

При проектировании систем ВС, если рассматривать с точки зрения их, как объектов контроля и диагностики, то обязательно следует учитывать анализ их свойств и характеристик, как реальных физических объектов. Следует выбирать конкретные методы построения их математических моделей для оценки их состояния. Математические модели будут являться основой формальных методов построения программ контроля технического состояния проектируемых систем [38].

На сегодняшний день часто используются в стратегиях по ТОиР методы и средства диагностики, которые основаны на различных физических принципах. Такие методы позволяют охватить контролем наиболее важные, с точки зрения эксплуатации, агрегаты, узлы и системы [62].

Еще на этапе проектирования авиационного оборудования следует закладывать в его состав встроенные средства самодиагностики, а также учитывать реализацию дополнительных алгоритмов проверки оборудования. Разработчик решает будет ли организована подобного рода контроль до включения оборудования в работу или уже в процессе эксплуатации [72].

Как, правило автоматическое диагностирование системах авионики применяется на предполетной проверке после подключения питания. Положительный результат предполетной проверки повышает вероятность успешного выполнения полета. Также тестирование можно провести в полете после подачи питания на не включенные ранее системы. При автоматическом тестовом диагностировании контролируется правильность выполнения объектом заданных ему функций. Постоянное диагностирование в полете для бортовых систем ВС дает возможность в реальном режиме времени реагировать на нарушение правильности функционирования бортовых систем [75].

Анализ построения систем электроснабжения [125] показывает необходимость разработки новых типов силовой коммутационной аппаратуры, обеспечивающей возможности управления электроэнергетическим комплексом летательных аппаратов в рамках концепции интегральной модульной авионики.

Эта аппаратура помимо коммутационных функций, должна поддерживать функции контроля токов и напряжений, оценку состояния оборудования и полностью сопрягаться с цифровой шиной данных [125].

Формируя распределенную систему контроля на борту ВС, целесообразно реализовывать оценку технического состояния оборудования в узлах сосредоточения нагрузок. Локальные центры управления нагрузками (ЛЦУН) и распределительные центры (РЦ) могут являться такими узловыми точками в системе распределения ВС [72].

Локальные центры управления нагрузками являются составной частью системы распределения электрической энергии современного ВС [72]. Помимо ЛЦУН в эту систему входят также первичный и вторичный центры

распределения. Для самолетов [69] с геометрией подобной Boeing 787, A380 (размещение силовых установок на крыле) первичные и вторичные распределительные центры размещаются в центроплане и вблизи пилотской кабины (рис.1.9), что обеспечивает минимальную длину силовых проводников [70].

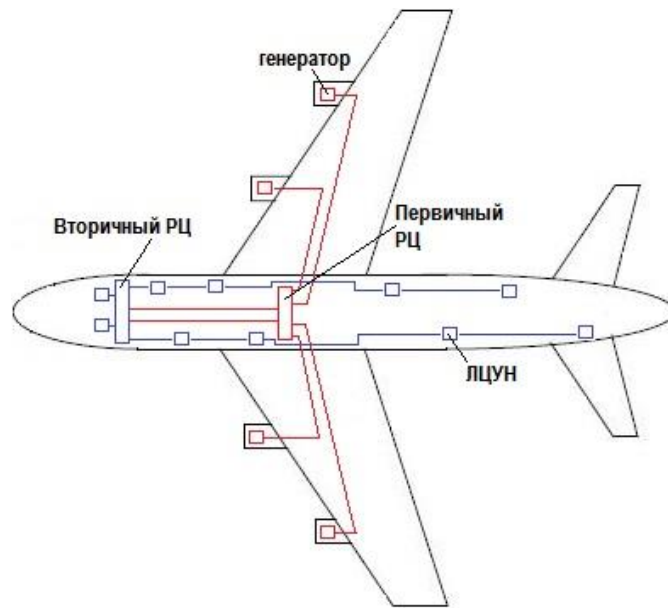


Рисунок 1.9. Размещение системы распределения

У распределительных центров помимо функций, которые связаны с их непосредственной задачей (обеспечение коммутации электрических сетей и нагрузок), могут быть включены функции по управлению подсистемами самолета, в том числе системой генерирования электроэнергии и преобразовательными устройствами [72].

Возможности этой аппаратуры не ограничены. ЛЦУН помимо обеспечения коммутацией электрических сетей и нагрузок может обеспечивать функции контроля токов и напряжений и оценку состояния оборудования, поскольку полностью сопрягается с цифровой шиной управления [72].

Современные интегрированные элементы коммутационной техники имеют различные наименования:

PEPDC - Integrated Primary Electrical Power Distribution Centre;

SPDU - Secondary Power Distribution Unit;

SEPDBs - Secondary Electrical Power Distribution Boxes;

LRM - Line Replaceable Module;

RPDU - Remote Power Distribution Units;

ELCU - Electronic Load Control Unit.

В отечественной технике подобные устройства называют локальными центрами управления нагрузкой (ЛЦУН), выключатель-предохранитель (ВП), блок коммутации и защиты (БКЗ), интеллектуальный силовой коммутатор (ИСК).

Архитектуру построения ЛЦУН можно рассмотреть на примере SPDU *SERIES* 28 VDC фирмы Esterline Technologies Corporation (рис.1.10) [116].

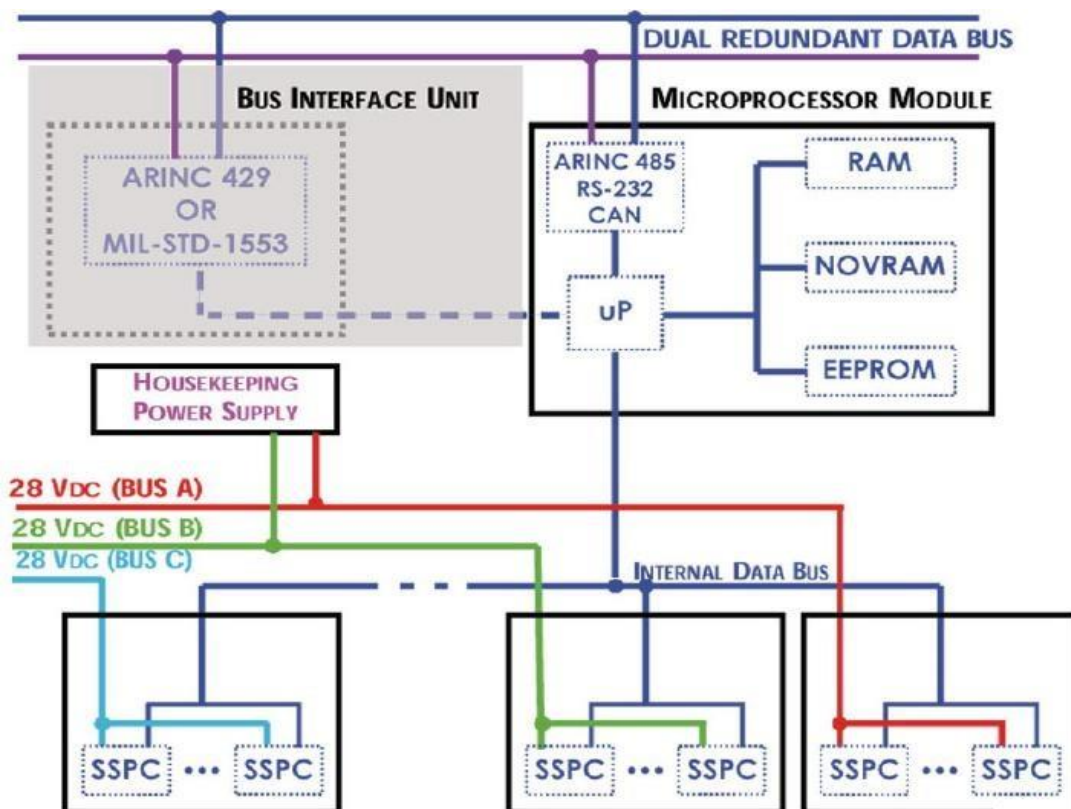


Рисунок 1.10. Архитектура SPDU 28DC Esterline

Данный SPDU в штатной комплектации содержит 28 электронных ключей (SSPCs), предназначенных для коммутации напряжения 28В

постоянного тока. Блок содержит 6 каналов на ток до 10А (при $t \leq 85^\circ\text{C}$) и 22 канала на ток до 5А (при $t \leq 85^\circ\text{C}$), кроме того, есть модификации с двумя дополнительными каналами по 60 А. Блок имеет дублированную шину питания 28 В и дублированную шину обмена данными, встроенный источник питания для системы управления. Блок содержит 7 сменных плат (LRM).

Управление блоком осуществляется по шине данных, с помощью дискретных сигналов или кнопок на корпусе, на корпус также выведена светодиодная индикация состояния ключей [116].

SPDU имеет развитую встроенную систему контроля: в момент включения, в процессе функционирования и контроль по требованию. В процессе контроля проверяется ампер-секундная характеристика ключей.

Опционально блок поддерживает работу по шине данных в стандартах: MIL-STD-1553B, ARINC 429, ARINC 485, RS-232 и CAN Bus. Каналы могут программироваться на токи 75%, 50%, 25% от их номинального значения. По шине данных также передается состояние ключей, токи нагрузок, состояние блока. Блок имеет встроенный микропроцессорный модуль, который взаимодействует с LRM через внутреннюю шину данных.

В составе ЛЦУН на данном этапе отсутствуют функции контроля состояния коммутируемого оборудования. В следствии наличия прямой электрической связи ЛЦУН с электрическим оборудованием, можно реализовать в составе ЛЦУН дополнительно функции контроля для внешнего оборудования. ЛЦУН обеспечивает контроль токов и напряжений в системе распределения ВС, также в его состав входит управляющий процессор и к нему подключены шины для передачи данных [70]. Для выполнения контрольных функций потребуется расширить архитектуру ЛЦУН и его программное обеспечение.

Важным аспектом системы распределения является непосредственная связь ЛЦУН с приемниками электрической энергии, что позволяет автоматизировать диагностику целостности линий питания электрического приемника, а также провести диагностирование состояния приемника [72].

Из всего вышеизложенного становится очевидным, что средствами встроенного контроля невозможно оценивать параметры входных (выходных) цепей электропитания. Для этого должна быть разработана специальная методика диагностирования, реализуемая в интеллектуальных системах распределения электроэнергии. Необходимо построить алгоритм определения параметров диагностируемого оборудования на основе идентификации параметров их цифровых портретов.

1.5 Анализ свойств и причин выхода из строя реактивных элементов

Состояние и надежность элементов различных систем (например, элементов электрических схем), исходя из их физических процессов полностью зависит от свойств конкретных материалов, из которых они изготовлены, от характера внешних воздействий и факторов нагрузки.

Для основных материалов, используемых в авиационной промышленности, имеются зависимости протекания физико-химических процессов. Эти зависимости строятся на основе старения и изменения механических, электрических и магнитных свойств материалов, а также на основе количественных показателей воздействующих факторов.

В первую очередь старение материалов обусловлено рекристаллизацией материалов, химическими реакциями, диффузией, коррозионными процессами и увлажнением. Из-за перечисленных явлений происходит изменение исходных свойств материалов, из которых изготовлены конкретные элементы. За этими изменениями свойств материалов следуют повреждения элементов и в дальнейшем возникновение отказов системы, в состав которой входил этот элемент.

Снижение значений характеристик оборудования во времени, в том числе может быть вызвано старением материалов. Чтобы понять, насколько

изменились характеристики оборудования следует проанализировать начальные свойства данного оборудования, напряженное состояние материала и интенсивность воздействия внешних факторов. Следует отметить, что старение материалов — это всегда необратимый процесс, на который сложно повлиять, но можно преждевременно выявить снижение характеристик оборудования и предотвратить его выход из строя [83].

Как правило, элементы электрических схем часто выходят из строя в следствии длительного нагрева или ошибок при эксплуатации. Так же стоит отметить, что существуют и другие причины, например, электролитические конденсаторы приходят в негодность из-за высыхания электролита в течении некоторого промежутка времени. Обычно, это очень сложно проконтролировать ввиду того, что нет никаких внешних признаков дефекта. Не существует типов схем, которые более или менее подвержены этой неисправности. Подобного рода снижение емкости, можно наблюдать, как в RC-цепях, так и в схемах установки начального состояния микроконтроллеров. Отсюда можно сделать вывод, что все конденсаторы должны быть подвержены контролю. Если в результате контроля, обнаружится неисправный компонент, то он сразу должен быть заменен на исправный. Стоит отметить, что существуют конденсаторы с неизвестными параметрами. В данном случае следует использовать схему этого или похожего устройства. Если же такой схемы нет, то следует подбирать конденсатор, похожий по внешнему виду, что может сказываться на дальнейшей эксплуатации этого устройства [82].

Обычно, в системе электроснабжения ВС электролитические конденсаторы используются в схемах фильтрации источников питания (рис. 1.11). Наибольшее распространение в электронной промышленности получили именно алюминиевые электролитические конденсаторы из-за больших значений емкости и относительно небольшого размера [64].

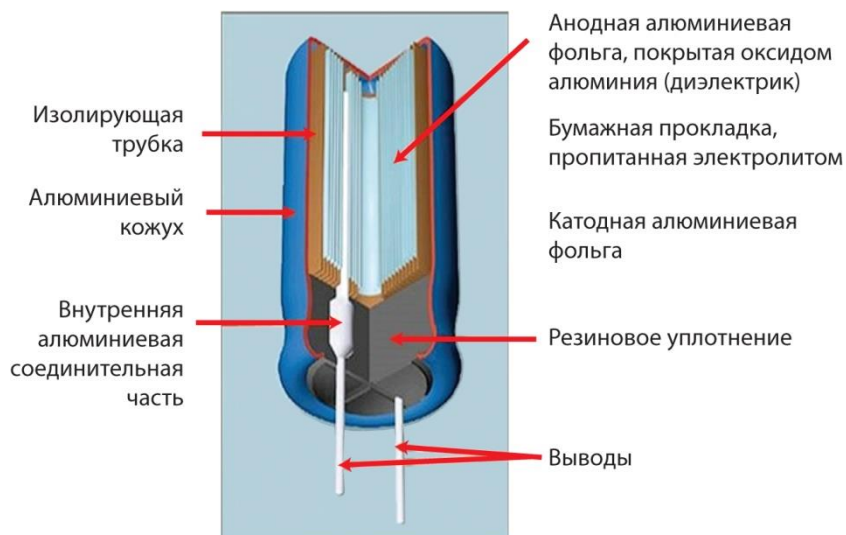


Рисунок 1.11. Строение алюминиевого электролитического конденсатора [64]

Существуют и другие виды конденсаторов, такие как керамические, танталовые, полимерные, пленочные. Электролитические конденсаторы в сравнении с другими выигрывают с точки зрения сочетания стоимости, напряжения и емкости и эквивалентного последовательного сопротивления. Итак, электролитические конденсаторы [64]:

- имеют одни из самых высоких показателей емкости среди конденсаторных технологий;
- обеспечивают эту емкость при относительно низких затратах и сравнительно высоком напряжении;
- емкость также относительно стабильна в диапазоне рабочего напряжения и температуры;
- ЭПС стремится быть выше, но импеданс является стабильным в зависимости от частоты (рис. 1.12) [64].

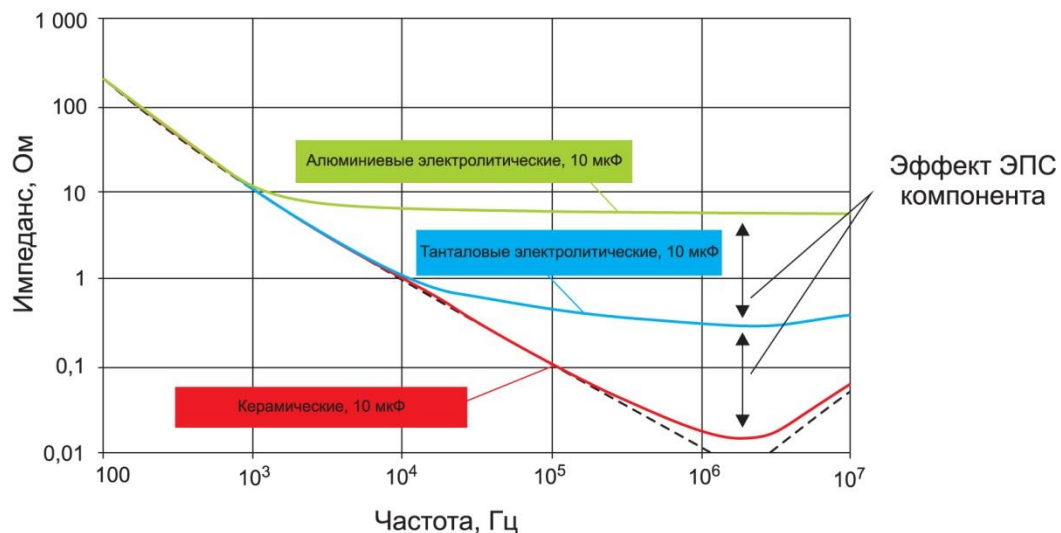


Рисунок 1.12. Характеристики импеданса алюминиевых, танталовых электролитических и керамических конденсаторов

Методы проверки могут быть визуальными и техническими. Подходящим для каждого теста является следующее [64]:

- внешний оптический осмотр для выявления признаков коррозии;
- электрические параметрические измерения для выявления возможных несоответствий и отклонений по сравнению с исходной документацией;
- контроль утечки электролита (проверка деградации герметичных уплотнений) [64].

Катушки индуктивности применяются в радиоэлектронной аппаратуре в основном для перераспределения токов различной частоты в электрических цепях. Нельзя не отметить, что у катушек индуктивности существует допустимое относительное отклонение. Для катушек, дросселей применяются низкие требования по точности, поэтому отклонение может достигать вплоть до 30 % [45].

Можно отследить на какие внешние воздействия (температура, влага и т.д.) больше всего оказывает влияние катушка, путем контроля над изменением ее параметров во времени. Также на изменение значений индуктивности может повлиять сама конструкция [45].

Для катушек индуктивности с ферритовым сердечником характерно медленное уменьшение значения индуктивности со временем, вызывающее старение. Наиболее быстрому старению подвержены катушки с каркасами из органических диэлектриков. Для этого в стабильных катушках применяются керамические каркасы, которые менее подвержены старению. Катушки индуктивности в отличие от конденсаторов наименее подвержены быстрым отказам, которые вызываемы старением диэлектрических и магнитных материалов и окислением проводников. Как правило, отказы в катушках индуктивности происходят из-за нарушения электрических контактов проводок обмоток с выводами и механических повреждений обмоток [45].

В радиоэлектронной и электрической аппаратуре в различных режимах ее работы может изменяться электрическая нагрузка на составные элементы, в связи с чем (при прочих равных условиях) меняется значение интенсивности их отказов [89].

При длительном хранении реактивные элементы могут выйти из строя. На эти элементы периодически необходимо подавать номинальному напряжению. В противном случае элементы станут непригодны для эксплуатации.

1.6 Выбор объекта, предмета и определение задач исследования

Анализ задач, необходимых для повышения безопасности полетов, что в свою очередь обеспечивает летную годность разрабатываемых и модернизируемых воздушных судов, в том числе необходимость увеличения полноты диагностирования авиационного электрооборудования, которое подключено для питания к цифровым интеллектуальным системам распределения электрической энергии, определил, что **объектом исследования** являются приемники электрической энергии, подключенные к цифровым

интеллектуальным системам распределения электроэнергии, а **предметом исследования** является методика диагностирования критических параметров электрических цепей входных каскадов приемников электрической энергии на основе результатов цифровых измерений параметров потребляемой электрической энергии (тока и напряжения питания) постоянного тока.

Оценивание состояния объекта исследования, в частности его динамических свойств, возможно на основе измерения его реакции на возмущающие воздействия. Как правило для этого используют либо частотные воздействия и получают амплитудно- и фазо- частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), либо осуществляют ступенчатое воздействие и получают переходные функции.

Параметры АЧХ несут в себе информацию о динамических свойствах объекта, так же как эти свойства определяются параметрами переходного процесса после ступенчатого воздействия (рис. 1.13).

Как источники информации и АЧХ и переходная функция равнозначны, однако для реализации функции определения свойств объекта в первом случае необходимо иметь генератор синусоидальных сигналов с необходимым диапазоном генерируемых частот, а также достаточно высокоточные измерители токов и напряжений, для точного определения модуля импеданса в условиях малых сигналов и помех. Реализация частотного метода определения свойств объекта исследования возможна либо при его наземных испытаниях, либо требует существенной переработки системы распределения электроэнергии.

Метод, основанный на определении параметров объекта исследования по переходной функции не требует дополнительных аппаратных средств для осуществления воздействия и может быть применен на борту ВС, так как приемники электроэнергии и так включаются в процессе функционирования бортового оборудования, однако получение параметров объекта исследования сопряжено с необходимостью численного получения значений производных, что не является тривиальной задачей.

Электрические схемы входных цепей питания приемников электроэнергии как правило неизвестны, однако перед началом их эксплуатации существует возможность в лабораторных условиях снять АЧХ их входных импедансов, и по экспериментально полученным АЧХ синтезировать схему эквивалентную замещения входных цепей питания. Эквивалентность такой схемы рассматривается в смысле совпадения экспериментально снятой АЧХ объекта и АЧХ эквивалентной схемы замещения (рис. 1.14).

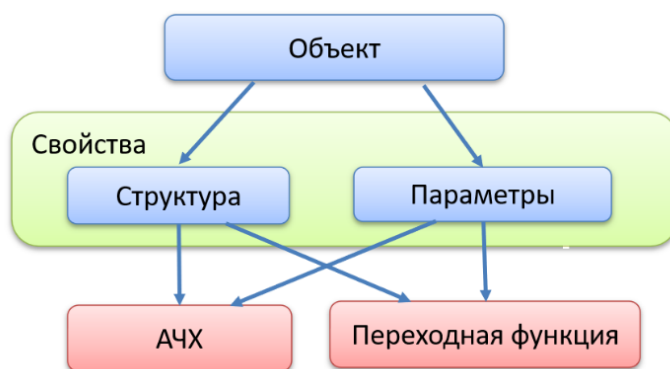


Рисунок 1.13. Определение динамических свойств объекта исследования

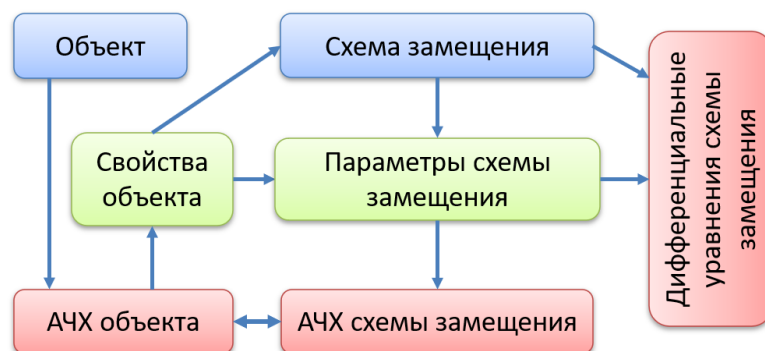


Рисунок 1.14. Определение динамических свойств объекта исследования

Таким образом мы имеем 2 группы параметров объекта исследований, которые могут быть контролируемыми параметрами в методике диагностирования – это параметры эквивалентной электрической схемы замещения и параметры (коэффициенты) системы дифференциальных уравнений.

Уравнения для определения параметров электрической схемы замещения, реализованные в микропроцессоре локального центра управления, параметры которых постоянно уточняются на основе цифровых измерений потребляемого тока и напряжения питания, и есть цифровой двойник, позволяющий диагностировать состояния приемника электроэнергии.

Выявленные *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 электроэнергии и отсутствием методов применения этих возможностей к совершенствованию системы диагностирования, приводит к необходимости решения **научной задачи** разработки методики диагностирования потребителей электроэнергии на основе имеющейся в ЦИСР ЭЭ информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения питания.

Научной задача разбита на частные задачи, которые решаются в диссертационной работе:

- анализ вариантов построения вторичных встроенных источников питания потребителей электроэнергии постоянного тока, конфигурации входных цепей в них, а также определение критических параметров с точки зрения их работоспособности, которые подлежат контролю;

- 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 на основе анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) входного импеданса;

- определение зависимости чувствительности определения контролируемых параметров электрических схем замещения к погрешностям измерения АЧХ;

- экспериментальные исследования разработанной методики диагностирования.

Выводы по 1 главе:

1. На основе анализа систем и методов диагностики авиационного электрооборудования выявлено:

а. увеличение количества и разнообразия потребителей электроэнергии, что приводит к необходимости совершенствования систем контроля и диагностирования нового оборудования;

б. интенсивно внедряются в бортовые системы электроснабжения цифровые интеллектуальные системы распределения электроэнергии, в которых реализованы цифровые измерения параметров передаваемой электроэнергии, а также микропроцессорная обработка измеряемых данных; это позволяет расширить возможности диагностирования приемников электрической энергии, в частности определения состояния входных цепей питания, которые недоступны для встроенного контроля;

2. Анализ принципов построения и схем питающих цепей авиационного оборудования при питании постоянным и переменным током показал:

а. большинство блоков БРЭО имеет встроенные источники вторичного электропитания, с импульсными или линейными стабилизаторами напряжения, и которые всегда имеют на ходе

схемы с реактивными элементами, подверженными старению и изменению свойств из-за внешних воздействий;

- в. мощные приемники ЭЭ (электроприводы, системы обогрева и т.п.) также в цепях питания имеют реактивные элементы, изменение свойств которых в процессе эксплуатации может привести к отказу оборудования.

3. Показано, что входные цепи питания приёмников ЭЭ могут быть диагностированы на основе определения изменения входного импеданса схемы питания 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);
- в. методом, основанным на анализе переходных функций по току и напряжению, который позволяет использовать естественное воздействие на объект контроля (подключение к бортовой сети), но требует разработки методики определения параметров объекта исследования и реализации алгоритма контроля в микроконтроллерах локальных центров управления нагрузками.

4. Применение интеллектуальной системы контроля технического состояния потребителей электроэнергии может позволить проводить диагностирование состояния, в ходе эксплуатации по состоянию и обеспечить возможность отложенного обслуживания.

5. Определен объект исследования – приемники электроэнергии, подключаемые к цифровой интеллектуальной системе распределения, и предмет исследования – методика диагностирования состояния ПЭЭ на основе использования цифрового двойника его входных цепей.

Глава 2. Исследование возможности диагностирования приемников электроэнергии на основе частотных свойств импедансов цепей питания

2.1 Анализ возможности диагностирования входных цепей приемников электроэнергии средствами цифровых систем распределения электроэнергии на основе определения параметров реактивных элементов схем замещения

Развитие авиации влечет за собой появление более сложного бортового оборудования с точки зрения эксплуатации, прямой контроль внутренних параметров которого затруднен, а перспективные цифровые интеллектуальные системы электроснабжения позволяют реализовывать дополнительные функции, связанные с измерением в реальном масштабе времени параметров потребляемой электрической энергии контролируемым оборудованием.

Под **цифровой интеллектуальной системой электроснабжения ВС** понимается такая система электроснабжения, в которой система распределения электроэнергии (рис. 2.1) включает в себя, как силовую сеть передачи электроэнергии, так и цифровую информационную сеть, связывающую все устройства СЭС, и осуществляющую в режиме реального времени

- 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 верхнего уровня (систем управления общесамолетным/общевертолетным оборудованием) и передачу информации о состоянии СЭС,
- реализацию в цифровых микроконтроллерах функций диагностирования отказов и прогнозирования состояния СЭС и потребителей ЭЭ с целью недопущения возникновения аварийных режимов.

Источники и потребители электроэнергии должны включать в свой состав цифровые паспорта, в которых записаны параметры цифровых двойников конкретных экземпляров, и которые постоянно верифицируются и изменяются при изменении свойств этого оборудования. Наличие цифровых паспортов оборудования позволяет реализовать интеллектуальные функции прогнозирования состояния и СЭС и всего оборудования, подключенного к системе распределения.

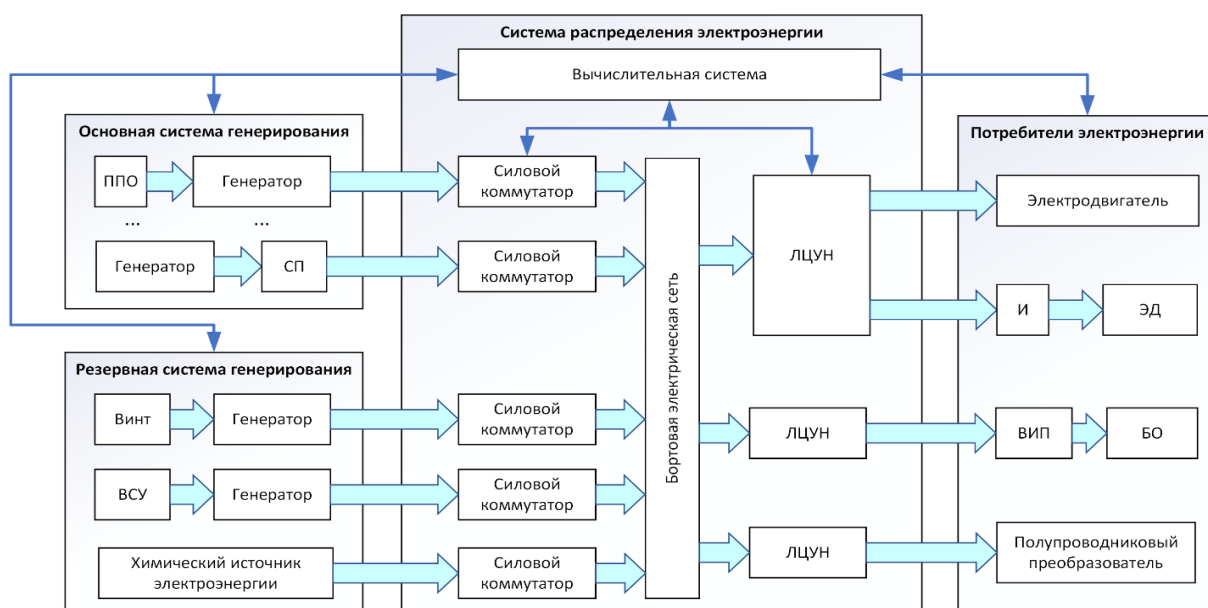


Рисунок 2.1. Система распределения электроэнергии на ВС

Следовательно, средствами цифровой интеллектуальной системы распределения электроэнергии, так как к ней подключено большинство устройств электрооборудования самолета, можно реализовать систему контроля и диагностирования состояния этого оборудования.

Внедрение микроэлектронных контроллеров в коммутационную аппаратуру широко применяется на современных самолетах. Это приводит к возможности создания интегрированной системы управления электрической нагрузкой. Исследования дополнительных возможностей интеллектуальных авиационных систем электроснабжения [72, 94, 106, 111, 128] являются первыми, которые ориентированы на применение авиационной системы

распределения электроэнергии в качестве инструмента для диагностики потребителей электроэнергии.

В современных системах распределения электроэнергии ВС для реализации функций управления и защиты используются цифровые измерения значений напряжения и тока потребления в реальном масштабе времени, эти измеренные данные могут быть использованы для получения дополнительных возможностей – оценки состояния потребителей электроэнергии, для этого необходимо произвести изменения в программных алгоритмах работы вычислителей [125].

При построении измерительно-управляющих систем, в частности, входящих в системы управления, контроля и диагностики систем электроснабжения, одной из важнейших задач является определение значений параметров объектов этих систем.

В диссертации в качестве примера рассматриваются встроенные источники вторичного электропитания, которые являются входными устройствами в потребителях электроэнергии и преобразуют электрическую энергию постоянного тока в постоянный ток других уровней напряжения.

В состав преобразователей входят реактивные элементы, обеспечивающие требования качества электроэнергии, параметры которых в процессе эксплуатации изменяются из-за старения, воздействия внешних воздействующих факторов. Выход параметров за допустимые пределы, когда не выполняются требования к качеству электроэнергии, характеризует переход ВИП, а следовательно, и всего устройства, в неработоспособное состояние. Если научиться диагностировать изменение параметров этих элементов, тогда можно будет судить о состоянии ВИП и предупредить возникновение аварийного режима.

Часто для обеспечения заданного качества электроэнергии во входных каскадах ВИП используют частотные фильтры. Они обеспечивают оптимальный уровень качества электроэнергии при работе различных видов потребителей электроэнергии в составе системы распределения ВС. Ухудшение

качества электроэнергии напрямую влияет на снижение срока службы контролируемого оборудования, что является наиболее вероятной причиной отказов и выхода из строя.

Система распределения электроэнергии всегда электрически связана с входными каскадами ВИП, поэтому существует принципиальная возможность измерения параметров потребляемой электроэнергии (токов и напряжений) для определения входных параметров ВИП.

В теории диагностики существуют различные методы определения параметров контролируемых объектов, например, частотный [70] или импедансный [49] методы и т. д. Согласно импедансному методу можно, измеряя значения полного сопротивления двухполюсника $Z(f)$ на заданном множестве значений частоты f_1, f_2, f_n , определять параметры двухполюсника на основании полученной информации.

Режим контроля оборудования в обесточенном состоянии позволяет проверить линию питания на наличие обрывов или короткого замыкания и оценить предварительно состояние приемника электрической энергии.

Приемник электрической энергии, подключенный к электронному ключу ЛЦУН можно рассматривать, как многоэлементный двухполюсник (МД), параметры которого определяются как его состоянием, так и режимом работы. В нерабочем состоянии приемник характеризуется реакцией на тестовое воздействие, в качестве реакции может выступать полное сопротивление приемника на тестовой частоте (рис.2.2). Данный метод оценивания состояния во многих случаях не обладает большой глубиной диагностирования, но может быть использован для предварительной оценки состояния оборудования [72].

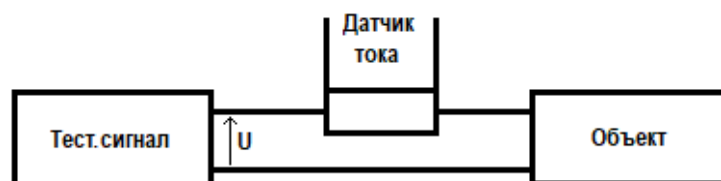


Рисунок 2.2. Схема измерения полного сопротивления [72]

Одним из наиболее распространенных методов определения импеданса является частотный метод [70] согласно которому измеряют значения полного сопротивления двухполюсника $Z(f)$ на некотором множестве значений частоты f_1, f_2, f_n и определяют параметры МД на основании полученной информации. Максимальное число идентифицируемых параметров, учитывая комплексный характер импеданса, равно $2n$. Для контроля состояния оборудования достаточно ограничиться полными сопротивлениями двухполюсника при различных тестовых сигналах, что упрощает процедуру диагностики.

Для однопараметрического двухполюсника характер изменения сопротивления от частоты известен (рис.2.3) и его определение реализуется сравнительно просто [72].

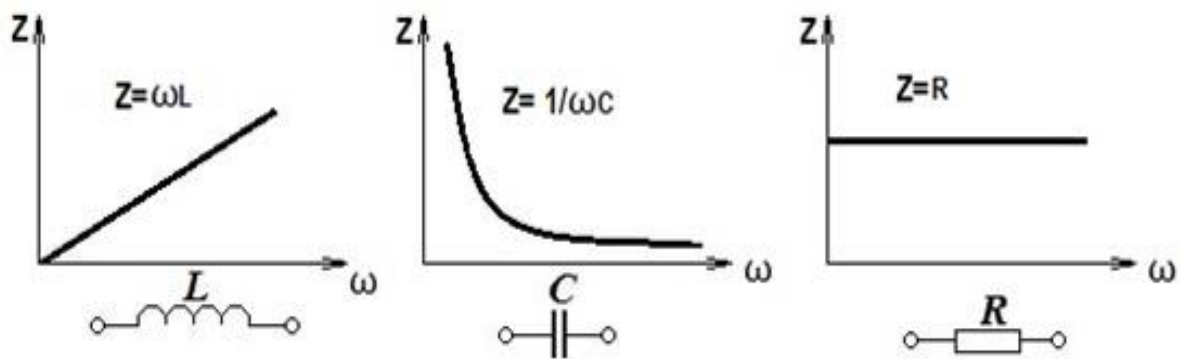


Рисунок 2.3. Зависимости сопротивлений от частоты [72]

Для многопараметрических двухполюсников частотные характеристики усложняются в зависимости от числа их параметров. Рассмотрим вначале чисто реактивную нагрузку, включающую C и L компоненты. У реактивных нагрузок сопротивление ($Z(\omega) = \pm jX$) зависит от частоты, при этом $Z(\omega)$ может многократно меняться от 0 до ∞ [70].

Значения частот ω , при которых входное сопротивление двухполюсника обращается в нуль, называются нулями входного сопротивления. Значения частоты ω , при которых входное сопротивление равно бесконечности, называются полюсами входного сопротивления.

резонанс токов, и между любыми двумя резонансами токов находится резонанс напряжений;

- при резонансе напряжений характер реактивности двухполюсника меняется с емкостного на индуктивный, а при резонансе токов – с индуктивного на емкостной; у многоэлементных реактивных двухполюсников характер реактивности контура изменяется с ростом частоты не один раз;

- при возрастании частоты реактивное сопротивление двухполюсника в точках непрерывности возрастает (с учетом знака реактивного сопротивления);

- если в схеме двухполюсника есть путь для прохождения постоянного тока, то первым наступает резонанс токов, а если такого пути нет, первым наступает резонанс напряжений [49].

В общем случае сопротивление реактивного двухполюсника $Z(j\omega)$ можно определить по канонической формуле Фостера [8]:

$$Z(j\omega) = \pm j\omega^{\pm 1} k \frac{\prod_{p=1}^m (\omega^2 - \omega_p^2)}{\prod_{q=1}^n (\omega^2 - \omega_q^2)} \quad (2.1)$$

где:

ω - частота;

m – число резонансов напряжений;

n – число резонансов токов;

ω_p, ω_q соответственно частоты резонансов напряжений (нулей) и токов (полюсов);

знаки +, - зависят от характера первого резонанса;

коэффициент k зависит от характера сопротивления на частоте, превышающей частоту максимального резонанса [70].

Зависимости сопротивлений МД от частоты для различных классов показаны на рисунке 2.5 [49].

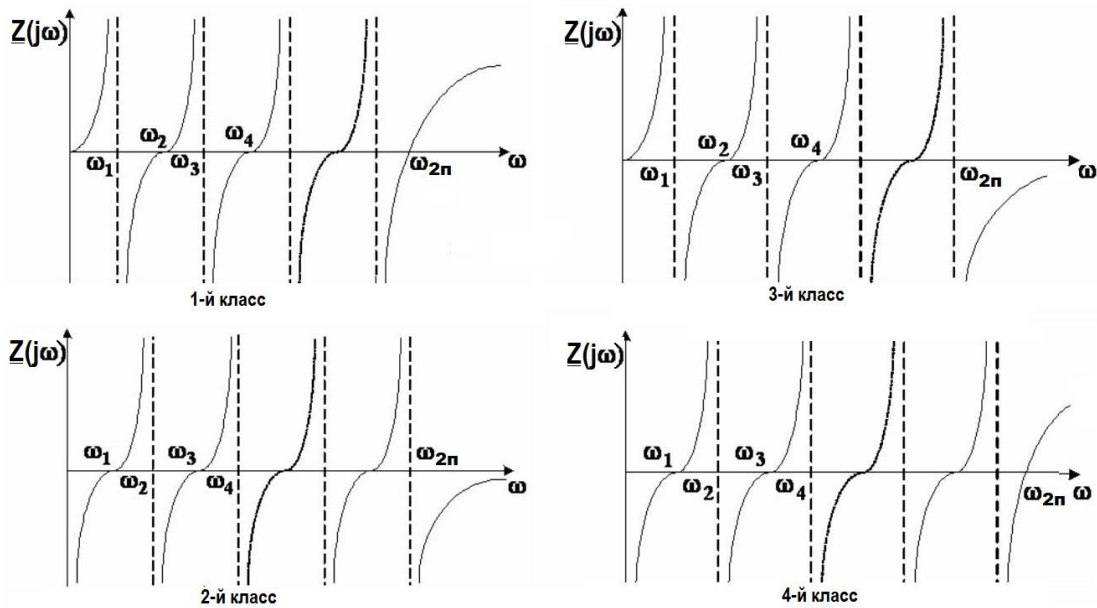


Рисунок 2.5. Зависимости входных сопротивлений многопараметрических двухполюсников от частоты

Точки нулей и полюсов на частотной оси могут быть использованы как диагностические параметры объекта контроля. Любое изменение параметров объекта приведет к их смещению. Постепенное изменение параметров объекта, вызванное их старением или другими факторами также вызовет дрейф нулей и полюсов частотной характеристики и этот дрейф может быть инструментом в прогнозировании состояния контролируемого объекта.

Рассмотренные характеристики сопротивлений относятся к чисто реактивным элементам, однако предложенный подход к оценке состояния по полному сопротивлению объекта для различных частот может быть распространен на МД, содержащие, как активные, так и реактивные элементы.

Для вычисления функции $Z(\omega)$ в общем виде можно использовать дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Полное сопротивление двухполюсника вычисляется как:

$$Z(\omega_i) = \frac{ReU_i + jImU_i}{ReI_i + jImI_i} \quad (2.2)$$

где:

ω_i – частота i -й гармоники тестового сигнала;

ReU_i , ImU_i - соответственно действительное и мнимое значения i -й гармоники тестового напряжения;

Rel_i , ImI_i - соответственно действительное и мнимое значения i -й гармоники тока [70].

При использовании ДПФ следует учитывать, что получаемый спектр сигнала будет отличаться от Фурье преобразования.

Для обобщенной формулы прямого Фурье преобразования имеем соотношение:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi ft} x(t) dt \quad (2.3)$$

где:

$x(t)$ - непрерывные значения преобразуемой величины;

f - заданная частота.

Комплексная экспонента по формуле Эйлера может быть разложена на действительную и мнимую части.

$$e^{j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) + j\sin(2\pi ft) \quad (2.4)$$

Обратное преобразование:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi ft} X(f) df \quad (2.5)$$

В реальных условиях интегрирование можно провести только на временном интервале от 0 до T , а не на интервале $-\infty \div \infty$. В этом случае прямое преобразование Фурье имеет вид:

$$X(f) = \int_0^T e^{j2\pi ft} x(t) dt \quad (2.6)$$

В результате такого перехода изменяется спектр сигнала, он из непрерывного становится дискретным с минимальным шагом по частоте:

$$f_{min} = \frac{1}{T} = \Delta f = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

При этом частоты, при которых функции \sin и \cos в выражении (2.4) будут ортогональны, равны k/T ($k=0, 1, 2 \dots n$). Формула преобразования Фурье в этом случае имеет вид:

$$X(k) = \int_0^T e^{j2\pi \frac{k}{T} t} x(t) dt \quad (2.8)$$

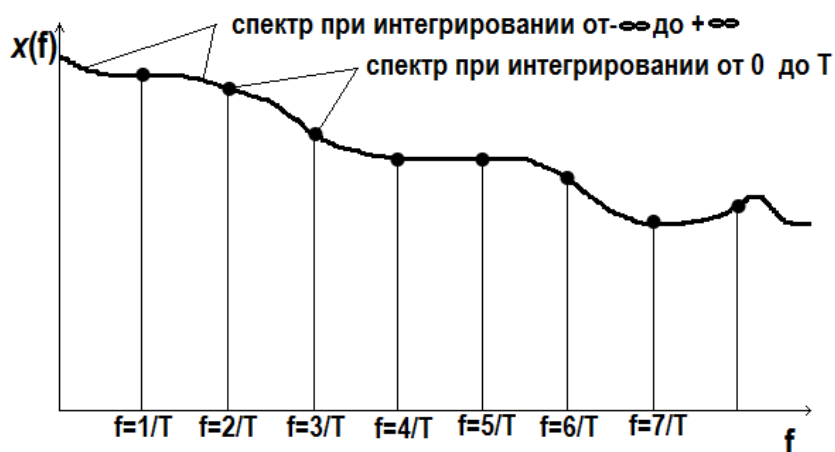


Рисунок 2.6 Спектры сигналов при различных интервалах интегрирования

Это означает, что частотная характеристика сопротивления двухполюсника (рис.2.6) будет иметь дискретный характер, в отличие от непрерывных характеристик.

Для вычисления (2.2) в цифровой системе удобно воспользоваться дискретным преобразованием Фурье:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j2\pi nm/N} \quad (2.9)$$

где:

$x(n)$ – значение измеряемой величины при n -ом отсчете;

N – число отсчетов на периоде измерений;

m – я гармоника частоты.

В тригонометрической форме:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right] \quad (2.10)$$

Соответственно:

$$\operatorname{Re}X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \quad (2.11)$$

$$\operatorname{Im}X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \quad (2.12)$$

Полученный по формуле (2.2) результат модуля сопротивления будет представлять собой решетчатую функцию. Характерные точки сопротивления на частотной оси должны совпадать со значениями решетчатой функции,

поэтому частота квантования должна выбираться с учетом, расположения контрольных точек на частотной оси [70].

Необходимо провести исследования по определению частотных характеристик оборудования, влиянию его параметров на характеристику. Также, такие исследования должны определить степень контролепригодности рассматриваемого способа. Очевидно, что данный метод контроля не может заменить встроенную систему контроля, но может её дополнить при предполетной проверке [70].

Для реализации функций диагностики и прогнозирования состояния авиационной техники необходимо наличие функциональных зависимостей между контролируемыми и измеряемыми параметрами ИВЭП. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) исследуемого оборудования может быть основанием для получения таких зависимостей.

В данном диссертационном исследовании предлагается расширить функциональные возможности интеллектуальных цифровых систем распределения энергии за счет добавления функций диагностирования состояния входных каскадов вторичных источников питания, встроенных в авиационное оборудование.

2.2 Методика анализа амплитудно-частотных характеристик входных импедансов приемников электроэнергии для определения возможности синтеза электрических схем замещения

Входные импедансы вторичных источников электропитания, в которых происходят переходные процессы, можно исследовать с помощью амплитудно-частотных характеристик.

Свойства электрических схем замещения определяются параметрами ее элементов и в первую очередь реактивных элементов, характеризующих

инерционные свойства среды распространения колебаний (электрических, механических, тепловых и др.). В процессе эксплуатации авиационного оборудования значения его параметров, а значит и параметров его электрических схем замещения изменяются относительно исходных значений, что приводит к изменению параметров их амплитудно-частотных характеристик. Отклонения параметров оборудования не должны превышать заданные значения, которые определяются предельными режимами его функционирования.

Для синтеза систем управления в технических системах модель объекта исследования часто представляют в виде передаточной частотной функции, при этом параметром, зависящем от частоты могут быть электрическое напряжение, ток, импеданс, а также и параметры, имеющие другую физическую природу (механические, гидравлические и др.). Обобщенное представление объектов в виде амплитудно-частотной характеристики позволяет обобщить и другую форму представления объектов – в виде электрических схем замещения. При этом необходимо привести в соответствие размерности соответствующих физических величин.

Функции системы распределения помимо управления и защиты могут быть расширены возможностью оценки состояния потребителей электроэнергии на основании измеренных значений напряжения и тока в режиме реального времени [70]. Но перед тем, как перейти к определению функциональных зависимостей между контролируемыми и измеряемыми параметрами, первоначально стоит задача по исходной АЧХ входного каскада блока питания синтезировать электрическую схему замещения, АЧХ которой совпадает с исходной. Исследование параметров входных цепей источников питания методом амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) показали, что изменение параметров реактивных элементов приводят к изменению резонансных частот [70, 125]. АЧХ входных каскадов ИВЭП имеют характерную форму, вид которой определяется полным входным импедансом схемы. Наличие явно выраженных резонансных точек позволит оценивать и в

перспективе прогнозировать состояния (отказы и изменение параметров) элементов электрической схемы [70]. Чтобы провести данное исследование, нужно получить электрическую схему замещения для исходной АЧХ и убедиться в том, что отклонение параметров цепи замещения вызовет такое же отклонение параметров реактивных элементов исходной цепи. Для этого требуется разработать методику синтеза электрических схем замещения на основе анализа амплитудно-частотных характеристик, а также оценить влияние параметров реактивных элементов этих схем на параметры частотной характеристики.

Требования к электрической цепи можно разделить на основные и дополнительные. Основные требования определяют целевое назначение синтезируемой цепи. Электрические свойства линейной цепи полностью описываются в частотной области – амплитудно- и фазо- частотными характеристиками [70].

Задача заключается в нахождении такой электрической схемы замещения, которая соответствует частотной характеристике, полученной экспериментальным путём для исследуемого потребителя электроэнергии.

В качестве критерия для синтеза электрической схемы замещения выбраны отклонение АЧХ ее входного импеданса от входного импеданса потребителя электрической энергии.

Таким образом ставится задача определения параметров (индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений) и структуры электрической схемы замещения по АЧХ входных импедансов контролируемого оборудования.

Некоторые параметры элементов схемы определяются с достаточно большой погрешностью что может заметно сказываться на отклонении полученной АЧХ от реальной. Речь пойдет об определении чувствительности определения контролируемых параметров к погрешности измерений.

Чувствительностью некоторой характеристики $F(x_i)$ к изменению некоторого параметра x_i называется предел отношения относительного изменения функции к относительному изменению параметра:

$$S_{x_i}^{F(x_i)} = \lim_{\Delta x_i/x_i} \frac{\Delta F(x_i)/F(x_i)}{\Delta x_i/x_i} = \frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} * \frac{x_i}{F(x_i)} \quad (2.13)$$

где:

x_i – i -й элемент (параметр) цепи;

$F(x_i)$ – характеристика, зависящая от этого элемента [135].

В решении задачи аппроксимации при синтезе цепей существуют ограничения на вид аппроксимирующих функций и должны контролироваться условиями физической реализуемости.

В качестве аппроксимирующей функции выбираем функцию искомой цепи $F(x)$. Аппроксимирующая функция зависит от некоторых параметров цепи. Решением задачи аппроксимации считается нахождение наилучших значений коэффициентов, при которых функция $F(x)$ будет наиболее «близка» к функции АЧХ ($\xi(x) = |H(j\omega)|^2$).

Существуют различные методы для решения задач аппроксимации. Рассмотрим более подробно метод наименьших квадратов, его основу составляет то, что при среднеквадратическом приближении наилучшая «близость» двух функций $F(x)$ и $\xi(x)$ достигается при выполнении следующего условия:

$$\Delta = \sum_{i=1}^M |F(x_i)\xi(x_i)|^2 \rightarrow \min_{\{a_1, a_2, \dots, a_N\}}$$

т.е. при таких значениях коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_N , при которых сумма квадратов отклонений $F(x)$ и $\xi(x)$ в точках X_1, X_2, \dots, X_M ($M > N$) является минимально возможной [35].

Следует сделать вывод о том, что по исследуемой АЧХ путем её аппроксимирования, можно получить искомые параметры элементов схемы с определенной погрешностью. Тем самым можно проследить чувствительность

изменения контролируемых параметров погрешности измерения, а следовательно, и погрешностей предлагаемого метода.

2.3 Исследование возможности контроля состояния оборудования по цепям питания в обесточенном состоянии

Параметры приемника электрической энергии определяются исходя из его состояния. Как уже указывалось ранее, в отключенном состоянии приемник можно квалифицировать с помощью его реакции на тестовый сигнал. Реакцией может быть ток или сопротивление.

В качестве примера рассмотрим частотную характеристику сопротивления импульсных источников тока, которые в настоящее время устанавливаются практически в любое оборудование, в качестве ИВЭП. Типовая схема входного узла импульсного источника питания показана на рисунке 2.7. Схема включает: варистор R1, который ограничивает величину перенапряжений со стороны сети; термистор R2, ограничивающий ток заряда конденсатора C8; элементы двухкаскадного фильтра помех выполнены на элементах C1-C8 и L1-L4 [70].

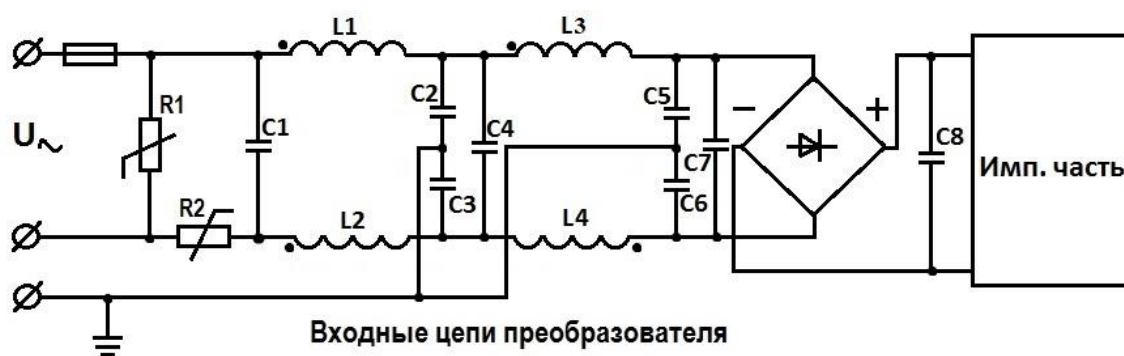


Рисунок 2.7. Входная цепь импульсного преобразователя напряжения [70]

График зависимости модуля сопротивления на входе схемы от частоты показан на рисунке 2.8 [70].

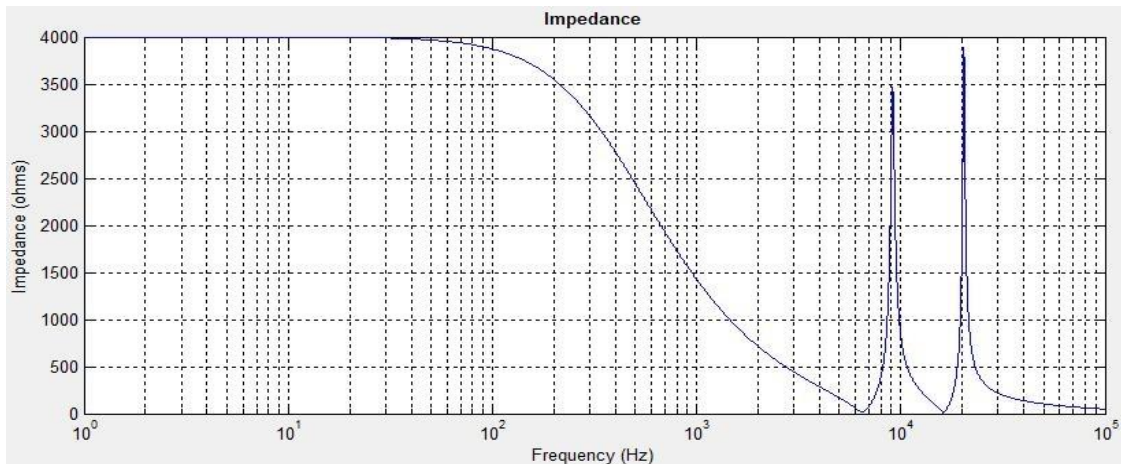


Рисунок 2.8. Зависимость модуля сопротивления от частоты для схемы рисунке 2.7 при номинальных значениях параметров [70]

Ограничения максимального значения сопротивления на уровне 4000 Ом обусловлен спецификой работы измерителя сопротивлений. Характеристическая строка данной схемы (рис. 2.9) имеет вид [70]:

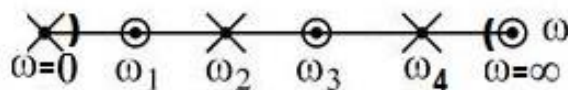


Рисунок 2.9. Характеристическая строка входной цепи преобразователя [70]

Двухполюсник относится к классу $(\infty - 0)$. Нули и полюсы характеристической строки равны: $\omega_1=4,1*10^4$ рад/с; $\omega_2=5,7*10^4$ рад/с; $\omega_3=10,2*10^4$ рад/с; $\omega_4=12,6*10^4$ рад/с, они характеризуют исправное состояние устройства и могут служить диагностическими признаками. При возникновении отказов, используя программное обеспечение Matlab Simulink, характеристическая строка будет меняться. На рисунках 2.10-2.16 показаны графики модуля сопротивления при наличии различных отказов в схеме [70].

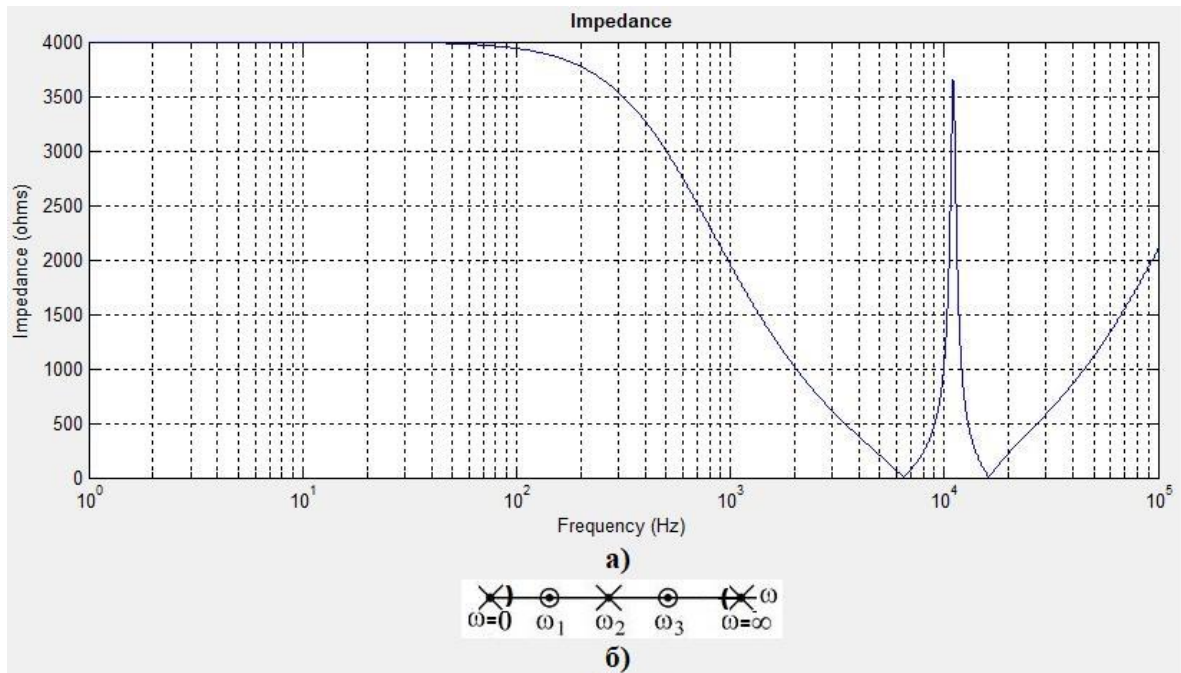


Рисунок 2.10: а) график полного сопротивления при обрыве $C1$; б) характеристическая строка [70]

Нули и полюсы характеристической строки: $\omega_1=4,1 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_2=6,9 \cdot 10^4$ рад/с; $\omega_3=10,2 \cdot 10^4$ рад/с, при этом она изменила свой класс ($\infty-\infty$) [70].

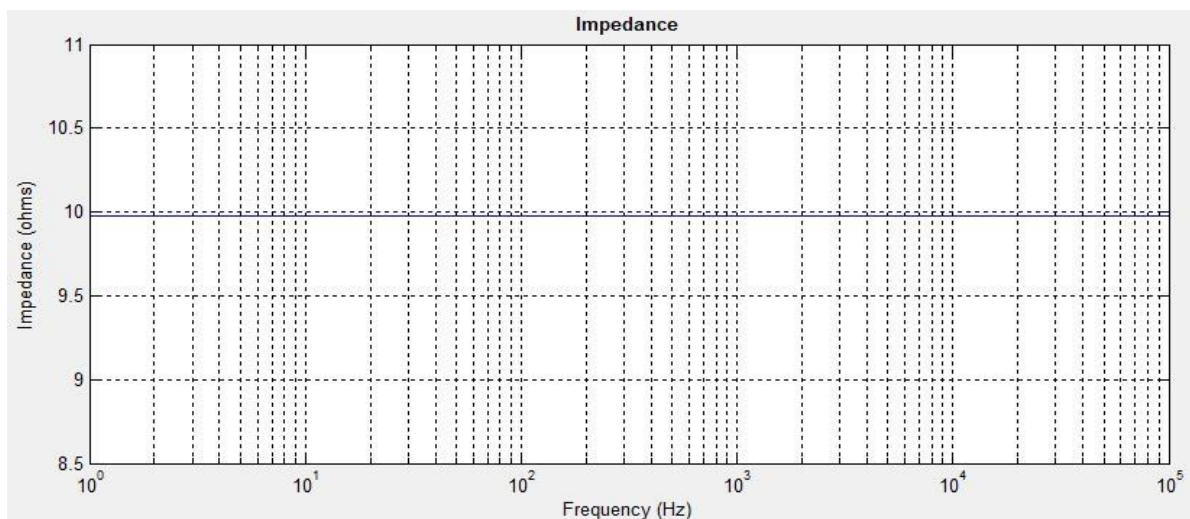


Рисунок 2.11. График полного сопротивления при кз $C1$ [70]

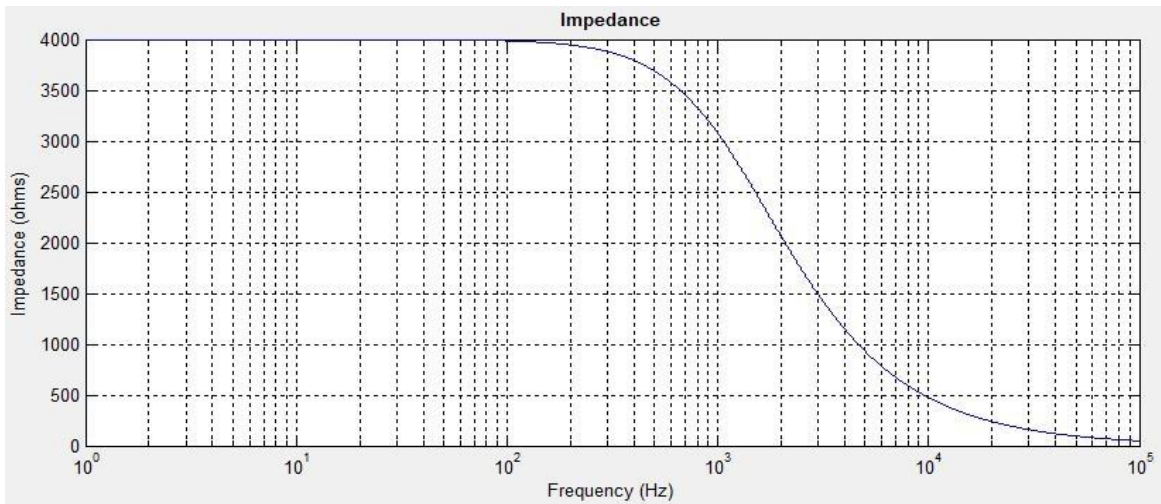


Рисунок 2.12. График полного сопротивления при обрыве обмотки L1 [70]

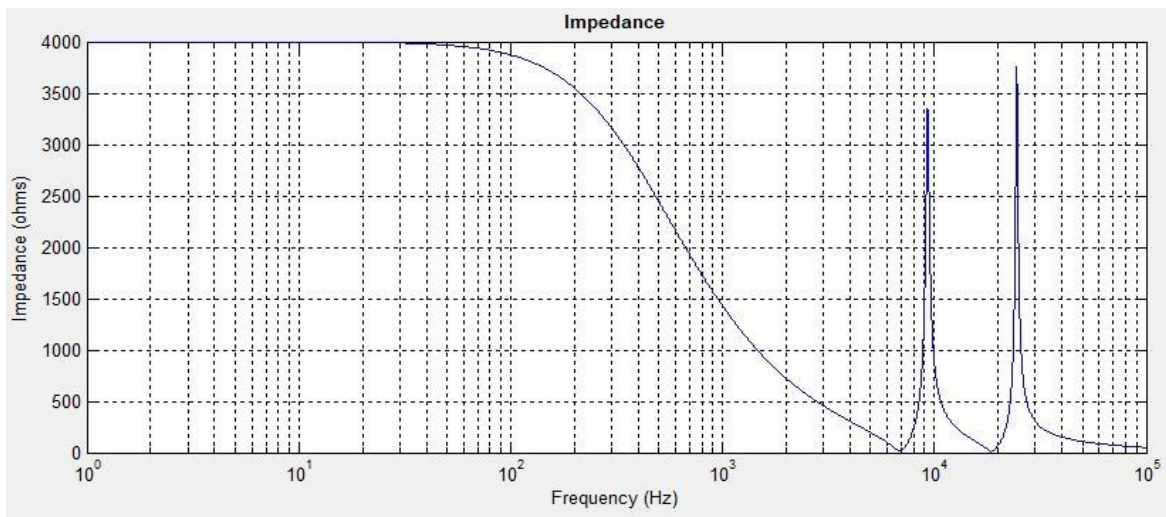


Рисунок 2.13. График полного сопротивления при кз обмотки L1 [70]

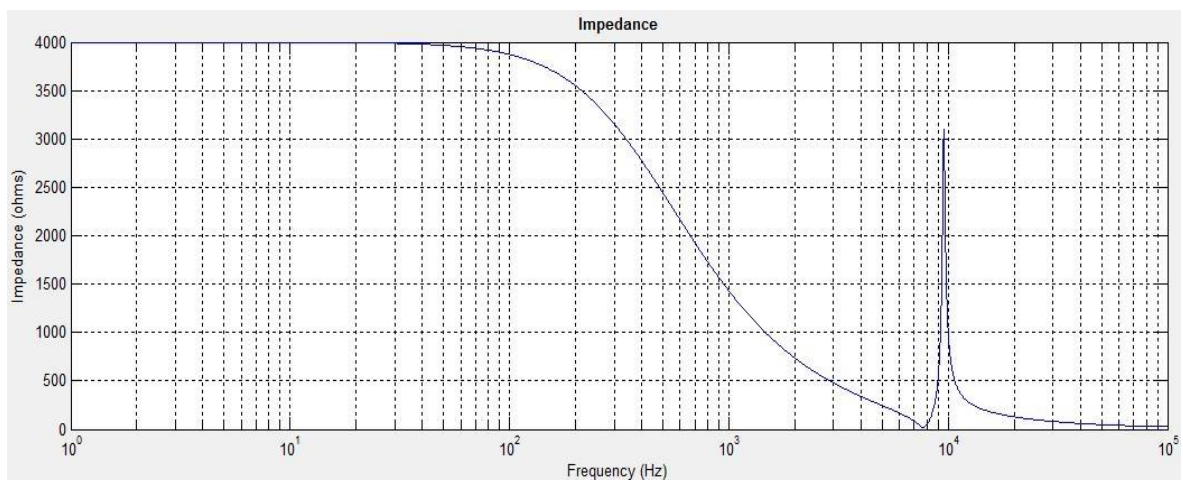


Рисунок 2.14. График полного сопротивления при кз обмоток L1, L2 [70]

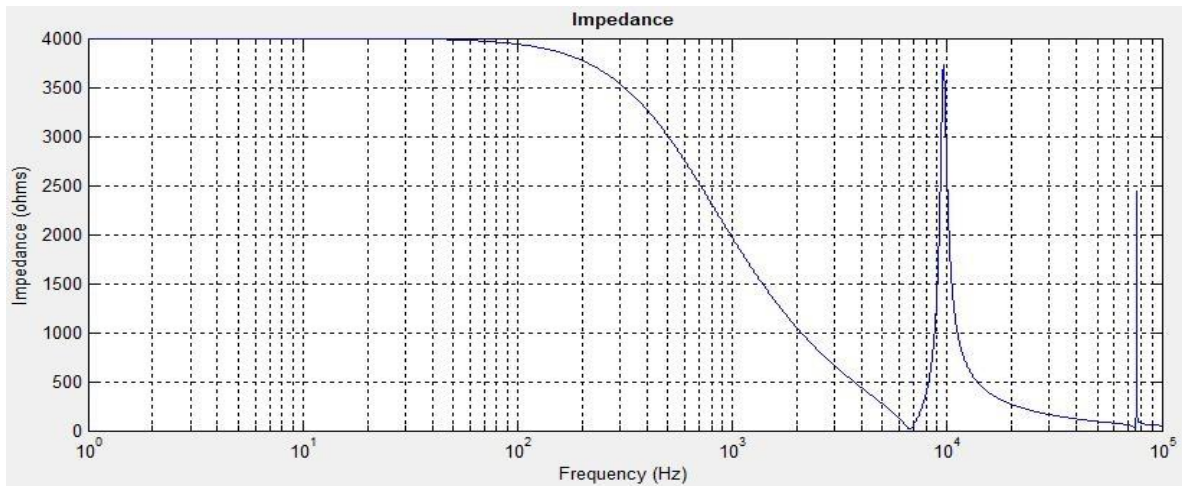


Рисунок 2.15. График полного сопротивления при обрыве С4 [70]

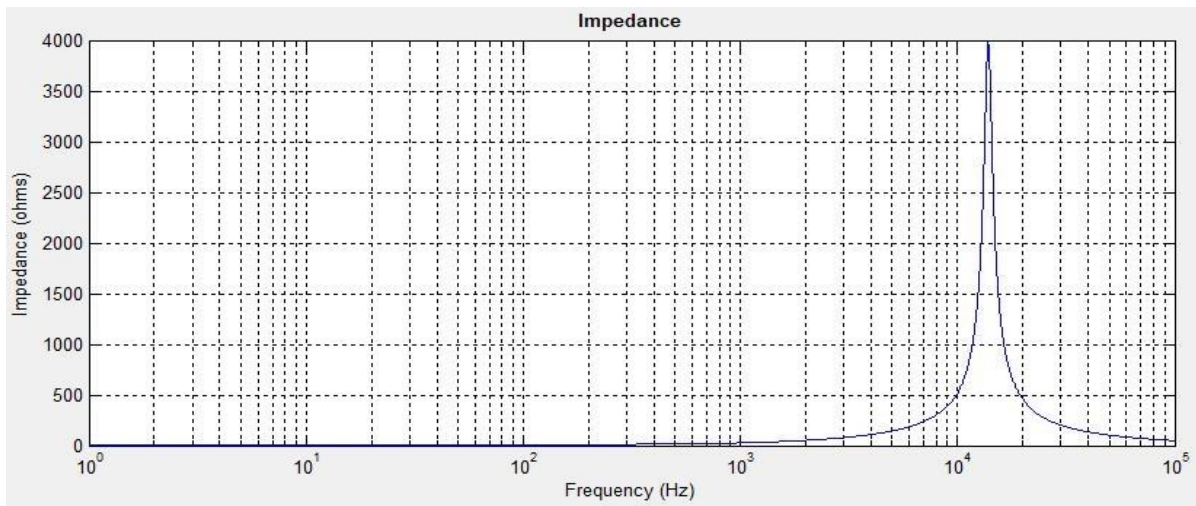


Рисунок 2.16. График полного сопротивления при кз С4 [70]

Приведенные графики показывают возможность контроля состояния различных элементов принципиальной схемы. Важно отметить, что введение различных отказов (обрыв, короткое замыкание) в схему после выпрямителя никак не изменяет график полного сопротивления.

Измерение полного сопротивления позволяет прогнозировать с определенной степенью точности постепенные отказы, характеризующиеся постепенным изменением параметров технического состояния и обусловленные износом или старением материала деталей или узлов электрооборудования. Отслеживаемыми параметрами прогнозирования являются изменения нулей и полюсов характеристической строки объекта в процессе периодического

контроля [70]. В таблицах 2.1 - 2.3 приведены значения частот параметрической строки при постепенной деградации емкостей С1, С4, С7 в диапазоне от 33нФ до 10 нФ [70].

Таблица 2.1 - Значения частот при деградации емкостей С1 [70]

С1, нФ	f1, Гц	f2, Гц	f3, Гц	f3, Гц
33	6500	9110	16220	20350
30	6500	9230	16220	20760
25	6500	9440	16220	21660
20	6500	9690	16220	22980
15	6500	9970	16220	25070
10	6500	10290	16220	28860

Таблица 2.2 - Значения частот при деградации емкостей С4 [70]

С4, нФ	f1, Гц	f2, Гц	f3, Гц	f3, Гц
33	6500	9110	16220	20350
30	6500	9150	16910	20890
25	6550	9220	18330	22050
20	6590	9290	20240	23640
15	6620	9360	22980	26000
10	6650	9450	27400	29950

Таблица 2.3 - Значения частот при деградации емкостей С7 [70]

С7, нФ	f1, Гц	f2, Гц	f3, Гц	f3, Гц
33	6500	9110	16220	20350
30	6760	9350	16280	20360
25	7290	9940	16420	20400
20	7970	10680	16640	20460
15	8860	11740	17040	20570
10	10050	13400	17870	20800

Выделенные фрагменты таблиц, характеризуются наибольшими изменениями нулей и полюсов в характеристических строках и хорошо фиксируют отклонения соответствующих параметров.

Другим типовым приемником электрической энергии на самолете является электрический двигатель. С точки зрения схемы замещения в

обесточенном состоянии двигателя можно разделить на двигатели с электронным коммутатором и двигатели непосредственного подключения к электрической сети. Первый тип двигателей, как правило, имеет на входе электрический фильтр и выпрямитель, подобный ранее рассмотренной схеме, поэтому характеристики будут подобны характеристикам схемы рисунке 2.7.

Второй тип двигателей в обесточенном состоянии имеет схему замещения соответствующей активно индуктивной нагрузки. Рассмотрим характеристику $Z(\omega)$ двигателя постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения, рисунке 2.17 [70].

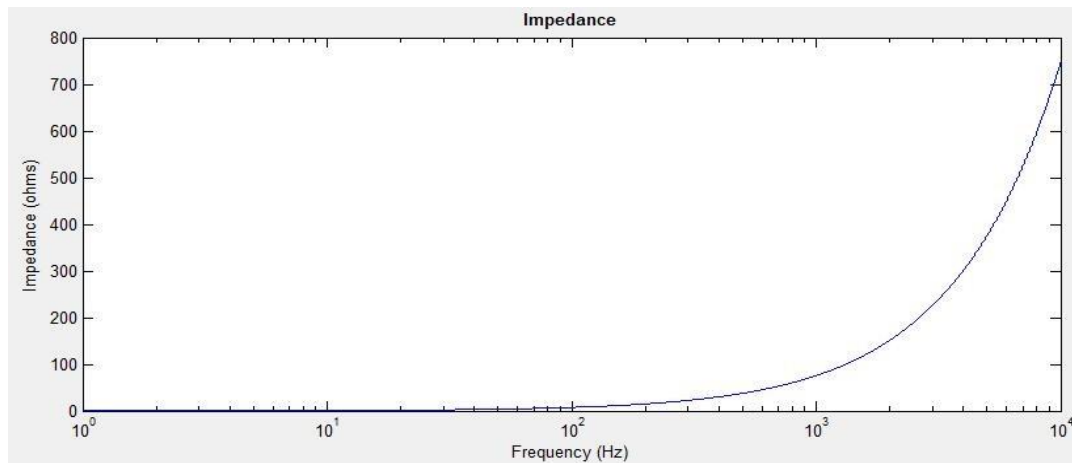


Рисунок 2.17. Модуль полного сопротивления двигателя постоянного тока параллельного возбуждения [70]

Для такого двигателя характерны следующие отказы в электрических цепях: обрыв в цепи якоря (рис. 2.18), обрыв в цепи обмотки возбуждения, короткое замыкание на зажимах машины [70].

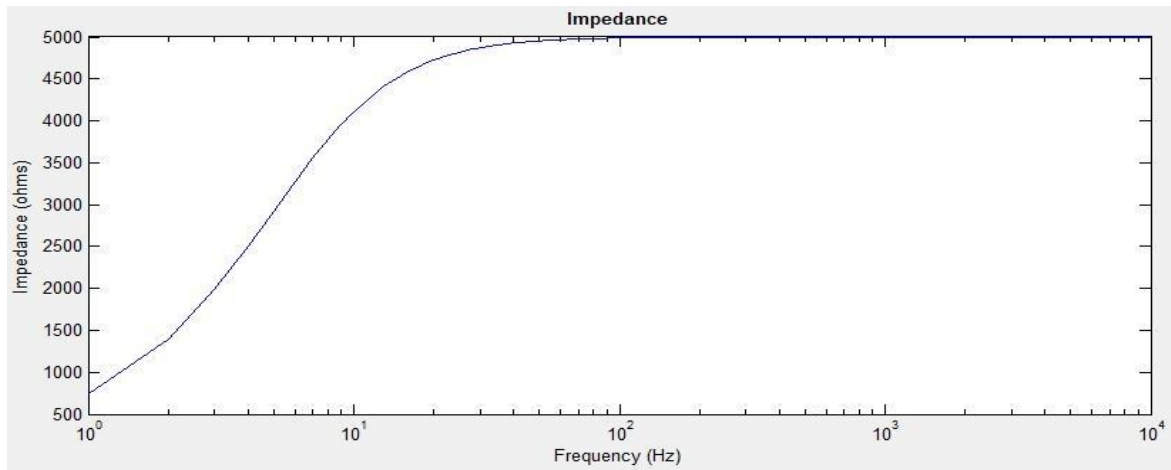


Рисунок 2.18. Обрыв в цепи якоря (ограничения 5000 Ом, обусловлены методикой измерения) [70]

Характеристике на рисунке 2.18 будут также соответствовать двигатели переменного тока. Для рассматриваемых типов двигательная нагрузка соответствует классу $(0-\infty)$. Характеристика сопротивления двигателя при обрыве обмотки возбуждения практически совпадает с рисунком 2.18, так как низкое сопротивление якоря сильно шунтирует входную цепь машины. При коротком замыкании на клеммах машины двигатель переходит в класс нагрузок $(0-0)$ [70].

Таким образом, метод полного сопротивления так же позволяет определять основные отказы двигателей, как постоянного, так и переменного тока [70].

2.4 Экспериментальные исследования возможности контроля приемников электроэнергии по амплитудно-частотным характеристикам на примере преобразователей AC-DC, DC-DC

Из вышеизложенного следует, что ЛЦУН могут проводить контроль состояния оборудования и его линии питания, как в отключенном режиме, так и

под нагрузкой. Хотя контроль в отключенном состоянии не обладает большой информативностью, но у него есть преимущество, обусловленное отсутствием помех со стороны системы электроснабжения на процедуру контроля. Наличие датчика тока в электронном ключе ЛЦУН позволяет вести контроль состояния объекта во включенном состоянии по его току [72].

Для подтверждения теоретических обоснований возможности диагностирования состояния потребителей электроэнергии были проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик АС-DC преобразователя ИРБИС ИП1600-24 (рис. 2.19) и преобразователя DC-DC МДМ320-1М27ТУП БКЮС.436437.004 ТУ производства ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания» (рис. 2.20) [70].



Рисунок 2.19. Преобразователь ИП1600-24 ИРБИС

Преобразователи серии ИП1600-24 ИРБИС предназначены для применения в промышленности, обладают высокой удельной мощностью и допускают широкий диапазон изменения входного напряжения. Преобразователи оснащены защитами от перегрузок и коротких замыканий на

выходе, а также защитой от перенапряжений на входе. Они обеспечивают регулировку выходного напряжения и обладают хорошими показателями электромагнитной совместимости.



Рисунок 2.20. Источника питания МДМ320-1М27ТУП БКЮС.436437.004 ТУ

Низкопрофильные изолированные DC/DC модули электропитания серии МИРАЖ-МП предназначены для жестких условий эксплуатации в технике специального и промышленного назначения.

Отличительной особенностью модулей является возможность параллельной работы с выравниванием токов, открывающая перспективы для наращивания мощности и резервирования. Модули выполнены на современной элементной базе. Применение модулей особенно удобно при построении высокоэффективной системы распределенного электропитания для потребителей, имеющих или самостоятельно реализующих в аппаратуре входной выпрямитель сети и входной фильтр – сетевой конденсатор. Полный комплекс защит и дистанционное управление обеспечивает удобство эксплуатации [70].

Основные характеристики блоков приведены в таблице 2.4 [70].

Таблица 2.4 - Основные характеристики блоков питания [70]

Параметры	Модель блока	
	ИП 1600-24	МДМ320-1М27ТУП
1. Номинальная мощность, Вт	1600	320
2. Входное напряжения (АС, DC), В (частота f, Гц)	85-297, (АС), (f=47-63)	175-350 (DC)
3. Номинальное выходное напряжение (DC), В	27,4	27
4. КПД	0,98	0,80
5. Максимальный ток нагрузки, А	50	11,9

В данном разделе приводятся результаты практических измерений АЧХ двух импульсных блоков питания.

Измерения АЧХ проводились по схеме на рисунке 2.21.

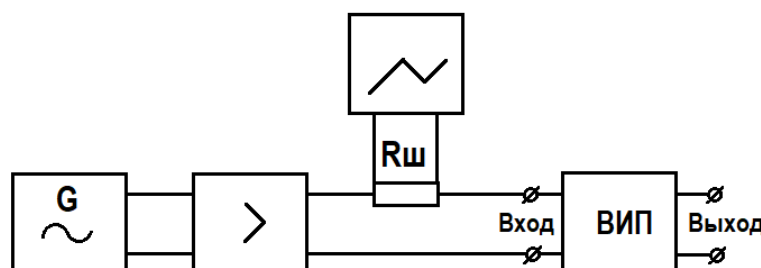


Рисунок 2.21 Схема измерения АЧХ вторичного источника питания

В качестве генератора сигналов регулируемой частоты использовался генератор низких частот (G) с верхним пределом по частоте – 1МГц. Входное сопротивление двухполюсника ИВЭП на «нулях» весьма мало, порядка 1 Ома. Выходное сопротивление генератора 50 Ом, поэтому для согласования сопротивлений ИВЭП и генератора между ними включен усилитель мощности. В качестве усилителя мощности использовался эмиттерный повторитель с током покоя порядка 100 мА. С помощью осциллографа измерялось падение

напряжения ($U_{ш}$) на сопротивлении шунта, $R_{ш}$. В результате, на осциллографе фиксировалась величина обратная внутреннему сопротивлению ВИП.

Для устранения искажения синусоидального сигнала напряжение на генераторе ограничивалось уровнем 500 мВ, сопротивление шунта порядка 2 Ом. Таким образом, параметры измерительной схемы ограничивают размах измеряемого тока, но не влияют на расположение нулей и полюсов ВИП. Результаты измерений АЧХ блоков приведены на рисунке 2.22 и рисунке 2.23 [70].

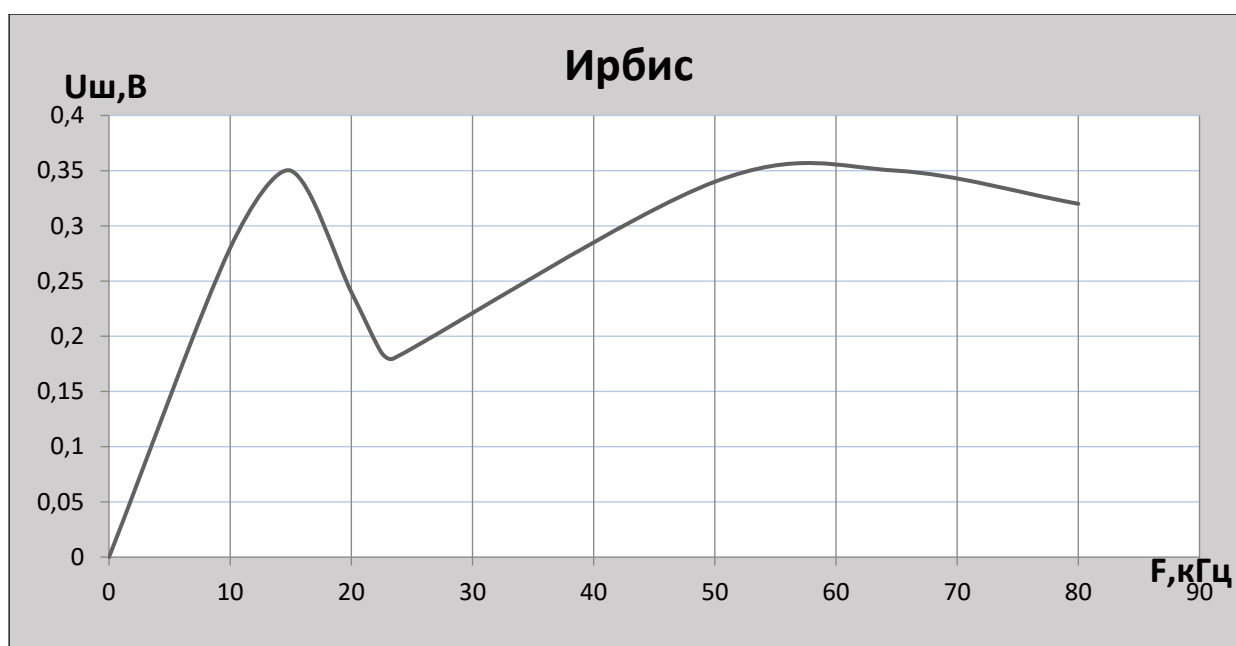


Рисунок 2.22. АЧХ блока ИП 1600 -24 при номинальных значениях параметров входного фильтра [70]

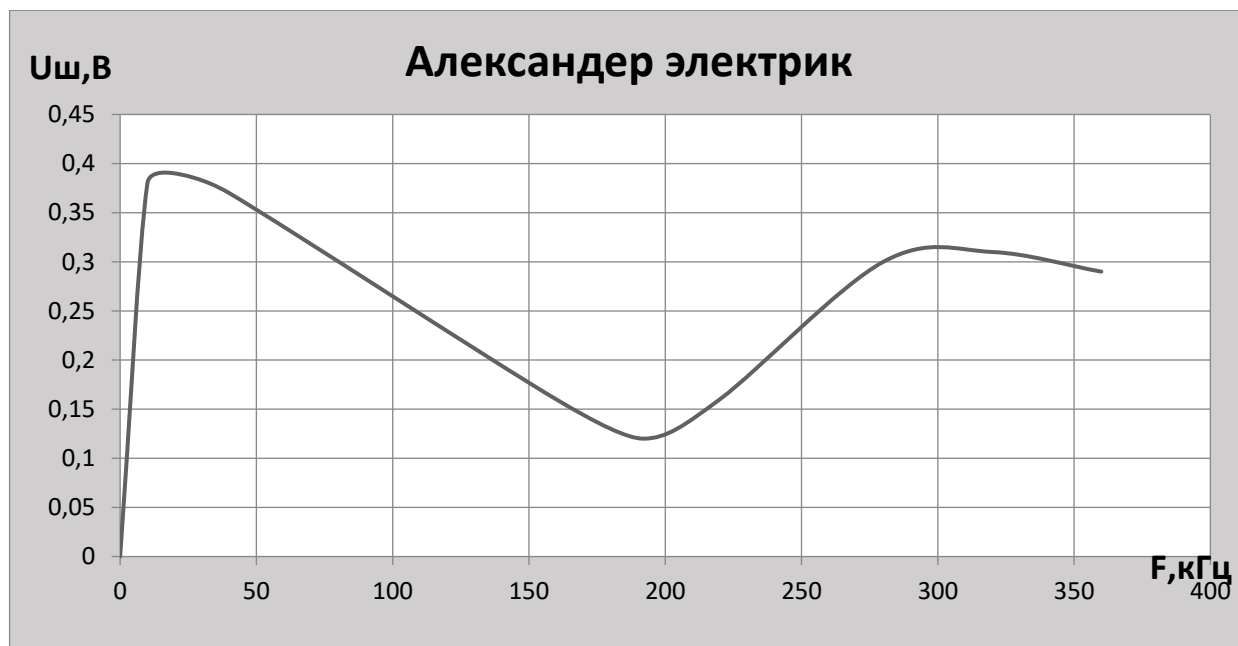


Рисунок 2.23. АЧХ блока МДМ320-1М27ТУП при номинальных значениях параметров входного фильтра [70]

Приведенные графики показывают, что АЧХ входных каскадов ВИП имеют характерную форму, вид которой определяется полным входным импедансом схемы. Наличие явно выраженных резонансных точек позволяет оценить и в перспективе прогнозировать состояния (отказы и изменение параметров) элементов электрической схемы [70].

На следующем этапе экспериментальных исследований проводилось математическое моделирование в среде MatLab Simulink, имитирующее влияние различных отказов на АЧХ входного каскада ВИП (значения входного импеданса блока) блока ИП 1600 - 24.

Для моделирования импеданса Z были использованы параметры фильтра, указанные на рисунке 2.24 и задан коэффициент связи (K_c) между обмотками равным 0,9. Индуктивности $L1$ намотаны на общем тороидальном сердечнике и имеют коэффициент связи между обмотками близкий к единице, аналогично намотаны индуктивности $L2$ [70].

Составлена принципиальная схема и определены значения параметров схемы, рисунке 2.24.

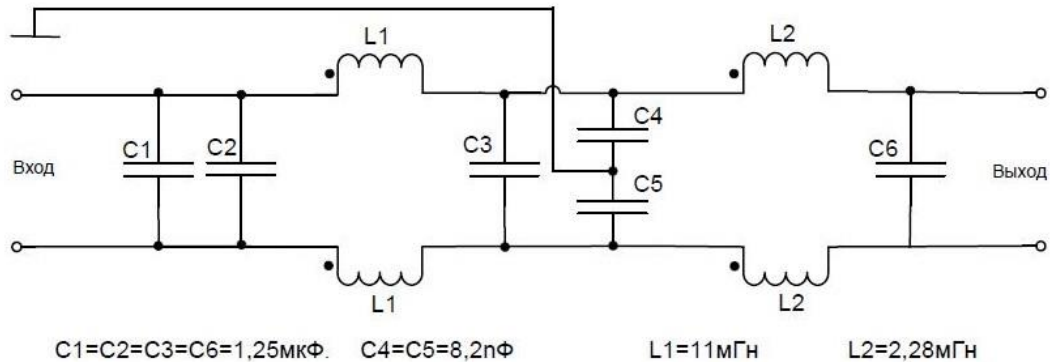


Рисунок 2.24. Принципиальная схема входного фильтра ИП 1600-24

Для имитации отказов и изменения параметров фильтра изготовлен испытательный пульт, который подключен к блоку ИП 1600-24, работа которого в математической модели реализована в виде логических функций [70]. Принципиальная схема подключения пульта показаны на рисунке 2.25.

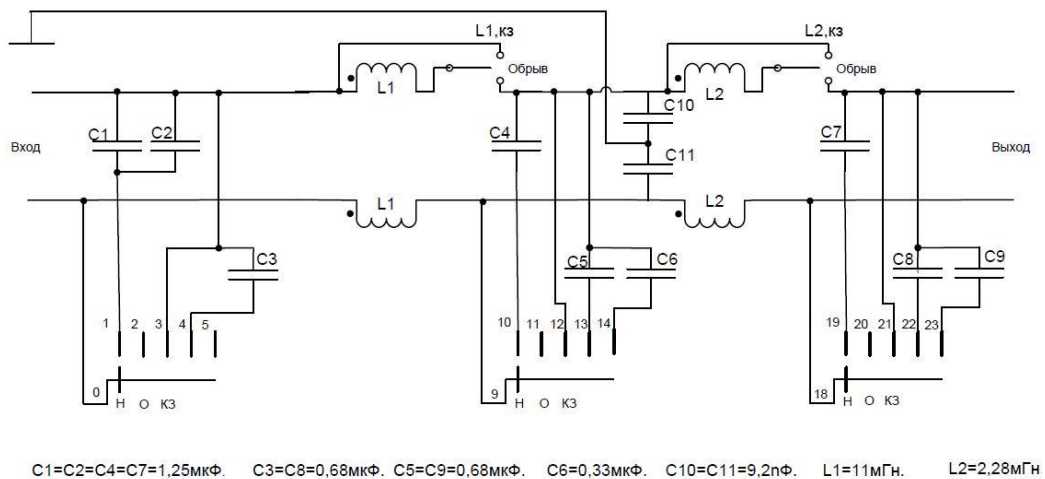


Рисунок 2.25. Принципиальная схема подключения пульта к ИП 1600 -24

Для наглядности расположения нулей и полюсов на частотной оси входное сопротивление блока при моделировании ограничивалось 20 Омами. График зависимости показан на рисунке 2.26.

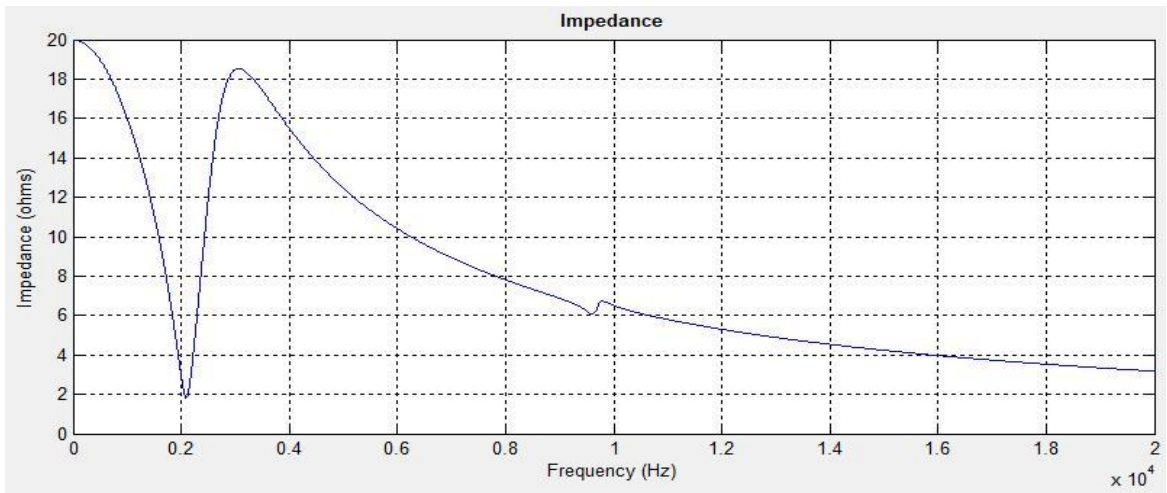


Рисунок 2.26. Зависимость входного импеданса блока ИП 1600-24 для коэффициента связи $K_c=0.9$

Полученная зависимость сильно отличается по расположению нулей и полюсов от экспериментальных данных на рис. 2.22, что связано с выбранным значением K_c . Влияние K_c на АЧХ фильтра показаны так же на рисунке 2.27 и на рисунке 2.28, где K_c соответственно равны 0,99 и 0.9983.

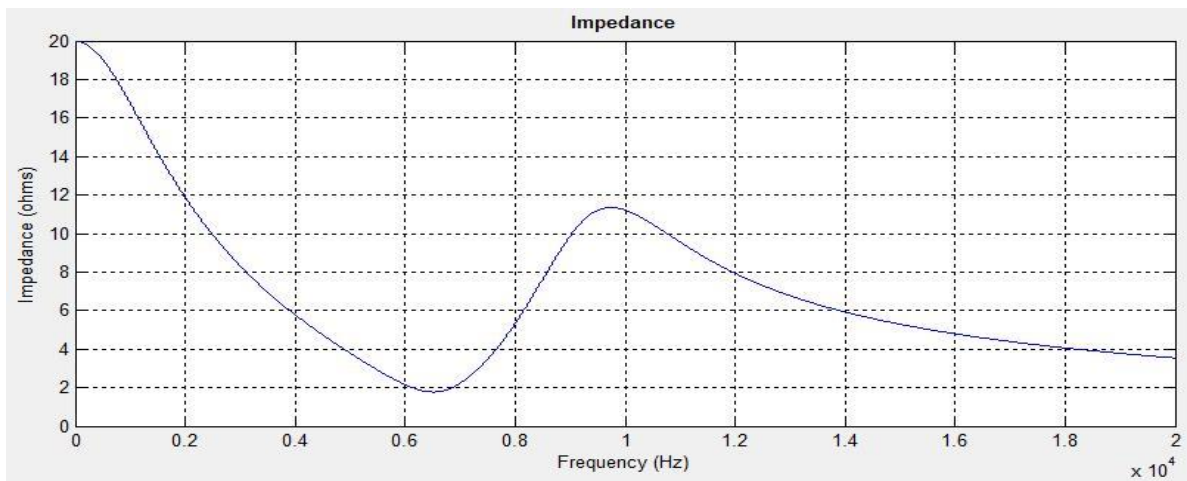


Рисунок 2.27. Зависимость входного импеданса блока ИП 1600-24 для коэффициента связи $K_c=0,99$

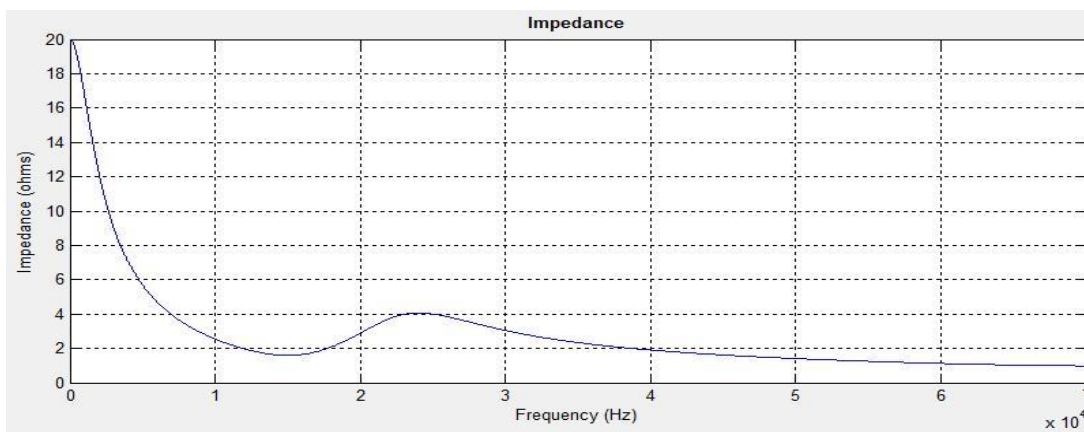


Рисунок 2.28. Зависимость входного импеданса блока ИП 1600-24 для коэффициента связи $K_c=0,9983$

Как видно из результатов моделирования, коэффициент связи очень сильно влияет на АЧХ. Для получения процессов, подобных реальным, погрешность определения коэффициента связи не должна превышать 0,1%, что довольно затруднительно обеспечить.

Характеристика, показанная на рисунке 2.28 хорошо коррелируется с экспериментальными данными и поэтому значение $K_c=0,9983$ использовалось при моделировании для исследований отказов элементов фильтра. На рисунках 2.29–2.32 показаны некоторые результаты моделирования блока ИП 1600-24, полученные характеристики близки к результатам экспериментальных исследований.

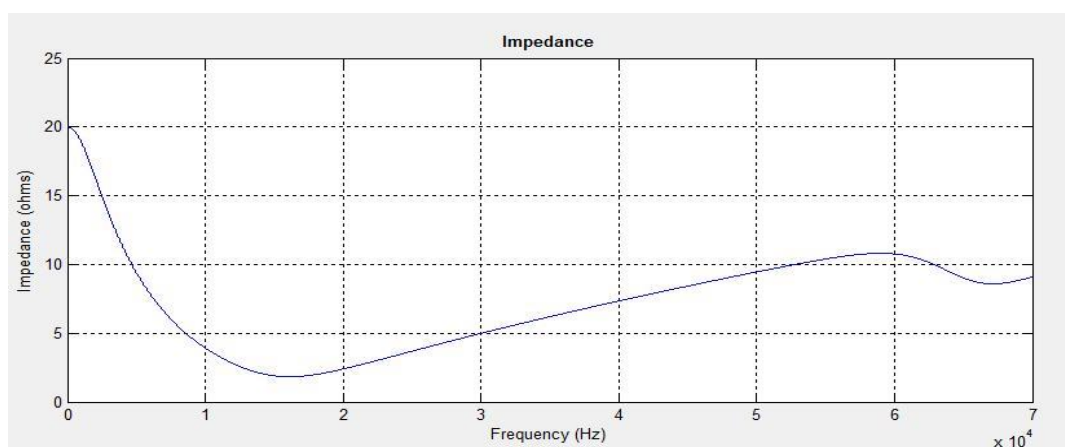


Рисунок 2.29. Зависимость импеданса Z блока ИП 1600-24 от частоты для одновременного обрыва конденсаторов C_1 и C_2

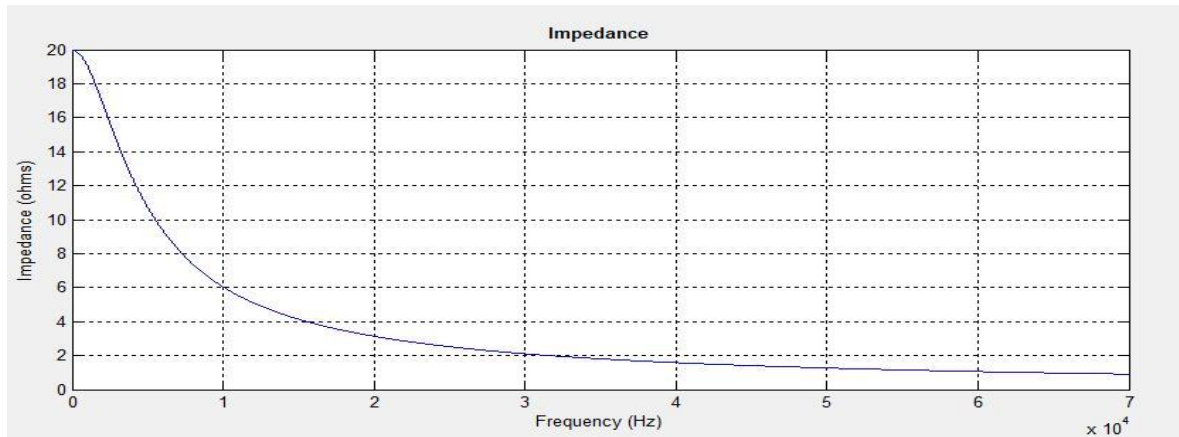


Рисунок 2.30. Зависимость импеданса Z блока ИП 1600-24 от частоты при обрыве $L1$

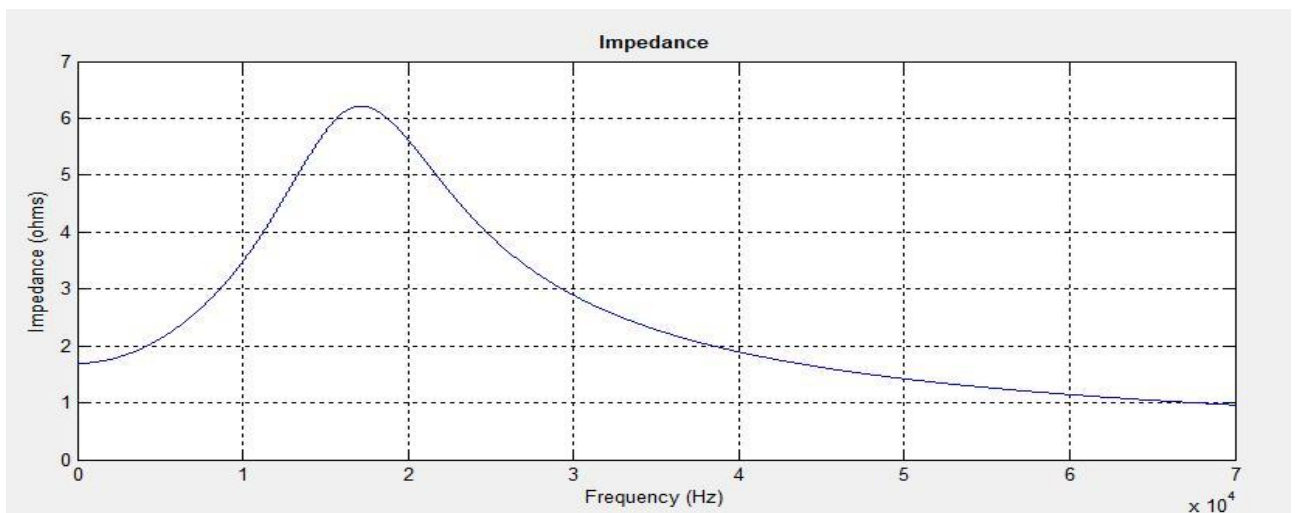


Рисунок 2.31. Зависимость импеданса Z блока ИП 1600-24 от частоты при коротком замыкании $C4$

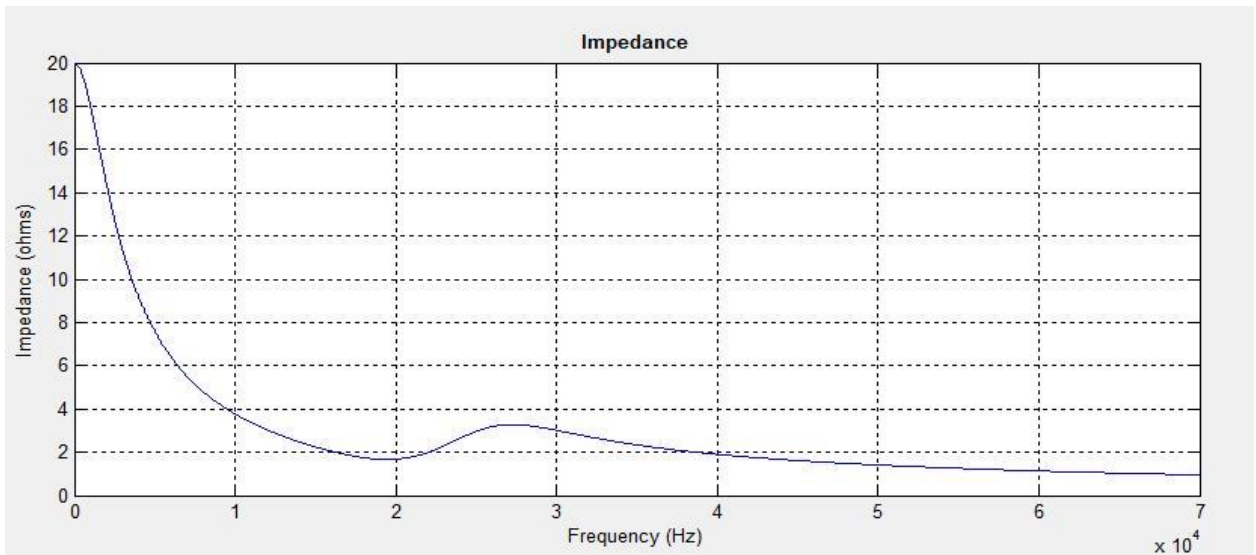


Рисунок 2.32. Зависимость импеданса Z блока ИП 1600-24 от частоты при обрыве $C4$

Результаты моделирования показали, что существует характерная зависимость входного импеданса ВИП от частоты входного сигнала, который в режиме диагностирования может подаваться из локальных центров управления нагрузками на его вход. Имея полученную АЧХ и сравнивая её с эталонной, можно регулярно отслеживать изменения состояния ВИП, в том числе плавные (от старения и износа элементов) и скачкообразные (при отказах типа «короткое замыкание» и «обрыв»).

Для подтверждения достоверности полученных при моделировании результатов проведено физическое моделирование отказов и процессов старения элементов ВИП.

На рисунках 2.33 – 2.42 показаны АЧХ блока ИП 1600 – 24 при введении отказов и отклонении параметров от своих номинальных значений. Номиналы указаны для схемы на рисунке 2.24. По оси ординат отложены напряжения на РШ, по оси абсцисс – частота генератора G .

Из графика (рис. 2.33) видно, что обрыв конденсаторов $C1$ и $C2$ приводит к изменению резонансных частот на АЧХ. В том случае, если ёмкости конденсаторов существенно уменьшились (рис. 2.34), например, вследствие

старения, то характер АЧХ в целом не изменится, а значения резонансных частот изменяются.

Аналогичные экспериментальные исследования (рис. 2.35 – 2.40) при обрывах, коротких замыканиях и изменения параметров конденсаторов C_4 и C_7 , показывают, что все состояния, связанные с изменениями параметром этих элементов, также напрямую влияют на форму АЧХ, в том числе на значения резонансных частот и амплитуды.

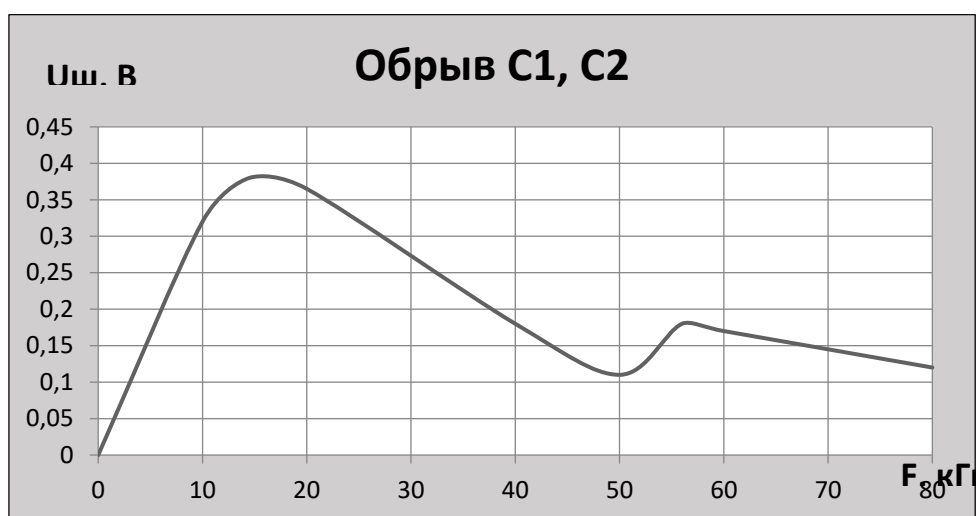


Рисунок 2.33. АЧХ блока ИП 1600-24 при одновременном обрыве конденсаторов C_1 и C_2 [70]

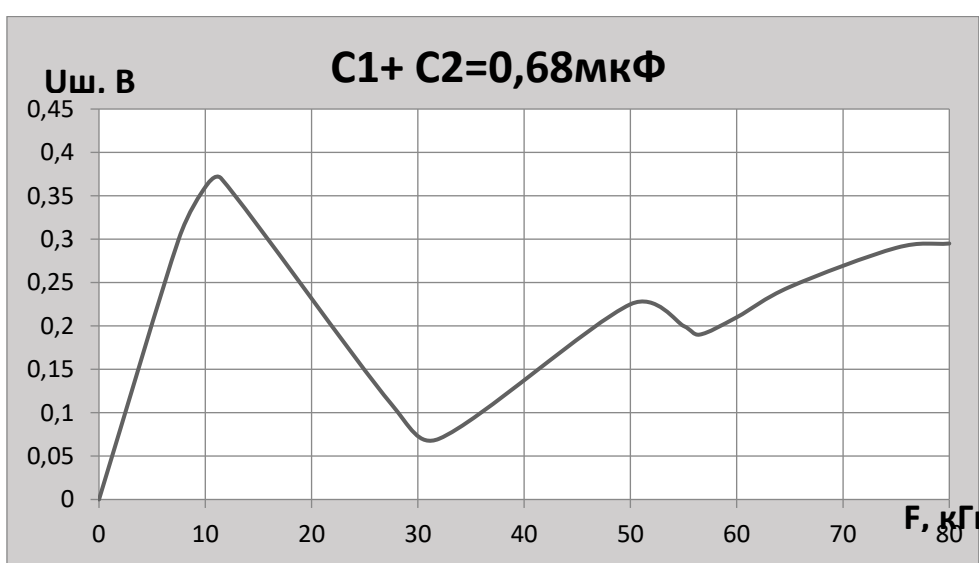


Рисунок 2.34. АЧХ блока ИП 1600-24 при уменьшении ёмкости конденсаторов C_1, C_2 в 4 раза [70]

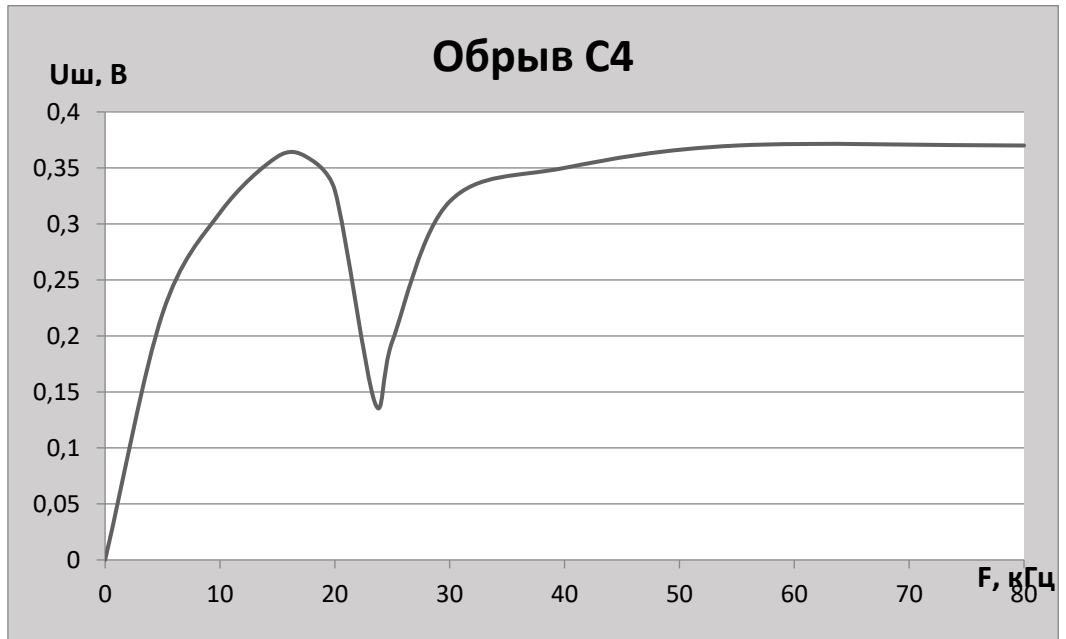


Рисунок 2.35. АЧХ блока ИП 1600-24 при обрыве конденсатора С4 [70]

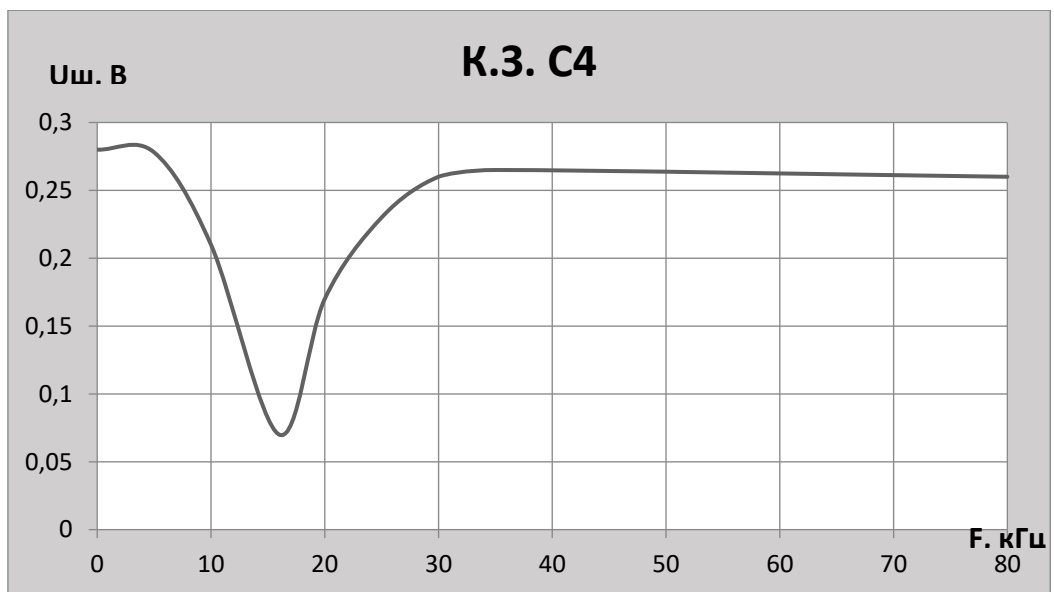


Рисунок 2.36. АЧХ блока ИП 1600-24 при коротком замыкании конденсатора С4 [70]

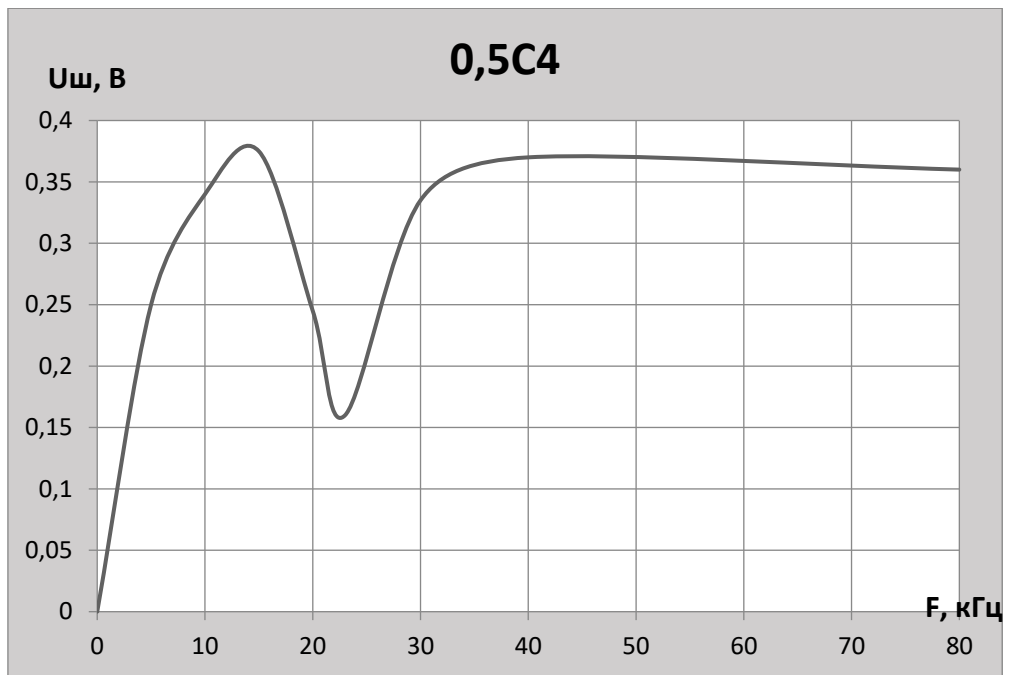


Рисунок 2.37. АЧХ блока ИП 1600-24 при уменьшении ёмкости конденсатора C4 в два раза [70]

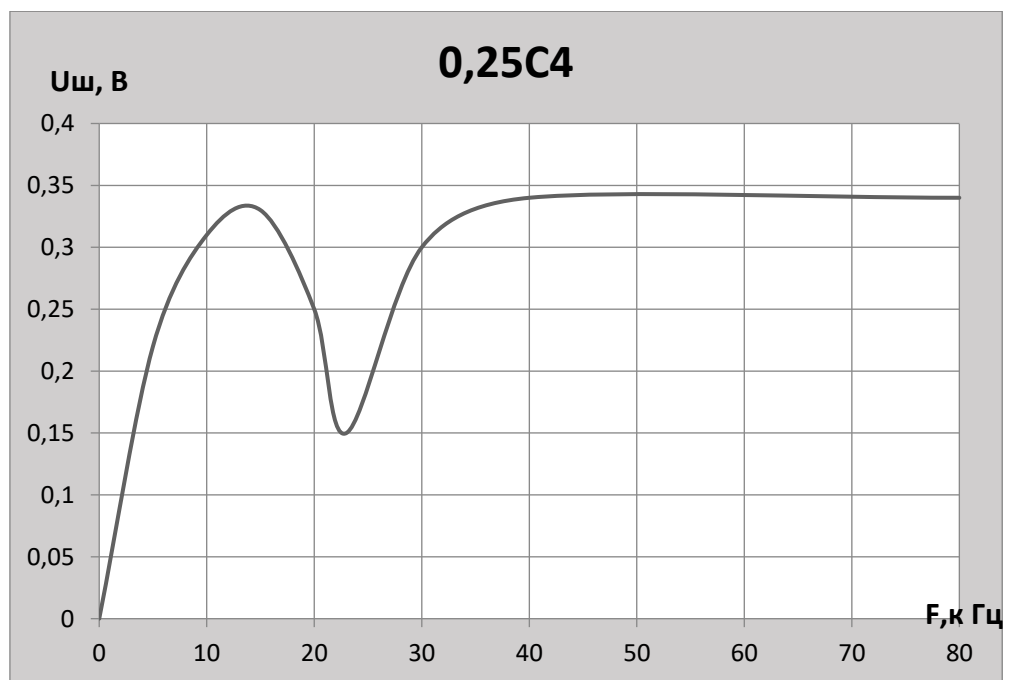


Рисунок 2.38. АЧХ блока ИП 1600-24 при уменьшении ёмкости конденсатора C4 в 4 раза [70]

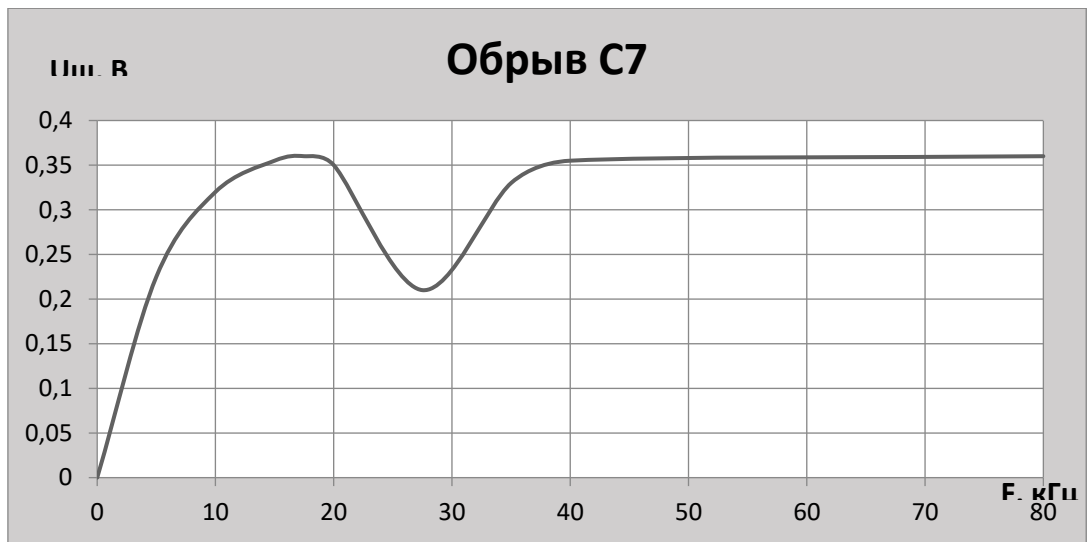


Рисунок 2.39. АЧХ блока ИП 1600-24 при обрыве конденсатора С7 [70]



Рисунок 2.40. АЧХ блока ИП 1600-24 при коротком замыкании конденсатора С7 [70]

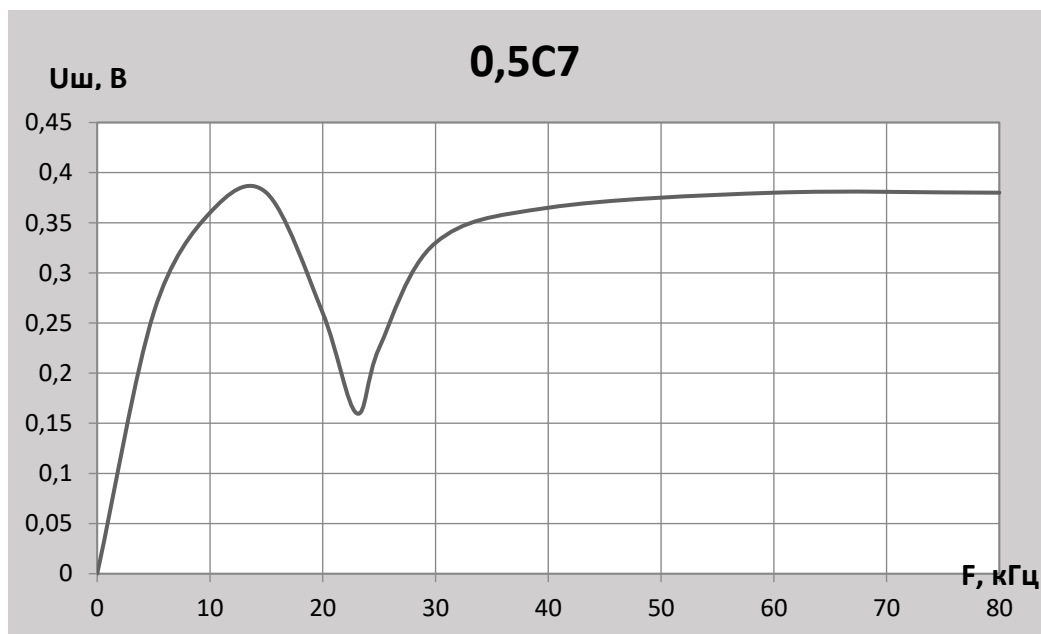


Рисунок 2.41. АЧХ блока ИП 1600-24 при уменьшении ёмкости конденсатора С7 в 2 раза [70]

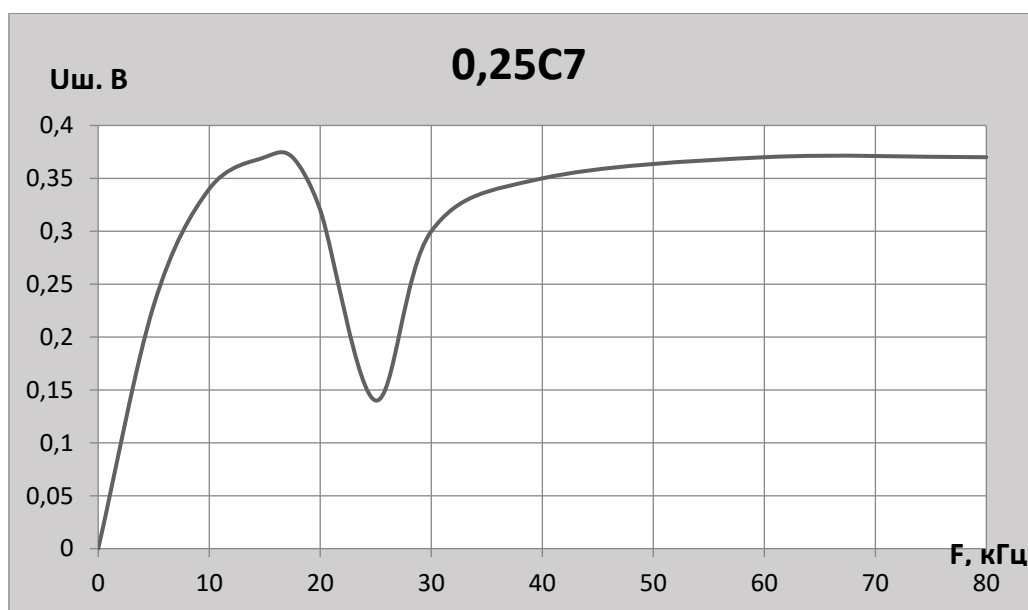


Рисунок 2.42. АЧХ блока ИП 1600-24 при снижении ёмкости конденсатора С7 в 4 раза [70]

Следует отметить, что глубина контроля данного метода ограничена выпрямительным мостом [70].

Аналогичные выводы можно сделать и на основе экспериментальных исследований при обрывах индуктивных элементов входных каскадов

приёмников электроэнергии (рис. 2.43, 2.44). Повышение уровня частот преобразования электроэнергии в связи с улучшением магнитных и электрических свойств магнитопроводов дросселей и трансформаторов ужесточает требования к стабильности характеристик этих элементов. Поэтому оценка их состояния не менее важна, чем оценка состояния емкостных фильтров.

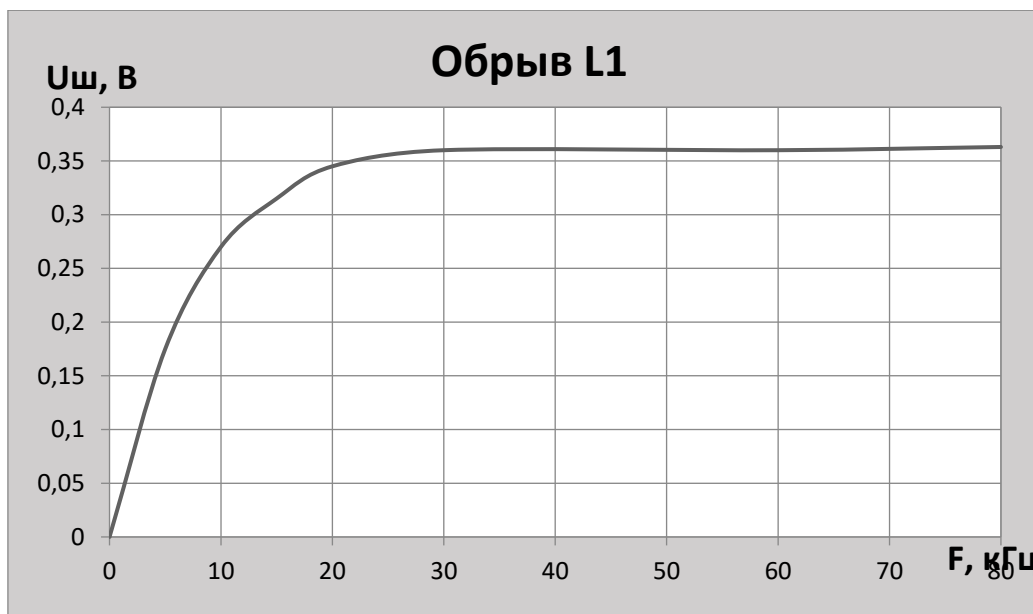


Рисунок 2.43. АЧХ блока ИП 1600-24 при обрыве верхней индуктивности L1

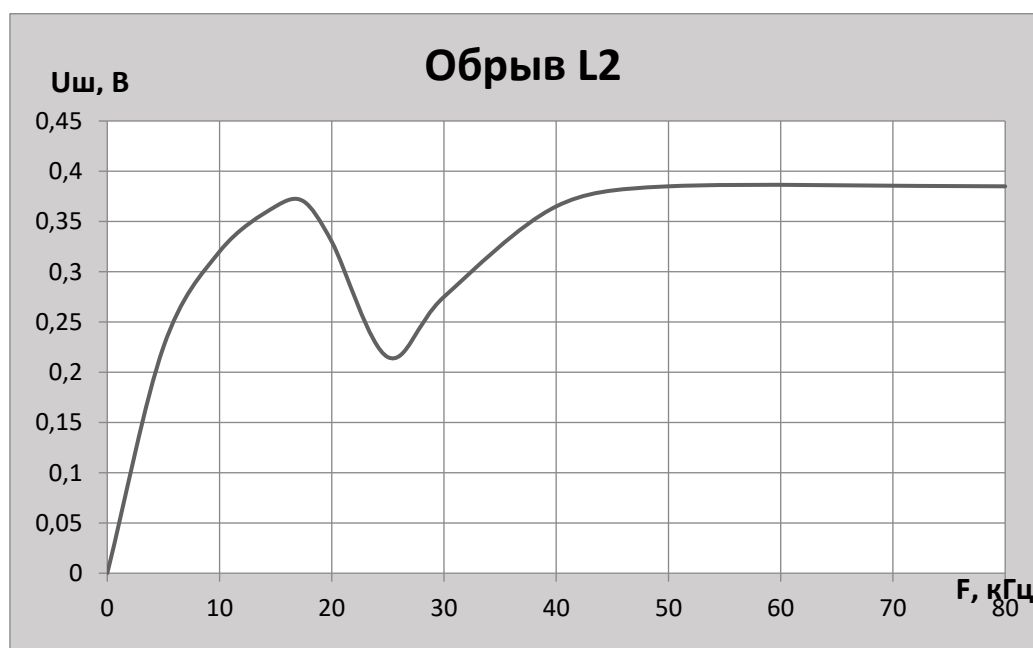


Рисунок 2.44. АЧХ блока ИП 1600-24 при обрыве индуктивности L2

Выводы по 2 главе:

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик позволяет диагностировать с определенной степенью точности постепенные отказы, характеризующиеся постепенным изменением параметров технического состояния и обусловленные износом или старением материала деталей или узлов электрооборудования. Отслеживаемыми параметрами диагностирования являются изменения полюсов характеристической строки объекта в процессе периодического контроля.

2. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о возможности диагностирования состояния входных каскадов потребителей со стороны системы распределения электроэнергии.

3. Полученные экспериментально результаты коррелируются с результатами математического моделирования, что подтверждает адекватность выбранных в работе моделей.

4. Реализация алгоритмов контроля и диагностики технического состояния на основе частотного подхода связана с необходимостью воздействия синусоидального сигнала в заданном диапазоне частот и может быть реализовано путем введения в ЛЦУН дополнительного аппаратного и программного обеспечения, то есть полной переработки схмотехнических и функциональных решений.

Глава 3. Метод диагностирования технического состояния параметров цепей питания вторичных источников питания в интеллектуальных системах распределения электроэнергии

3.1 Синтез электрических схем замещения авиационного оборудования, построенных на основе амплитудно-частотных характеристик

Проведенные на первом этапе исследования показали, что изменение свойств реактивных элементов, которые влияют на работоспособность приемников электроэнергии, можно диагностировать по изменению АЧХ входных импедансов. Однако получение на борту ВС АЧХ сопряжено с необходимостью перепроектировать все устройства системы распределения электроэнергии, добавляя дополнительные элементы (генераторы синусоидальных сигналов, коммутаторы и т.п.), что может привести к снижению надежности системы в целом.

Поэтому в работе предложен «пассивный» метод диагностирования приемников энергии – путем определения параметров реактивных элементов по переходным процессам при подключении оборудования к бортовой электрической сети.

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.

Электрические схемы входных каскадов конкретного оборудования как правило неизвестны, поэтому математическую модель каждого приемника электрической энергии получить не представляется возможным.

Предложено использовать эквивалентные электрические схемы замещения. Эквивалентность электрической схемы замещения определяется эквивалентностью соответствующих АЧХ объекта и АЧХ схемы замещения.

В связи с этим возникает задача получения эквивалентных электрических схем замещения приемников электроэнергии.

Определение параметров эквивалентных электрических схем замещения состоит из нескольких этапов на земле и в полёте (рис. 3.1).

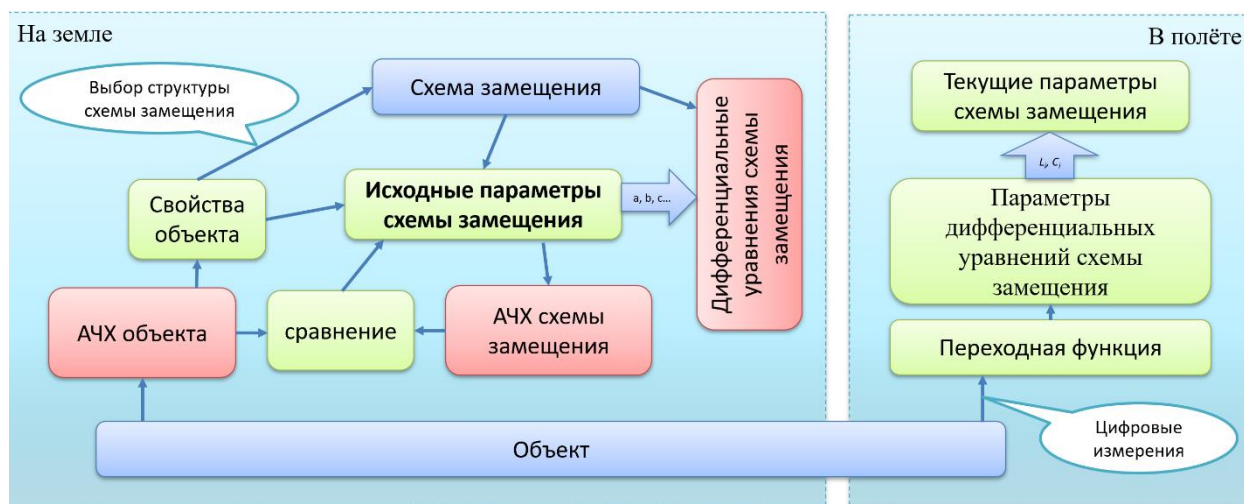


Рисунок 3.1. Методика определения параметров эквивалентных электрических схем замещения

На земле:

1. Снятие АЧХ нового (исправного объекта).
2. По АЧХ объекта выбор структуры электрической схемы замещения. Количество максимумов и минимумов АЧХ (полюсов и нулей характеристической строки) определяет количество реактивных элементов в схеме замещения. При этом множество типовых электрических схем замещения с разным количеством каскадов с реактивными элементами выбирается заранее. Экспериментальные исследования АЧХ входных каскадов ВИП показали, что в максимальном случае достаточно двух каскадов с четырьмя реактивными элементами для получения необходимой структуры.

3. Идентификация параметров электрической схемы методом наименьших квадратов. Критерием в задаче идентификации является близость АЧХ объекта и АЧХ электрической схемы замещения.

4. Составление системы дифференциальных уравнений (математической модели) схемы замещения.

Идентификация параметров электрической схемы замещения – это первый шаг верификации математической модели объекта.

В полёте (после каждого включения приемника электроэнергии):

1. Цифровые измерения потребляемого тока для получения переходной функции.

2. Идентификация параметров дифференциальных уравнений (верификация математической модели).

3. Расчет текущих параметров электрической схемы замещения.

При более детальном анализе зависимостей резонансных частот и амплитудных значений от состояния конденсаторов (обрывов или изменении параметров) можно получить аналитические функции, по которым появится возможность однозначного диагностирования таких состояний.

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

Синтез электрических цепей можно выполнить во временной области, когда требования задаются к переходной или импульсной характеристике, и в частотной области, когда требования задаются к АЧХ. Рассмотрим второй случай.

Условия физической реализуемости зависят от того, из каких элементов предполагается синтезировать цепь, в данном случае RLC-цепь [70].

Реальная АЧХ определяется номинальными (расчетными) значениями параметров исследуемого объекта, допустимыми (технологическими) отклонениями параметров, измерительными и вычислительными ошибками,

отклонениями параметров, обусловленными старением элементов или эксплуатационными воздействиями.

Как уже указывалось ранее, по амплитудам в резонансных точках АЧХ определяются параметры R , L , C элементов объекта исследования [124]. Структуру (топологию) электрической схемы замещения будем задавать исходя из количества экстремумов исходной АЧХ [135].

Для контроля состояния оборудования достаточно ограничиться входным импедансом схемы $Z(f)$ на заданном множестве значений частоты. Для многопараметрических двухполюсников частотные характеристики усложняются в зависимости от числа их параметров. У чисто реактивных нагрузок сопротивление ($Z(\omega)=\pm jX$) зависит от частоты, при этом $Z(\omega)$ может многократно меняться от 0 до ∞ .

Таким образом, частотная характеристика RLC-цепи состоит из набора чередующихся локальных экстремумов. Координаты локальных экстремумов могут быть использованы в качестве диагностических параметров объекта. Постепенное изменение параметров элементов при их деградации можно использовать в прогнозировании состояния объекта контроля. При сохранении значений параметров электрической схемы устройства, АЧХ остается неизменной [135]. По форме АЧХ (наличию, координатах и величинах экстремумов на графике частотной характеристики) можно судить о состоянии контролируемого устройства. В качестве примера исходного объекта рассмотрим АЧХ исправного частотного фильтра, снятую экспериментальным путем, на рисунке 3.2.

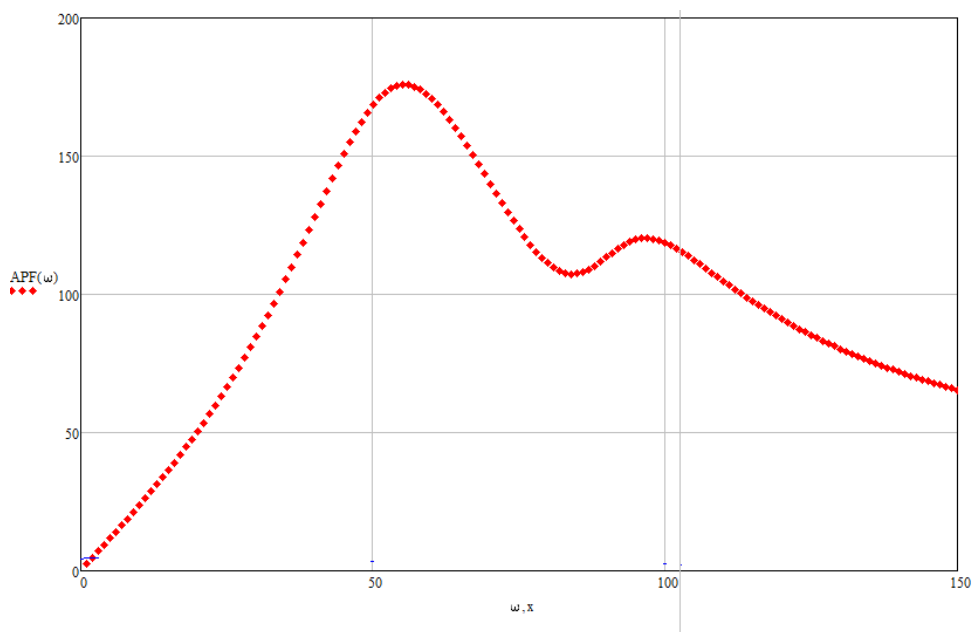


Рисунок 3.2. АЧХ частотного фильтра

Схемы замещения на основе частотных характеристик для несложных двухполюсников, содержащих резистивные и реактивные элементы, иногда можно качественно строить на основании простых физических соображений о характере изменения сопротивления отдельных элементов этого двухполюсника в функции частоты [8].

Рассматривая характеристику, указанную на рисунке 3.2 можно увидеть экстремумы: два максимума и один минимум. Это свидетельствует о наличии двух каскадов в схеме замещения. По исследуемым ранее АЧХ, один максимум соответствует одному каскаду (из связки резистора, индуктивности и емкости) элементов в исходной электрической цепи. На основании представленной АЧХ можно представить следующую схему замещения (рис. 3.3), используя I каноническую схему Кауэра, в которой в продольных плечах располагаются индуктивные элементы, а в поперечных плечах располагаются ёмкостные элементы [134].

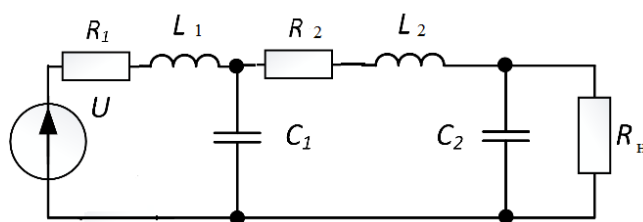


Рисунок 3.3. Электрическая схема замещения

Стоит указать, что в схеме с множеством реактивных элементов не будет АЧХ по амплитуде с большим количеством экстремумов.

На основании этого можно создать базис из типовых схем замещения с заданной топологией АЧХ. Нескольким видам схем замещения может соответствовать одна АЧХ. Важным топологическим свойством является то, что количество экстремумов в АЧХ схемы замещения должно совпадать с топологией АЧХ исследуемой системы.

3.2 Определение чувствительности изменения контролируемых параметров от измеренных

Из вышеизложенного становится ясным, что характеристики электрической цепи зависят от параметров ее элементов. В процессе эксплуатации значения параметров элементов неизбежно отличаются от расчетных значений, что приводит к изменению их характеристик. Изменения характеристик должны быть такими, при которых работа устройства не нарушается. Поэтому, чем меньше изменения характеристик при одном и том же отклонении величин параметров элементов, тем лучше это устройство. Для оценки влияния изменений характеристик устройств к изменению параметров элементов вводится понятие чувствительности [70]. Подробно об этом написано в подразделе 2.2 настоящей работы.

При решении данной задачи использовалось ПО Scilab 6.1.1.В ходе исследования были получены следующие графики рисунке 3.4 и рисунке 3.5.

В результате решения были найдены неизвестные параметры (R , L , C) аппроксимирующей функции от исходной АЧХ, т.е. найдено наилучшее возможное квадратичное приближение (рис. 3.4).



Рисунок 3.4. График аппроксимации АЧХ

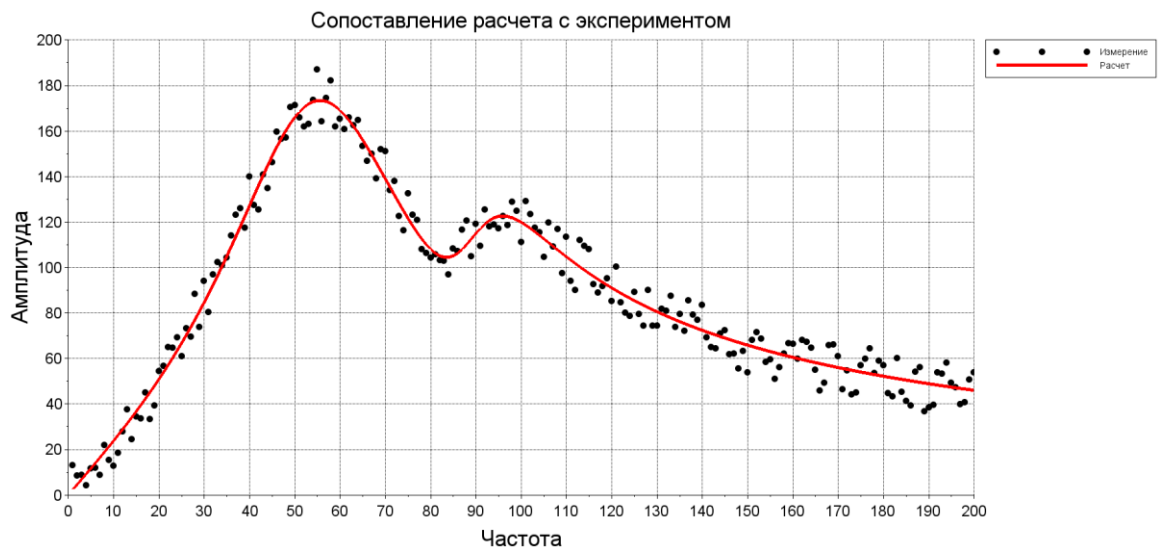


Рисунок 3.5. График аппроксимации с погрешностью 7,5

При имитации изменения параметров в экспериментально снятой АЧХ (рис. 3.5) все коэффициенты изменяют свои значения, так как они полностью определяются исходными данными.

В среде Scilab 6.1.1 были получены искомые параметры при разных погрешностях измерения. Изменяя погрешности, получают различные отклонения на основании чего можно увидеть, как изменяются параметры (R, L, C) в зависимости от точности измерений (рис. 3.6) [133, 135].



Рисунок 3.6. Относительная погрешность определения параметров R, L, C

На рис. 3.6 можно увидеть большой разброс. Например, при увеличении относительной погрешности параметров резко вырастает относительная погрешность амплитудно-частотной характеристики. Наиболее подвержены этим изменениям параметры реактивных элементов, такие как: C1, C2 и L1, L2. Это объясняется тем, что погрешности варьировались на интервале от 0,5 до 17,5. При имитации процесса измерения по которому строилась исходная АЧХ, возьмем в пример параметр C2 при его максимальной относительной погрешности 16%, его относительная погрешность АЧХ равна 32,5 %. Такие выводы по определению чувствительности изменения параметров можно сделать по каждому искомому параметру схемы замещения. Тем самым на основании этого графика можно проследить чувствительность изменения параметров R, L, C в зависимости от точности измерений [133, 135].

С листингом программного приложения Scilab 6.1.1, реализующего данные расчеты можно ознакомиться в Приложении А.

3.3 Формирование аналитических зависимостей потребляемых токов и напряжений от параметров объекта исследований на основе метода предельных состояний

В подразделах 2.3 и 2.4 подробно рассматривался частотный метод для диагностирования параметров вторичных источников питания системы распределения электроэнергии на ВС. Однако указанный метод требует тестовых воздействий и использования дополнительного оборудования.

Рассмотрим подход, который не требует изменения аппаратной конфигурации существующего оборудования и не требует использования стимулирующих сигналов, поэтому относится к классу пассивных методов, не снижающих надежность системы.

Дальнейшее исследование проводится исходя из гипотезы о том, что относительное отклонение параметров реактивных элементов исходной схемы вызывает такое же относительное изменение параметров реактивных элементов электрической схемой замещения, полученной при выполнении условия идентичности АЧХ и их входных импедансов.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений необходимо для получения зависимости контролируемых параметров схемы от измеряемых. Считаем, что схема замещения задана в виде простого частотного фильтра (рис. 3.7), его параметры определены. Для этой схемы можно рассмотреть 2 способа определения значений реактивных параметров - при синусоидальном входном напряжении и при постоянном напряжении. Первый вариант - использование уравнений схемы замещения в сложной форме, при этом определение реактивных элементов возможно за счет изменения частоты входного

напряжения. Рассмотрим второй вариант, при котором входным напряжением является постоянное напряжение бортовой сети, которое может меняться в зависимости от режимов работы системы электроснабжения. Рассматриваемый потребитель электроэнергии, электрическая схема входных цепей подключается к сети и отключается в соответствии с заданной программой ее работы. Подключение моделируется путем замыкания переключателя в схеме замещения, и начинается переходный процесс, который математически описывается дифференциальным уравнением, порядок которого определяется количеством реактивных элементов в цепи замещения (рис. 3.3).

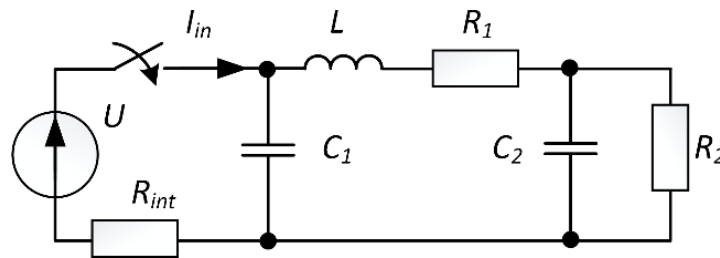


Рисунок 3.7. Электрическая схема замещения входных цепей встроенного блока питания

Предполагая, что значения параметров схемы замещения и напряжения питания не изменяются при переключении, система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение, в котором правая часть является константой.

Для получения аналитических зависимостей между входным током, необходимым количеством высших производных и значениями параметров реактивных элементов в схеме замещения использовался метод предельных состояний [87].

Преимущество метода предельных состояний состоит в том, что можно получить аналитические выражения для токов и напряжений в любой части линейной электрической цепи, используя процедуры размыкания и замыкания любого элемента электрической цепи.

Используя метод предельных состояний, было получено универсальное выражение для частотной и временной области, которое является одинаковым как для токов, так и для напряжений. В общем случае, когда количество элементов L и C равно m , уравнение имеет вид:

$$(A_0 + pA_1 + p^2 + \dots + p^m A_m)X = B_0 + pB_1 + p^2B_2 + \dots + p^m B_m \quad (3.1)$$

где:

p - оператор дифференцирования $p = d/dt$;

X - искомый ток;

коэффициенты A_i – частные контурные определители рассматриваемой схемы при разомкнутых (замкнутых) реактивных элементах в соответствии с методом предельных состояний, B_i - выражения, в которых учитываются искомые значения тока при размыкании (замыкании) реактивных элементов [87].

Коэффициенты рассчитываются по формализованным правилам через определители резистивных подсхем [87] схемы замещения (рис. 3.7). В данной работе будем считать, что источник питания характеризуется напряжением U и внутренним сопротивлением R_{int} , переходный процесс начинается с замыкания переключателя. В каждый момент времени измеряется потребляемый ток, что позволяет получить характеристику переходного процесса. Кроме того, производные тока первого, второго и более высокого порядка могут быть вычислены в каждый момент времени (если они не равны 0). Применяя последовательно процедуры метода предельных состояний для цепей с реактивными элементами, получаем выражение для записи дифференциального уравнения относительно входного тока I_{in} :

$$p^3 I_{in} C_1 C_2 L R_1 R_2 R_{int} + p^2 I_{in} L (C_1 + C_2) (R_1 R_2 + R_1 R_{int} + R_2 R_{int}) + p I_{in} L (R_1 + R_2 + R_{int}) + I_{in} (R_1 R_2 + R_1 R_{int}) = U [p^3 C_1 C_2 L R_1 R_2 + p^2 L (C_1 R_2 + C_1 R_2 + C_2 R_2) + p (L + C_1 R_1 R_2 + C_2 R_1 R_2 + R_1)] \quad (3.2)$$

Полученное уравнение является универсальным, то есть его можно применять как для частотного анализа (при $p = j\omega$), так и для временного анализа, который рассматривается в данном диссертационном исследовании.

Заменяя оператор p на d / dt и принимая $U=const$, выполняя простые преобразования, получаем дифференциальное уравнение 3-го порядка для переходного процесса входного тока для схемы замещения, показанной на рис.3.7:

$$I_{in}'''(t)C_1C_2LR_1R_2R_{int} + I_{in}''(t)L(C_1 + C_2)(R_1R_2 + R_1R_{int} + R_2R_{int}) + I_{in}'(t)L(R_1 + R_2 + R_{int}) + I_{in}(t)(R_1R_2 + R_1R_{int}) = UR_1 \quad (3.3)$$

или

$$aI_{in}'''(t) + bI_{in}''(t) + cI_{in}'(t) + dI_{in}(t) = k \quad (3.4)$$

где:

$$a = C_1C_2LR_1R_2R_{int};$$

$$b = L(C_1 + C_2)(R_1R_2 + R_1R_{int} + R_2R_{int});$$

$$c = L(R_1 + R_2 + R_{int});$$

$$d = R_1R_2 + R_1R_{int};$$

$$k = UR_1.$$

Правая часть уравнения (3.3) представлена, как константа из-за того, что все производные постоянного напряжения равны нулю. Решение дифференциального уравнения (3.4) согласно теореме о структуре общего решения линейного неоднородного уравнения представляется как сумма решения однородного дифференциального уравнения (линейная комбинация фундаментальной системы решений) и частное решение неоднородного дифференциального уравнения. Это желаемая функциональная связь между значением входного тока и параметрами схемы замещения, прежде всего со значениями реактивных элементов схемы. Дифференцируя полученное выражение 3 раза, можно получить аналитические зависимости между соответствующей производной входного тока и реактивными параметрами схемы замещения. Полученный набор аналитических выражений представляет собой систему алгебраических уравнений относительно искомых значений реактивных элементов. Переходные процессы для входного тока и его производных показаны на рисунках 3.8-3.11.

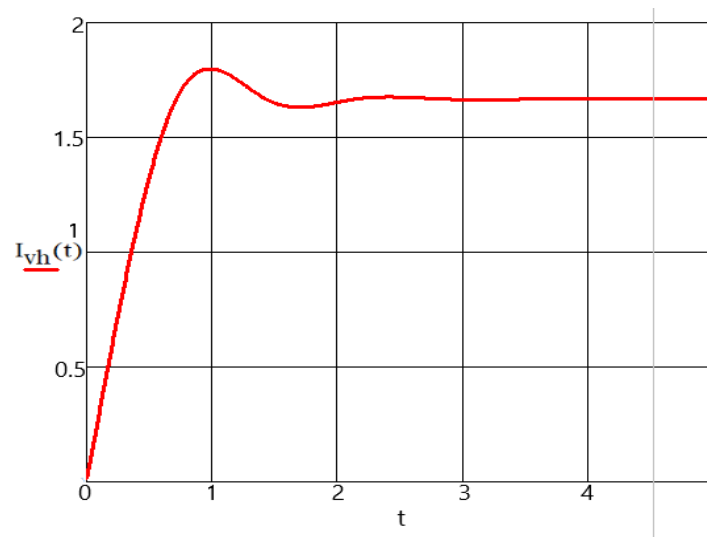


Рисунок 3.8. Переходный процесс для входного тока

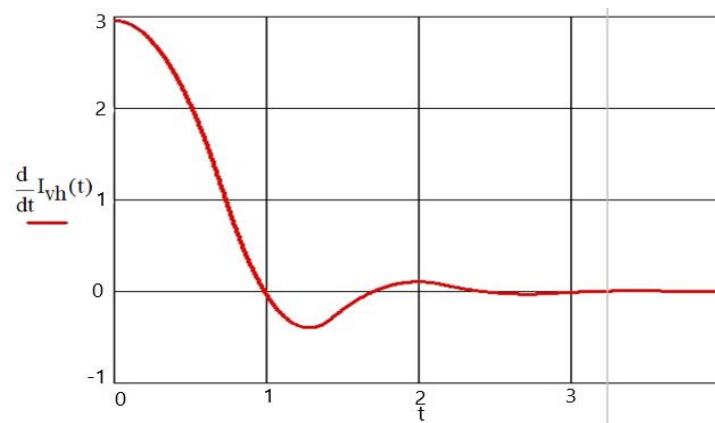


Рисунок 3.9. Переходный процесс для первой производной входного тока

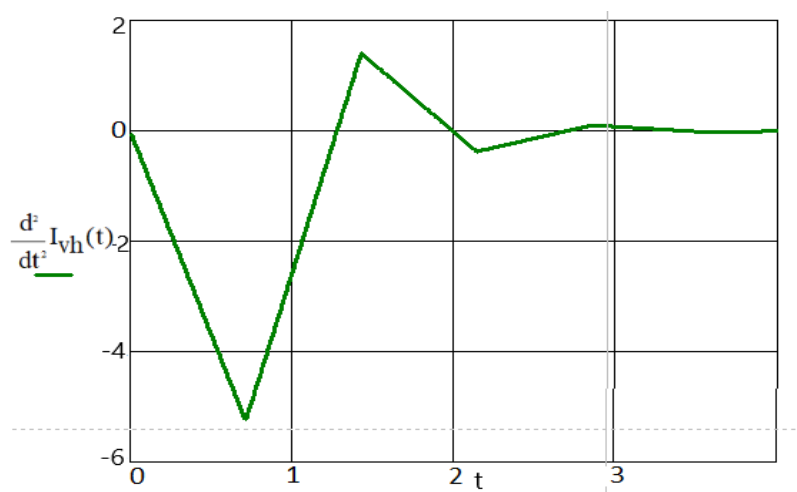


Рисунок 3.10. Переходный процесс для второй производной входного тока

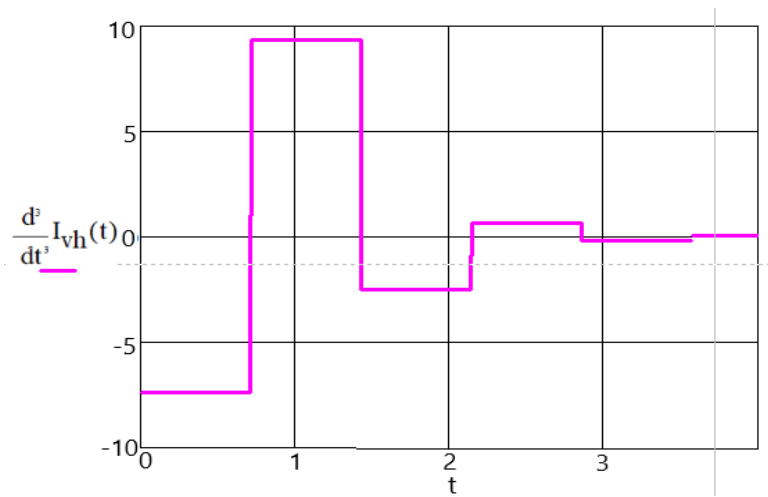


Рисунок 3.11. Переходный процесс для третьей производной входного тока

Анализ переходных процессов (рис. 3.8 - 3.11) подтверждает наличие необходимого количества ненулевых производных входного тока, необходимых для определения реактивных параметров схемы замещения. Следует отметить, что точность определения параметров схемы замещения зависит от выборки измерений тока, как по времени, так и по величине, которая зависит от выбранных цифровых измерителей.

$$\begin{cases} a \cdot X_1''' + b \cdot X_1'' + c \cdot X_1' + d \cdot X_1 = k \\ a \cdot X_2''' + b \cdot X_2'' + c \cdot X_2' + d \cdot X_2 = k \\ a \cdot X_3''' + b \cdot X_3'' + c \cdot X_3' + d \cdot X_3 = k \end{cases} \quad (3.5)$$

Получив значения функции и вычислив ее производные для 3-х точек, можно записать систему алгебраических уравнений, с помощью которых можно определить значения искомых параметров при имитации исходной схемы и переходных процессов в ней.

Значения производных искомой переменной получены для 3-х значений времени в рамках переходного процесса.

$$\begin{aligned} X_1''' &= 9.3226; & X_1'' &= -2.5882; & X_1' &= -0.0371; & X_1 &= 1.7975 & - \text{ в момент времени } t_1 = 1, \\ X_2''' &= -2.498; & X_2'' &= -0.0128; & X_2' &= 0.1062; & X_2 &= 1.6532 & - \text{ в момент времени } t_2 = 2, \\ X_3''' &= -0.1791; & X_3'' &= 0.0754; & X_3' &= -0.0082; & X_3 &= 1.6646 & - \text{ в момент времени } t_3 = 3. \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} X_1''' & X_1'' & X_1' \\ X_2''' & X_2'' & X_2' \\ X_3''' & X_3'' & X_3' \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} k - d \cdot X_1 \\ k - d \cdot X_2 \\ k - d \cdot X_3 \end{pmatrix}; \quad (3.6)$$

$$B \cdot A = C;$$

$$B = C \cdot A^{-1}$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} -0.22 & -0.672 & -7.668 \\ -1.103 & -2.325 & -24.993 \\ -5.311 & -6.671 & -183.411 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} -0.393 \\ 0.04 \\ 6.2 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0.012 \\ 0.184 \\ 0.678 \end{pmatrix};$$

$$a = 0.012, \quad b = 0.184, \quad c = 0.678$$

В результате решения системы уравнений были определены параметры L, C исходной схемы замещения.

$$L = \frac{c}{R_1 + R_2 + R_{int}} = 170 \text{ мГн}$$

$$C_1 = \frac{b}{L \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_{int} + R_2 \cdot R_{int})} - C_2$$

$$C_2 = \frac{\frac{b}{L \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_{int} + R_2 \cdot R_{int})} - C_2}{a} = -\frac{0.0354}{C_2 - 0.2171}$$

$$C_1 = \frac{b}{L \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_{int} + R_2 \cdot R_{int})} - C_2 = 109 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 108.6 \text{ мкФ}$$

По полученным значениям параметров реактивных элементов схемы замещения можно судить о состоянии входных каскадов исследуемого вторичного источника питания [124]. Данная аналитическая модель легко реализуется в локальных центрах управления нагрузкой систем распределения воздушных судов.

Для полноценной реализации предложенного метода необходимо сформировать требования к аппаратным и программным средствам локальных центров управления нагрузками бортовой системы распределения электроэнергии для реализации предлагаемого метода, в том числе требований к цифровым устройствам измерения напряжения и тока, к разрядности, быстродействию используемых микропроцессоров.

3.4 Применение цифровых портретов для диагностирования авиационного электрооборудования

Текущий уровень развития науки и техники позволяет создавать математические модели, описывающие с высокой степенью адекватности поведение изделий промышленности на всех стадиях жизненного цикла [27].

Разрабатываемые математические модели могут отражать различные характеристики и свойства изделий. Объединяя различные математические и компьютерные модели в единую систему, можно получить новую сущность – цифровой двойник, которая позволяет всесторонне описать изделие и системно подойти к разработке, производству и эксплуатации изделий [27].

Применение цифровых двойников позволяет обосновывать принятые решения за счет быстрой проверки изменений, вносимых в конструкцию изделия и его составных частей, в ходе цифровых испытаний, и анализировать влияние изменений показателей одних составных частей на другие. Кроме того, с помощью цифрового двойника возможно определить критические зоны и оптимальное количество датчиков, которое необходимо разместить на изделии для сбора данных для дальнейшего использования с целью обеспечения технической эксплуатации и модернизации изделия.

Внедрение технологии цифровых двойников на стадии разработки изделия позволит улучшить качество проектирования изделия, обеспечить выполнение технических и тактико-технических требований, сократить количество и повысить результативность проводимых испытаний опытного образца и проработку конструкторской документации изделия на технологичность [27].

Современный уровень развития науки и техники позволяет создавать математические и компьютерные модели, описывающие с высокой степенью адекватности поведение изделий на всех стадиях жизненного цикла. Объединив различные математические и компьютерные модели в единую систему, можно

получить цифровой двойник, который позволяет всесторонне описать изделие и системно осуществить его разработку, производство и эксплуатацию [37].

В основе цифрового двойника лежит его цифровой портрет – система математических и/или компьютерных моделей, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого оборудования на различных стадиях жизненного цикла [37].

В данном диссертационном исследовании необходимо построить алгоритм определения параметров диагностируемого оборудования на основе идентификации параметров их цифровых портретов (ЦП). Электрический цифровой портрет представляет собой компьютерную реализацию математической модели, построенной на основе электрической схемы замещения.

Математическая модель цифрового портрета, как и любая математическая модель, есть система дифференциальных уравнений, связывающих параметры и структуру электрических схем замещения с измеряемыми параметрами [124]. Динамическая модель предусматривает зависимость параметров схемы замещения от времени t :

$$DP(q_j, \dot{q}_j, \dots, q_j^{n_j}, S, p_i(t)) = 0 \quad (3.7)$$

где:

S – структура модели, в общем случае непостоянная;

$q_j, \dot{q}_j, \dots, q_j^{n_j}$ – измеряемые параметры модели и их производные по времени до n_j порядка, j – порядковый номер параметра;

p_i – параметры схемы замещения модели, i – порядковый номер параметра.

В случае рассмотрения статических режимов цифровой портрет преобразуется в систему алгебраических выражений, достаточно удобную для анализа и исследования.

Для каждого экземпляра оборудования строится индивидуальный ЦП, который становится его неотъемлемой частью и изменяется вместе с

оборудованием в процессе его эксплуатации и старения на основе получения информации о состоянии оборудования. В результате необходимо получить зависимость критических параметров ЦП, которые являются контролируруемыми, от измеряемых параметров:

$$p_i^* = F \left(\frac{d^2 q_1}{dt^2}, \frac{dq_1}{dt}, q_1, \dots, \frac{d^2 q_n}{dt^2}, \frac{dq_n}{dt}, q_n, \dots, \frac{d^2 q_N}{dt^2}, \frac{dq_N}{dt}, q_N \right) \quad (3.8)$$

где:

p_i^* – контролируемые параметры схемы замещения модели;

N – количество измеряемых параметров.

Таким образом, необходимо на основе исследования экспериментальных данных и математического моделирования получить зависимости между контролируемыми и измеряемыми параметрами реактивных элементов вторичного источника питания электроэнергии. Данная задача имеет свои особенности, а следовательно, и способ решения.

Использование аналитических зависимостей для определения контролируемых параметров, в отличие от численных решений, позволяет значительно снизить требования к вычислительной мощности используемых микропроцессоров системы распределения питания, а также повысить быстродействие алгоритмов диагностики. Для получения аналитических решений обычно используют методы символьного анализа [110, 112, 117, 118, 130, 131], который также используется для проектирования аналоговых схем, как средство получения информации о поведении схемы и т. д.

В отличие от других методов символьного анализа, в данном диссертационном исследовании будет использоваться метод предельных состояний, основанный на исследовании предельных состояний системы. Данный метод позволит получать дифференциальные уравнения для цепей с реактивными элементами по резистивным подсхемам [87].

Таким образом, стоит задача получить аналитические зависимости между входным мгновенным током, необходимым количеством его высших производных и значениями параметров реактивных элементов схемы. Для этого необходимо получить дифференциальное уравнение относительно входного

тока и получить его аналитическое решение. Метод предельных состояний [87], это метод, в котором предельные состояния (обрыв и короткое замыкание) резистивных цепей и явные значения физически понятных реактивных элементов: емкостей и индуктивностей - используются для получения дифференциального уравнения.

Преимущество метода предельных состояний состоит в том, что можно получить аналитические выражения для токов и напряжений в любой части линейной электрической цепи, используя процедуры размыкания и замыкания любого элемента электрической цепи.

Особенностью разложения электрической схемы с реактивными элементами на резистивные подсхемы является то, что размыкание и замыкание реактивных элементов осуществляется частотным способом - установкой частоты входного сигнала равной нулю или бесконечности [87]. В этом случае емкостной и индуктивный элементы превращаются либо в разрыв, либо в короткое замыкание.

Главной задачей, как указывалось ранее является отслеживание значения параметров реактивных элементов цепи по входному току или напряжению. Применяя методику составления уравнений с реактивными элементами по резистивным подсхемам, уравнение будет иметь параметр p , который для частотной области может быть заменён на $j\omega$, а для временной – на d/dt . В результате мы получим комплексное уравнение или дифференциальное уравнение, порядок которого в общем случае определяется количеством реактивных элементов в цепи. Следовательно, при подаче синусоидального напряжения на вход схемы, для определения параметров схемы можно применять комплексное уравнение, а в случае несинусоидальных входных сигналов необходимо решать дифференциальное уравнение. В последнем случае решения этого уравнения и есть необходимые выражения для определения параметров искомой схемы.

Для нахождения всех значений параметров реактивных элементов необходимо провести столько опытов с разными значениями частоты, сколько искомым реактивных элементов в схеме.

В результате должна получиться система алгебраических уравнений для нахождения искомым значений параметров реактивных элементов.

По изменению значений параметров реактивных элементов более заданного критического значения можно будет судить о состоянии входных каскадов устройств. То есть можно будет отслеживать процесс деградации их свойств или диагностировать отказ в случае скачкообразного изменения.

Следует отметить, что точность определения параметров схемы замещения зависит от дискретизации измерения тока как по времени, так и по величине, которая зависит от выбранных цифровых измерителей.

Таким образом, имея эталонный переходный процесс, можно создать рабочий «цифровой портрет» входных цепей рассматриваемого оборудования. В данном случае «цифровой портрет» будет представлять собой математическую модель в виде системы алгебраических уравнений, которую легко можно будет реализовать в ЛЦУН в системах электроснабжения ВС. По изменению расчетных значений индуктивности и емкостей можно будет судить о состоянии входных каскадов устройств.

Для подтверждения теоретических исследований необходимо провести экспериментальные исследования переходных процессов для определения параметров реактивных элементов, входящих в состав вторичных источников электропитания.

3.5 Разработка метода диагностирования состояния потребителей электроэнергии в системах распределения ВС

Выполненные исследования по оценке возможности диагностирования приемников электроэнергии частотным методом, а также исследования,

направленные на определение параметров эквивалентных электрических схем замещения и методике формирования цифровых двойников цепей питания ПЭЭ, которые в процессе функционирования постоянно верифицируются на основе цифровых измерений параметров переходных процессов, позволили получить методику их диагностирования (рис. 3.12).

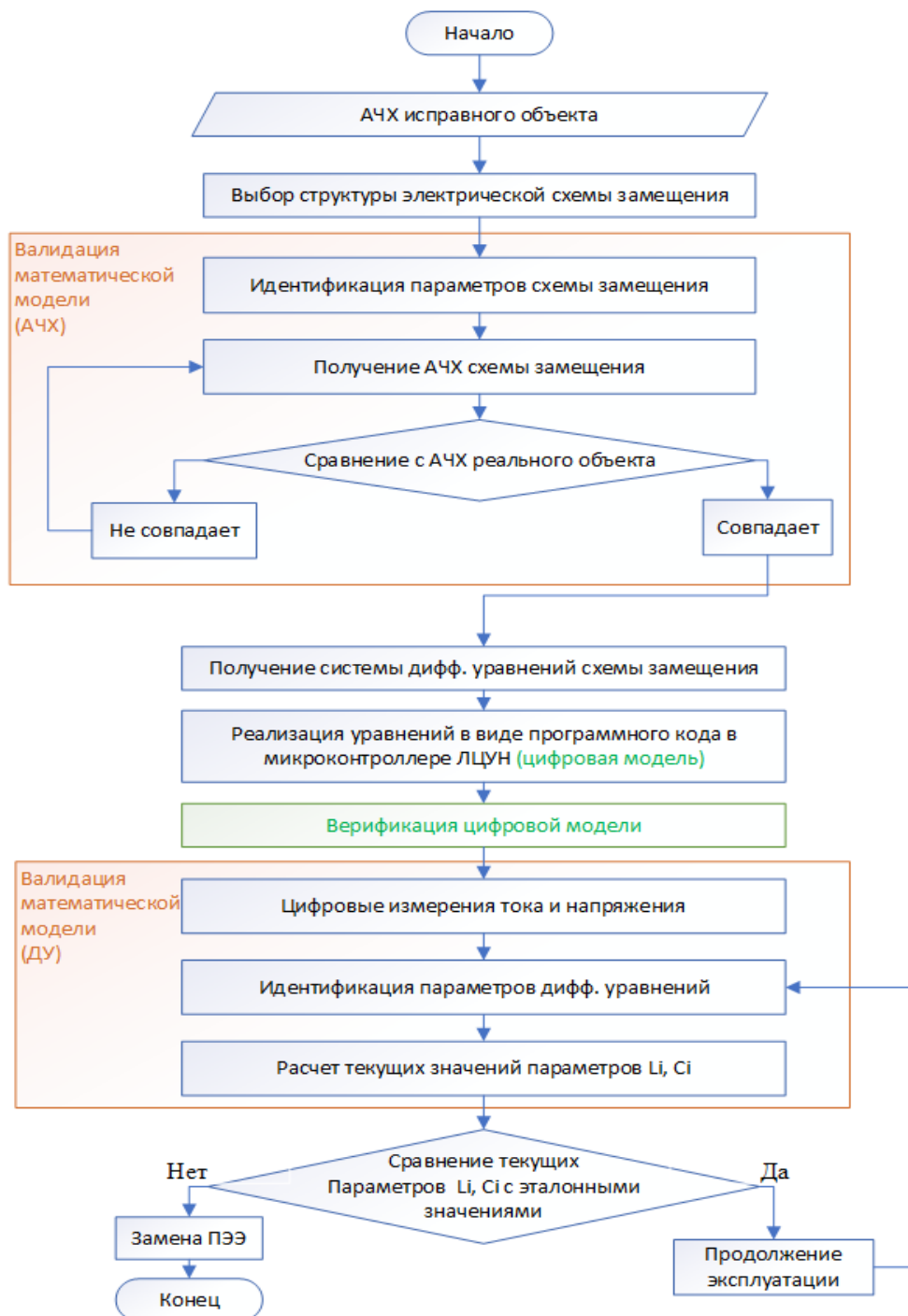


Рисунок 3.12. Метод диагностирования состояния входных каскадов потребителей электроэнергии

Методика диагностирования потребителей электроэнергии состоит в последовательности выполнения ряда задач, 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).

Последовательность реализации следующая.

1. Перед началом эксплуатации производится снятие АЧХ исправного объекта силами разработчика или эксплуатирующей организации.
2. Выбор структуры эквивалентной электрической схемы замещения по форме экспериментально снятой АЧХ импеданса объекта.
3. Валидация математической модели АЧХ объекта, которая заключается в:
 - Идентификации параметров схемы замещения
 - Получении АЧХ схемы замещения.
 - Сравнении исходной АЧХ объекта исследования с АЧХ схемы замещения.
 - Уточнение параметров схемы замещения до момента совпадения ее АЧХ с АЧХ исходного объекта с учетом заданной точности.
4. Получение системы дифференциальных уравнений эквивалентной схемы замещения – математической модели динамики.
5. Реализация уравнений в виде программного кода в микроконтроллере ЛЦУН (получение цифровой модели).
6. Верификация цифровой модели на множестве тестовых экспериментальных данных.

7. Валидация динамической математической модели (уточнение параметров дифференциальных уравнений), в том числе:

- Цифровые измерения тока и напряжения в переходном процессе после включения потребителя ЭЭ.
- Идентификация параметров дифференциальных уравнений.
- Расчет текущих значений параметров R , L , C эквивалентной схемы замещения.

8. Определение работоспособности объекта исследования (диагностирование) на основе сравнения отклонения текущих значений параметров эквивалентной схемы замещения от эталонными (полученными на этапе синтеза схемы замещения) с допуском на относительное отклонение этих параметров (на практике параметры реактивных элементов в пределах работоспособности цепей питания могут отклоняться до 30%). Конкретные значения допуска определяет разработчик объекта.

Выводы по 3 главе:

1. Вследствие анализа амплитудно-частотных характеристик входных цепей питания приемников электроэнергии, а также отсутствия возможности получения исходных электрических схем принята гипотеза об использовании эквивалентных электрических схем замещения для диагностирования изменения параметров объекта диагностирования. Эквивалентность обеспечивается совпадением АЧХ исходного объекта с АЧХ схемы замещения.

2. Предложена методика синтеза эквивалентных электрических схем замещения на основе канонических цепочных схем, которые позволяют имитировать любые АЧХ объектов диагностирования. На основе исследования чувствительности определения параметров объектов показано, что погрешность не превышает 10%.

3. Получены аналитические выражения для определения зависимости потребляемых токов и напряжений от параметров объекта исследований на

основе универсального метода предельных состояний, которые позволяют получать как решения дифференциальных уравнений в общем виде, так и функцию для АЧХ.

4. Разработан метод диагностирования состояния потребителей на основе эквивалентных схем замещения, который позволяет расширить полноту диагностирования авиационного электрооборудования оборудования дополнительной функцией контроля цепей питания без изменения аппаратной структуры локальных центров управления нагрузками.

Глава 4. Экспериментальные исследования методики диагностирования технического состояния параметров цепей питания вторичных источников питания по цифровым измерениям переходной функции

4.1 Исходные данные и постановка задачи проведения экспериментального исследования

В качестве примера рассмотрим два варианта эквивалентных электрических схем замещения вторичного источника электропитания на основе канонических схем Кауэра для двухполюсников, которые называются цепочными (лестничными) схемами (рис. 4.1а, б).

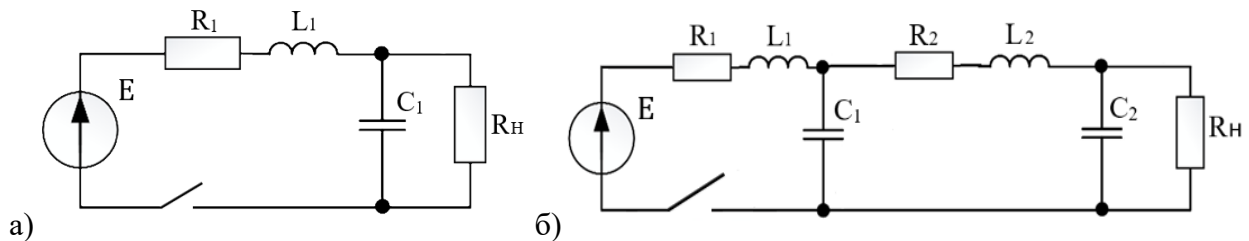


Рисунок. 4.1. Электрическая схема замещения входных цепей вторичного источника питания а) с одним каскадом RLC б) с двумя каскадами RLC

Будем осуществлять цифровые измерения напряжения и тока в переходных процессах после включения приемника в сеть. Определение (идентификацию) параметров дифференциальных уравнений будем осуществлять методом наименьших квадратов, после этого осуществляем расчет реактивных элементов. Для идентификации в качестве первого приближения будем использовать параметры (коэффициенты) дифференциальных уравнений, полученные на предыдущем шаге [132].

4.2 Методика проведения экспериментальных исследований и обработки результатов

Для определения параметров схем замещения, показанных на рисунках 1а и б, необходимо иметь измеренные значения входных напряжения и тока в переходных процессах после подачи питания, получаемые с использованием имитации схемы замещения, показанной на рисунке 4.2 и, а также имитацию динамики входного напряжения после отключения питания, получаемую с использованием схемы замещения, показанной на рисунках 4.3а и б.

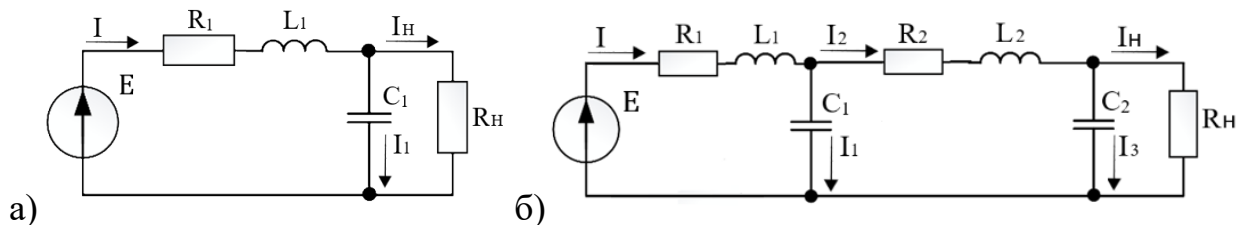


Рисунок 4.2. Электрическая схема замещения входных цепей вторичного источника питания в режиме подачи электропитания а) с одним каскадом RLC б) с двумя каскадами RLC

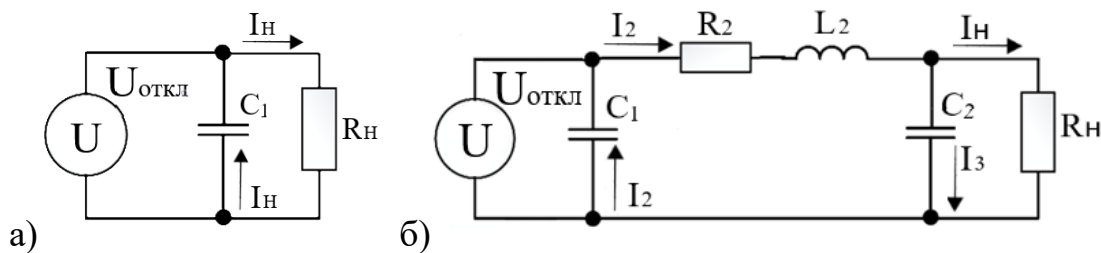


Рисунок 4.3. Электрическая схема замещения входных цепей вторичного источника питания после отключения электропитания а) с одним каскадом RLC б) с двумя каскадами RLC

Для нахождения тока и напряжения в исследуемой цепи можно использовать рассматриваемый в работе метод придельных состояний, а также и классическими методами – первым и вторым правилами Кирхгофа [8].

Для схемы, показанной на Рис. 4.1а для режима включения, используя схему замещения, показанную на Рис. 4.2а, в соответствие с первым правилом Кирхгофа имеем:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t); \quad (4.1)$$

по второму правилу Кирхгофа, а также в силу связи заряда на конденсаторе с током через конденсатор, имеем:

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + R_2 i_2(t), \quad R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, \quad i_1(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (4.2)$$

Согласно соотношениям (1), (2) получаем:

$$(R_1 + R_2) i(t) + (C_1 R_1 R_2 + L_1) \frac{di(t)}{dt} + C_1 L_1 R_2 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = E(t) + C_1 R_2 \frac{dE(t)}{dt}. \quad (4.3)$$

Учитывая, что значения параметров схемы замещения и напряжения питания не изменяются при переключении, система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение, в котором правая часть является константой (предполагаем, что напряжение меняется ступенчато).

Для нахождения неизвестных R , L и C в схеме, показанной на Рис. 4.1а введем переменные замены:

$$A = R_1 + R_2; \quad B = C_1 R_1 R_2 + L_1; \quad D = L_1 R_2 C_1; \quad F = C_1 R_2. \quad (4.4)$$

В режиме отключения, используя схему замещения, показанную на Рис. 3а, в соответствие со вторым правилом Кирхгофа, а также используя связь заряда на конденсаторе с током через конденсатор, имеем:

$$U_{\text{откл}}(t) = \frac{q(t)}{C_1}, \quad R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, \quad i_2(t) = -\frac{dq(t)}{dt};$$

отсюда имеем дифференциальное уравнение первого порядка для напряжения после снятия электропитания:

$$U_{\text{откл}}(t) + C_1 R_2 \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (4.5)$$

Учитывая ступенчатый характер изменения напряжения, имеем в силу (4.3) – (4.5):

$$A i(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2i(t)}{dt^2} = E(t), U_{\text{откл}}(t) + F \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (4.6)$$

Как видно из (4.6), величина F является постоянной времени отключения $\tau_{\text{откл}}$, получаемой из динамики напряжения отключения $U_{\text{откл}}(t)$, будем далее полагать $F = \tau_{\text{откл}}$. Отсюда для схемы замещения, показанной на Рис. 1а в силу (4.4) имеем:

$$L_1 = \frac{D}{\tau_{\text{откл}}}, R_1 = \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} - \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, R_2 = A - \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} + \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, C_1 = \frac{\tau_{\text{откл}}^3}{A\tau_{\text{откл}}^2} - B\tau_{\text{откл}} + D. \quad (4.7)$$

Определив, используя (4.6), из кривых тока и напряжения, взятых в переходных процессах после подачи и отключения питания, параметры $A, B, D, F = \tau_{\text{откл}}$, затем из (4.7) мы определим параметры схемы замещения, показанной на Рис. 4.1а.

Для схемы, показанной на Рис. 4.1б, для режима включения, используя схему замещения, показанную на Рис. 4.2б, в соответствие с первым правилом Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), i_2(t) = i_3(t) + i_{\text{н}}(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_1(t) = \frac{dq_1(t)}{dt}; \quad (4.8)$$

по второму правилу Кирхгофа имеем:

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{q_1}{C_1} - \frac{q_1(t)}{C_1} - \frac{q_2(t)}{C_2} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - R_2 i_2(t) = 0, \frac{q_2(t)}{C_2} - R_{\text{н}} i_{\text{н}}(t) = 0. \quad (4.9)$$

Из (4.8) и (4.9) получаем дифференциальное уравнение четвертого порядка:

$$\begin{aligned} E(t) + ((R_{\text{н}} + R_2)C_1 + R_{\text{н}}C_2) \frac{dE(t)}{dt} + (L_2 + R_{\text{н}}R_2C_2)C_1 \frac{d^2E(t)}{dt^2} + R_{\text{н}}L_2C_2C_1 \frac{d^3E(t)}{dt^3} = \\ (R_{\text{н}} + R_1 + R_2)i(t) + (R_1C_1(R_{\text{н}} + R_2) + R_{\text{н}}(R_1 + R_2)C_2 + L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} + \\ ((R_{\text{н}} + R_2)C_1L_1 + R_{\text{н}}C_2(L_1 + L_2) + R_1C_1(R_{\text{н}}R_2C_2 + L_2)) \frac{d^2i(t)}{dt^2} + ((R_{\text{н}}R_2C_2 + \\ L_2)L_1 + R_{\text{н}}L_2C_2R_1)C_1 \frac{d^3i(t)}{dt^3} + R_{\text{н}}L_1L_2C_1C_2 \frac{d^4i(t)}{dt^4}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Для определения параметров схемы, показанной на Рис. 4.1б, введем переменные замены:

$$A = R_H + R_1 + R_2, B = R_1 C_1 (R_H + R_2) + R_H (R_1 + R_2) C_2 + L_1 + L_2, H = R_H L_1 L_2 C_1 C_2, \quad (4.11)$$

$$D = C_1 L_1 (R_H + R_2) + R_H C_2 (L_1 + L_2) + R_1 C_1 (R_H C_2 R_2 + L_2), F = R_H C_1 C_2 L_2, \quad (4.12)$$

$$G = (R_H R_2 C_2 + L_2) C_1 L_1 + R_H L_2 C_1 C_2 R_1, J = C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2), M = R_H C_2 + C_1 (R_2 + R_H). \quad (4.13)$$

Согласно (4.11) – (4.13) уравнение (4.10) с учетом ступенчатого характера изменения напряжения примет вид:

$$E(t) = Ai(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + G \frac{d^3 i(t)}{dt^3} + H \frac{d^4 i(t)}{dt^4}. \quad (4.14)$$

Для режима отключения питания, используя схему замещения, показанную на Рис. 4.3б, согласно первому правилу Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем:

$$i_2(t) = i_3(t) + i_H(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_2(t) = -\frac{dq_1(t)}{dt};$$

по второму правилу Кирхгофа имеем:

$$\frac{q_2(t)}{C_2} = R_H i_H(t), \frac{q_1(t)}{C_1} = R_2 i_2(t) + \frac{q_2(t)}{C_2} + L_2 \frac{di_2(t)}{dt}, U_{\text{откл}}(t) = \frac{q_1(t)}{C_1};$$

отсюда из полученных уравнений имеем для напряжения отключения $U_{\text{откл}}$ дифференциальное уравнение третьего порядка:

$$U_{\text{откл}}(t) + (R_H C_2 + R_2 C_1 + R_H C_1) \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2) \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + R_H C_1 C_2 L_2 \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0;$$

отсюда, учитывая (4.12), (4.13), получим окончательно:

$$U_{\text{откл}}(t) + M \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + J \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + F \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0. \quad (4.15)$$

Имея временные динамики напряжения $U_{\text{откл}}(t)$ в режиме переходных процессов после отключения, а также временные динамики напряжения и тока в переходных процессах после включения, из (4.14) и из (4.15) определяем A, B, D, F, G, H, J, M , используя вытекающее из (4.11) – (4.13) соотношение:

$$B = \frac{JD}{F} + \left(\frac{G}{F} - J \frac{H}{F^2} \right) \left(M - \frac{J^2}{F} \right) + \frac{H}{F} \left(1 - \frac{MJ}{F} \right). \quad (4.16)$$

Затем, исходя из (4.11) – (4.13), получаем параметры схемы замещения, показанной на Рис 1б, в силу:

$$L_1 = \frac{H}{F}, R_1 = \frac{G - JL_1}{F}, C_1 = \frac{F}{D - ML_1 - JR_1}, L_2 = \frac{F}{C_1(M - C_1(A - R_1))}, \quad (4.17)$$

$$R_2 = \frac{J - C_1 L_2}{C_1 (M - C_1 (A - R_1))}, C_2 = \frac{M - C_1 (A - R_1)}{A - R_1 - R_2}, R_H = A - R_1 - R_2. \quad (4.18)$$

Взятие производных по времени с использованием конечно разностной схемы повлечет за собой большие погрешности определения производных, обусловленные погрешностями измерений и малым приращением времени. Поэтому для того, чтобы производные были взяты корректно, необходимо использовать аппроксимацию снятой кривой, построенной по точкам при снятии переходного процесса. Рассмотрим вид аппроксимационного аналитического выражения, который необходимо использовать для аппроксимации переходных процессов. Этот вид аппроксимационного аналитического выражения, определяется характером переходных процессов.

Переходный процесс в схемах замещения, показанных на Рис. 4.1а и б, может быть аperiodическим или колебательным. Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на Рис. 4.1а, для режима включения в силу (4.3) примет вид:

$$C_1 L_1 R_2 \lambda^2 + (C_1 R_1 R_2 + L_1) \lambda + (R_1 + R_2) = 0; \quad (4.19)$$

для режима отключения в силу (5):

$$C_1 R_2 \lambda + 1 = 0. \quad (4.20)$$

Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б, для режима включения в силу (4.14) примет вид:

$$H \lambda^4 + G \lambda^3 + D \lambda^2 + B \lambda + A = 0; \quad (4.21)$$

для режима отключения в силу (15):

$$F \lambda^3 + J \lambda^2 + M \lambda + 1 = 0. \quad (4.22)$$

Имея диапазон характеристик потребителей электрической энергии (сопротивлений, емкостей и индуктивностей) можно, определив λ из (4.19) – (4.22), примерно оценить, какой будет режим аperiodический (λ действительные) или режим затухающих колебаний (λ комплексные) и исходя из этого уже следует задавать аппроксимацию.

Т.к. общее решение любого линейного неоднородного дифференциального уравнения (в том числе и (4.3)) является суммой общего

однородного и частного неоднородного решений такого уравнения, а также общее однородное решение представляет собой линейную комбинацию экспонент (действительных или комплексных), то аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на Рис. 1а, для режима включения, исходя из (4.6), зададим в виде:

$$i(t) = i_0 + S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t}, S_1, S_2, \lambda_1, \lambda_2 = const, \quad (4.23)$$

где λ_1 и λ_2 , являющиеся решением (4.19), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (4.6), в виде:

$$U_{\text{откл}}(t) = S e^{-\lambda t}, S, \lambda = const, \quad (4.24)$$

где λ - решение (4.20). Из (4.20) видно, что решение этого уравнения является действительным. Аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на Рис. 4.1б, для режима включения, исходя из (4.14), зададим в виде:

$$i(t) = i_0 + S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t} + S_4 e^{-\lambda_4 t}, S_1, S_2, S_3, S_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 = const, \quad (4.25)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, являющиеся решением (4.21), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (4.15), в виде:

$$U_{\text{откл}}(t) = S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t}, S_1, S_2, S_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = const, \quad (4.26)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, являющиеся решением (4.22), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний). Следует отметить, что если в (4.25) и (4.26), применимых к схеме замещения, показанной на Рис. 4.1б, значения λ с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае предполагается, что схема замещения, показанная на Рис. 4.1б, вырождается в схему замещения, показанную на Рис. 4.1а.

Итак, определение параметров приемников электрической энергии на борту летательного аппарата осуществляется в соответствие со следующим формализмом:

1. Проанализировав, используя (4.19), (4.20) для схемы замещения, показанной на Рис. 1а, и, используя (4.11) – (4.13), (4.21), (4.22) для схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б, характер переходных процессов, задаем, используя (4.23), (4.24) для схемы замещения, показанной на Рис. 4.1а, и, используя (4.25), (4.26) для схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б, аппроксимационные аналитические зависимости для определения тока в режиме включения и напряжения в режиме отключения.

2. Имея снятые кривые напряжений и токов в режиме включения и отключения, определяем коэффициенты заданных в предыдущем пункте аппроксимационных выражений динамик токов и напряжений в переходных процессах. Если в случае схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б, значения λ с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае необходимо перейти к схеме замещения, показанной на Рис. 4.1а и вернуться к пункту 1.

3. Используя аналитические выражения для токов и напряжений, получаем производные по времени для токов в режиме включения до второго порядка включительно (для схемы, показанной на Рис. 4.1а) и до четвертого порядка включительно (для схемы, показанной на Рис. 4.1б), а также первую производную напряжения после отключения питания для схемы, показанной на Рис. 4.1а и производные напряжения по времени до третьего порядка включительно для схемы, показанной на Рис. 4.1б.

4. Задав дискретные моменты времени t_i , $i = 0, N$, где $N + 1$ - число дискретных моментов времени, используя полученные аналитические выражения для токов и напряжений и их производных по времени, из системы уравнений (6) определяем методом наименьших квадратов параметры $A, B, D, F = \tau_{\text{откл}}$ для схемы замещения, показанной на Рис. 1а и из (4.14) – (4.16) параметры A, B, D, F, G, H, J, M для схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б.

5. Определив параметры $A, B, D, F = \tau_{\text{откл}}$ для схемы замещения, показанной на Рис. 1а, определяем в соответствие с (4.7) сопротивления, емкости и индуктивности схемы замещения, показанной на Рис. 4.1а.

Определив параметры A, B, D, F, G, H, J, M для схемы замещения, показанной на Рис. 4.1б, определяем в соответствие с (4.17) и (4.18) сопротивления, емкости и индуктивности в схеме замещения, показанной на Рис. 4.1б.

Задание в пункте 4 дискретных моментов времени и использование метода наименьших квадратов позволит исключить неудачный выбор дискретных моментов времени для определения соответствующих параметров. По определенным в настоящем формализме характеристикам реактивных элементов, а также по скорости их изменения (получается путем многократного косвенного измерения параметров реактивных элементов через некоторые промежутки времени с дальнейшей оценкой скорости их изменения) возможно делать вывод о работоспособности контролируемых приемников электрической энергии [132].

4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований

Для экспериментальной проверки методики идентификации реактивных характеристик авиационных потребителей электроэнергии [36] были проведены экспериментальные исследования переходных процессов схемы замещения входных цепей вторичного источника питания, показанной на рисунке 4.1а, которая используются в авиационных потребителях электрической энергии.

Для экспериментальных исследований переходных процессов использовался симметричный генератор прямоугольных импульсов, скважность которого больше времени релаксации. В процессе экспериментальных исследований снято 4 кривых напряжения и входного тока в переходных процессах при различных значениях параметров в схеме, показанной на рисунке 4.1а. Экспериментальные данные для схемы с одним каскадом RLC представлены на рисунках 4.4-4.7. Следует отметить, что данные снимались как при логической единице на входе, так и при логическом нуле на

входе. Из этих данных, как нетрудно видеть из (4.3), (4.4), (4.6), могут быть получены параметры A , B , D . Снятие данных тока при логическом нуле входного напряжения позволяет минимизировать случайную погрешность измерения.

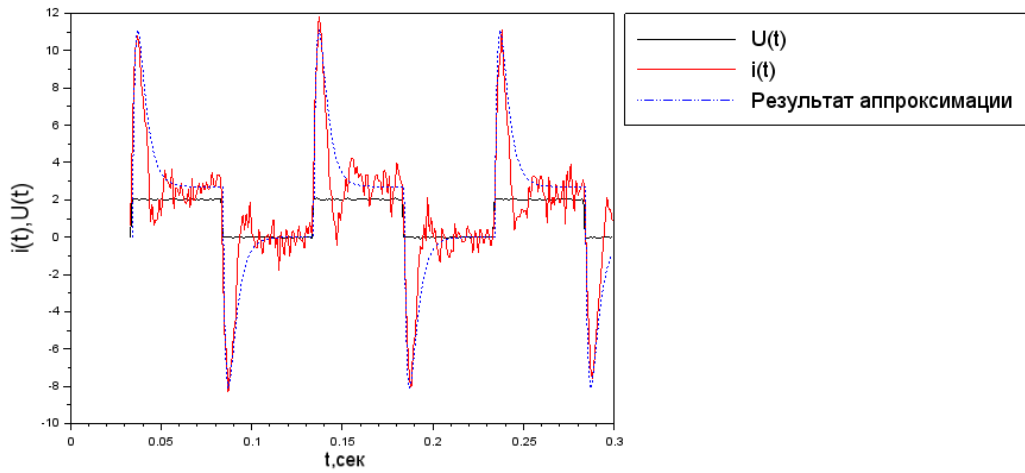


Рисунок 4.4. Переходные процессы для схемы рис. 1 а) вар. 1

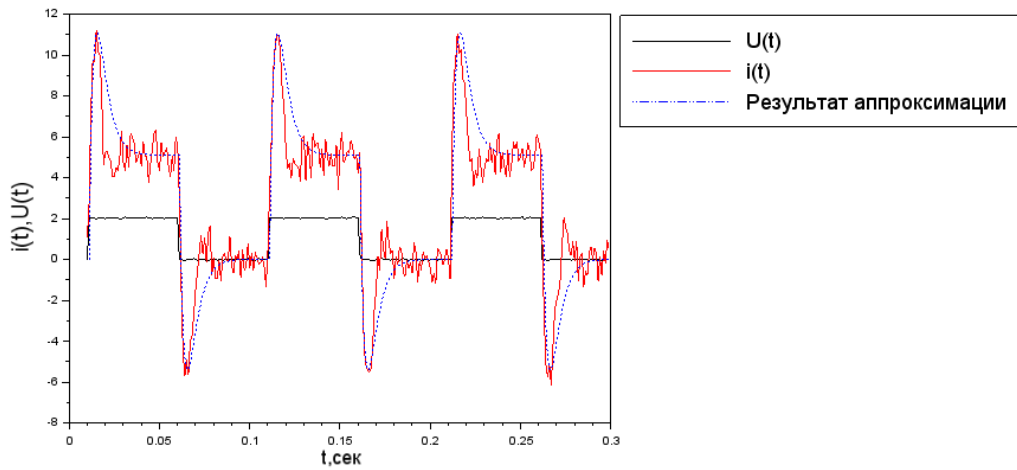


Рисунок 4.5. Переходные процессы для схемы рис. 1 а) вар. 2

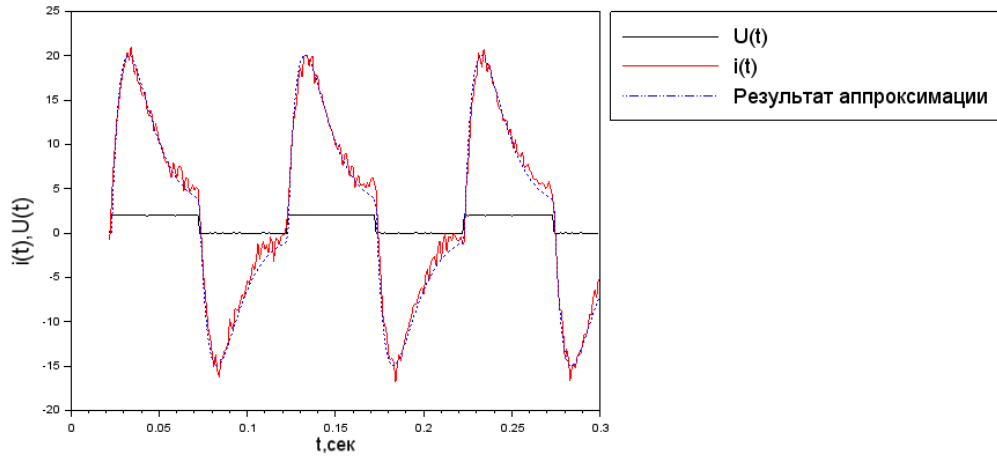


Рисунок 4.6. Переходные процессы для схемы рис. 1 а) вар. 3

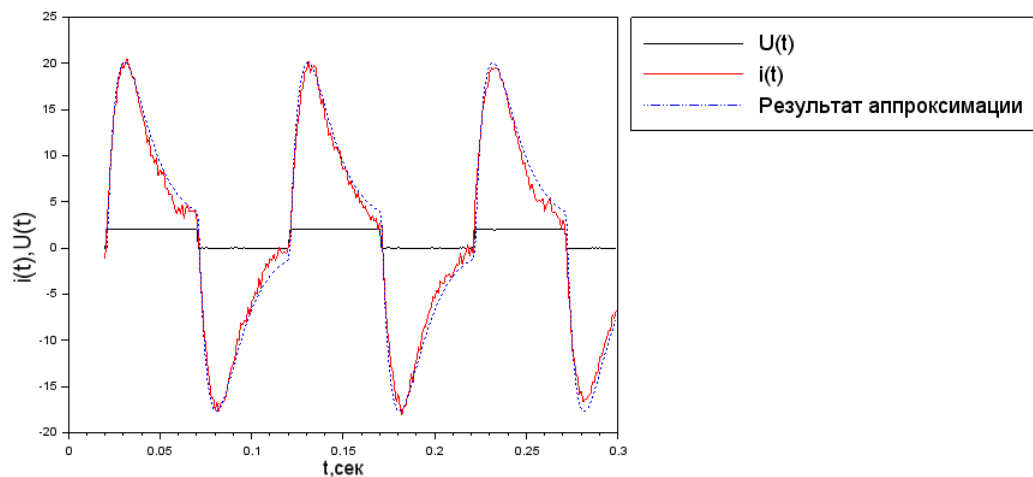


Рисунок 4.7. Переходные процессы для схемы рис. 1 а) вар. 4

Используя полученные экспериментальные кривые, а также замерив время отключения, в соответствии с предложенной выше методикой определим параметры схемы замещения, показанной на рисунке 4.1б. Параметры аппроксимационных выражений применительно к схеме замещения, показанной на рисунке 4.1а, приведены в таблице 4.1, а рассчитанные параметры схемы замещения, показанной на рисунке 4.1а, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.1. Коэффициенты аппроксимирующих выражений

№№	S1	S2	λ_1	λ_2	i_0
1	28.794255	31.494255	230.25851	550.94681	2.7
2	56.731084	61.831084	230.25851	328.0401	5.1
3	148.25101	150.95101	92.103404	128.80492	5.1
4	283.06558	285.76558	100.1124	119.35155	2.7

Таблица 4.2. Характеристики схемы рисунка 4.1 а замещения

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	$\tau_{откл}$, сек
1	478.087	270.475	29.9	727	0.0081
2	302.678	93.71	77.2	718	0.00723
3	144.681	303.367	169.1	713	0.0513
4	144.853	608.003	153	716	0.093

Погрешность расчетов по сравнению с опытными данными не превысила 10%.

Экспериментальные данные для схемы с двумя каскадами RLC (Рис. 4.1 б) представлены на рисунках 4.8-4.11.

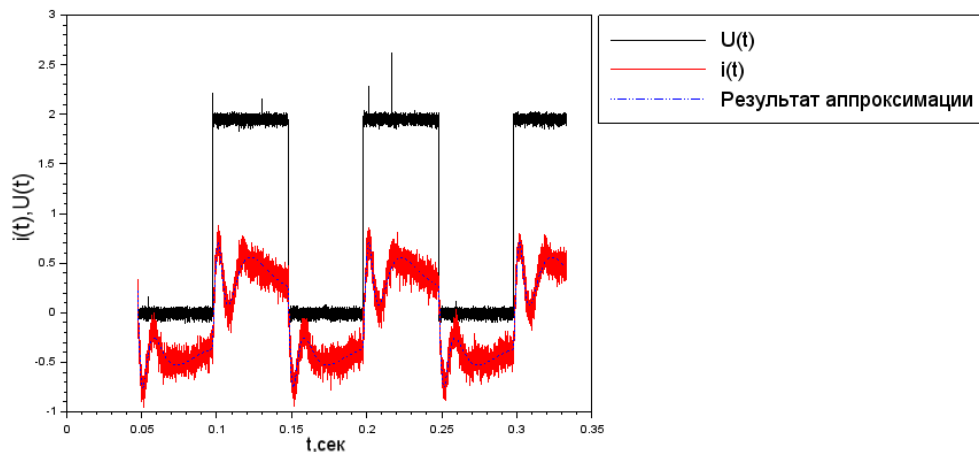


Рисунок 4.8. Переходные процессы для схемы рис. 4.1 б) вар. 1

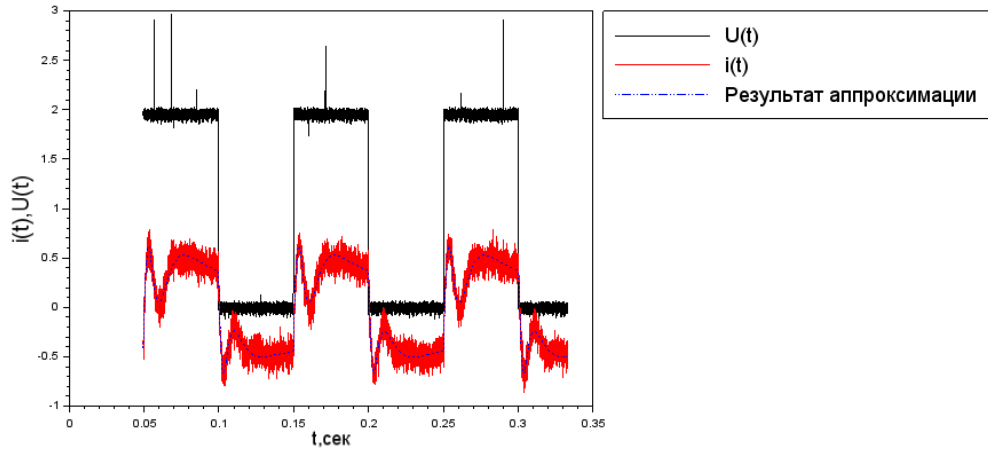


Рисунок 4.9. Переходные процессы для схемы рис. 4.1 б) вар. 2

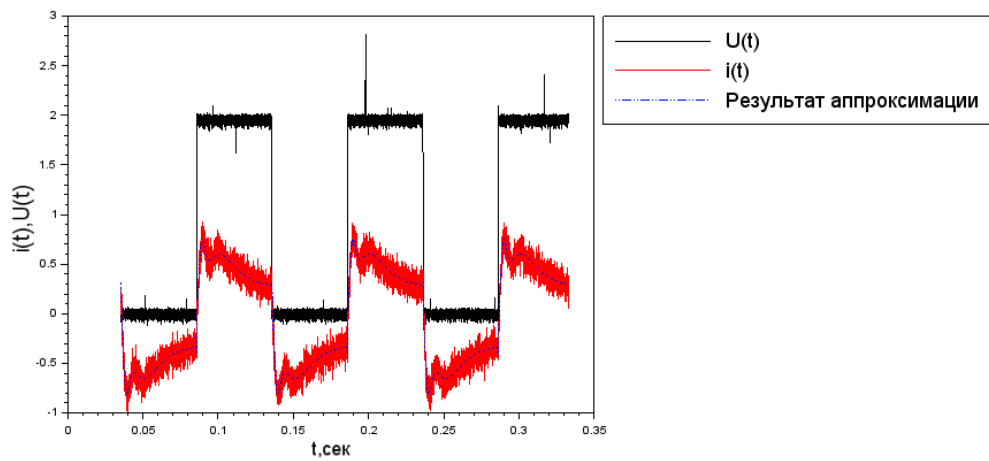


Рисунок 4.10. Переходные процессы для схемы рис. 4.1 б) вар.3

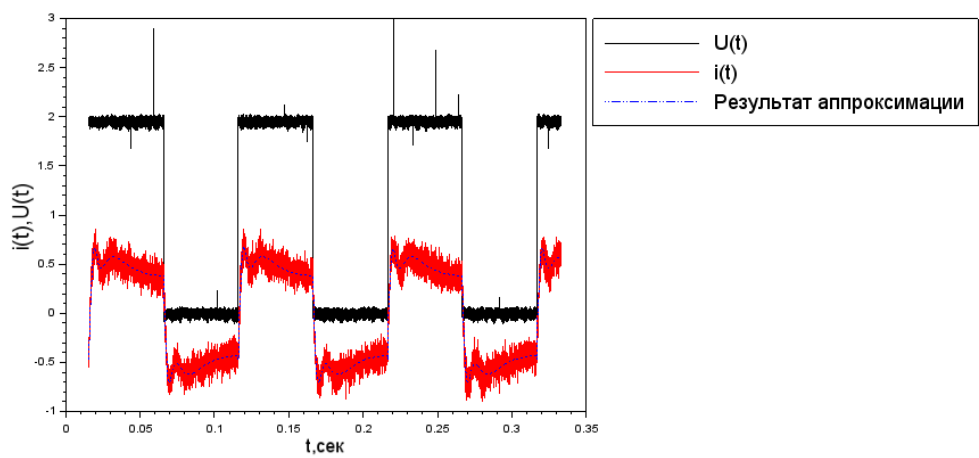


Рисунок 4.11. Переходные процессы для схемы рис. 4.1 б) вар. 4

Аналогичным образом рассчитанные из кривых тока параметры схемы замещения, показанные на рисунке 4.1б приведены в таблице 4.3, а времена отключения приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – Характеристики схемы рисунка 4.1б замещения

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	C2, мкФ	L2, мГн	Rн, Ом
1	8.854	65.293	326.107	7.171	227.021	947.075	1198.028
2	6.711	74.005	546.353	6.263	322.777	616.444	579.522
3	10.489	120.846	251.987	7.547	142.808	1308.697	637.011
4	14.974	446.613	222.259	12.732	212.189	5223.336	73.07

Таблица 4.4 – Постоянные времени отключения

Индекс кривой	tauOff1	tauOff2	tauOff3
1	0.03	0.04	0.07
2	0.01	0.07	0.09
3	0.02	0.03	0.05
4	0.01	0.03	0.06

С листингом программного приложения Scilab 6.1.1, реализующего данные расчеты можно ознакомиться в Приложении Б.

Для исследуемых переходных процессов получена цифровая модель, который представляет собой реализованную в компьютере математическую модель. Модель и результаты экспериментальных исследований, полностью подтверждает теоретические предположения о возможности диагностирования приёмников электрической энергии предложенным в диссертационной работе методом [132].

Выводы по 4 главе:

1. Предложенный в работе метод определения характеристик реактивных элементов в схеме замещения дает возможность расширить функциональные возможности интеллектуальных систем распределения

электрической энергии за счет добавления функционала диагностики и прогнозирования состояния входных каскадов вторичных источников питания, встроенных в авиационное оборудование.

2. Результаты экспериментальных исследований, полностью подтверждают теоретические предположения о возможности диагностирования приёмников электрической энергии предложенным в диссертационной работе методом.

3. Алгоритмы диагностирования можно строить на основе данных о мгновенных значениях тока и напряжения в переходных процессах, полученных экспериментально на борту летательного аппарата. Предложенный алгоритм определения характеристик схем замещения входных каскадов вторичных источников питания, встроенных в авиационное оборудование, являются математическим ядром цифрового двойника исследуемого оборудования для создания новых алгоритмов диагностирования. Такой цифровой двойник ввиду аналитического представления его модели легко реализовать в бортовом компьютере локальных центров управления нагрузками в системе распределения перспективных воздушных судов.

Выводы по работе

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.

Список использованной литературы

1. Авиационные правила Часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов, 2014 г.
2. Авиационные правила Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории, 2009 г.
3. Анализ и оптимизация диагностических процедур авиационного радиоэлектронного оборудования [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.igi-global.com/chapter/analysis-and-optimization-of-diagnostic-procedures-for-aviation-radioelectronic-equipment/263199>.
4. **Бабак А. В.** Анализ методов и средств технической диагностики авиационной техники – Текст научной работы г. Ульяновск 2018. – 31-34 с.
5. **Бабич О. А.** Обработка информации в навигационных комплексах. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
6. **Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Круг Б. И.** Основы теории цепей: Учебник для вузов; Под ред. В.П. Бакалова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. - С. 412-449.
7. **Барзилович, В. Ю.** Модели технического обслуживания сложных систем / В.Ю. Барзилович. - М.: Высшая школа, 1982. - 231 с.
8. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники, электрические цепи. Учебник для бакалавров 12-е издание, Москва 2016, стр. 112-114.
9. **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1996. - 638 с.
10. **Васенин А.Б.** Особенности применения методов мониторинга электрооборудования энергетических объектов/ Васенин А.Б. // статья в журнале Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2018.- № 8(109). - С.12-19.
11. **Васенин А.В.** Анализ методов диагностики и прогнозирования состояния ответственных энергетических установок. [Электронный ресурс]. -

Режим доступа: <https://chemtech.ru/analiz-metodov-diagnostiki-i-prognozirovaniya-sostojaniya-otvetstvennyh-jenergeticheskikh-ustanovok/>

12. **Васильев В.А., Гусев Ю.Б.** Автоматический контроль и диагностика систем управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.

13. Виды вторичных источников тока. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://lemzspb.ru/vidy-vtorichnykh-istochnikov-toka/>.

14. **Волкова В. Н.** Теория систем / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. М.: Высшая школа, 2006 – 511 с.

15. **Воробьев В.Г.** Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования: учебник / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов. М.: МГТУ ГА, 2010. 448 с.

16. **Воробьев В. Г., Глухов В. В., Козлов Ю. В., Константинов В. Д., Синдеев И. М.** Учебное пособие для вузов гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1984. – 191с.

17. Встроенный контроль цифровых систем [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9135227/page:14/>

18. Вторичный источник электропитания. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Вторичный_источник_электропитания.

19. **Гализдра В.И.** Нейронные сети и аппроксимация данных / В.И. Гализдра, Ш.Б. Бабаев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. - 2011. - № 3. - С. 35.

20. **Горбань А.Н.** Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А.Н. Горбань // Сибирский журнал вычислительной математики. - 1998. - Т. 1, № 1. - С. 11.

21. **Горбунов В.П.** Метод поддержания летной годности воздушных судов с бортовым цифровым комплексом в условиях экстремально низких температур: автореферат диссертации канд. тех. наук: 05.22.14; [Место защиты: МГТУ ГА]. — М., 2018. — 22 с.

22. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
23. ГОСТ 20417-75. Техническая диагностика. Общие требования к объектам диагностирования.
24. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009.
25. ГОСТ 23564-79. Техническая диагностика. Показатели диагностирования.
26. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.
27. ГОСТ 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Дата введения 01.01.2022.
28. ГОСТ Р 54073-2017 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Изд-во стандартов, 2017.
29. ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573114585>.
30. **Грузков С. А., Румянцев М. Ю.** Полная электрификация воздушных судов как один из важнейших способов решения экологических проблем и повышения эксплуатационной, экономической и топливно-энергетической эффективности воздушного транспорта. Вестник Академии электротехнических наук Российской Федерации. Выпуск 18, 2016, стр. 35-60.
31. **Джейкокс Дж.** Руководство по поиску неисправностей в электронной аппаратуре. Перевод с англ. – М.: Мир, 1989. - 176с.
32. Диагностика энергетического оборудования реферат [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://obrazovanie-gid.ru/referaty/diagnostika-energeticheskogo-oborudovaniya-referat.html>.

33. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования: учеб. пособие для вузов гражд. авиации / под ред. И.М. Синдеев. М.: Транспорт, 1984. 191с.

34. **Дмитриев В.М.** Применение метода импедансного анализа для оценки технического состояния компонентов систем электроснабжения. Электропитание. 2020 год. № 3. с. 4-10.

35. **Дмитриков В.Ф., Исаев В.М., Колосов В.А., Смольников Л.Е.** Основные пути развития принципов построения современных систем электроснабжения промышленного и специального назначения. Электропитание. 2016. № 4. стр. 5-8.

36. **Дурнев В.В., Мухин И.Е., Селезнев С.Л., Мирзаянов Ф.М.** Основные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов. Инновации № 9 (191), 2014 стр. 110-113.

37. **Е.А. Сысоева** Национальный стандарт Российской Федерации в области цифровых двойников // Компетентность / Competency (Russia) – 2022.- №3. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-3-10-13.

38. **Ергалиев, Д.С.** Аналитические основы контроля и диагностирования систем воздушных судов гражданской авиации [Текст] / Д.С. Ергалиев // Сб. научн. Трудов Международного симпозиума «Надежность и качество», I том. – Пенза: ИПО ПГУ, 2007. – С.23–24.

39. **Ергалиев, Д.С.** Интеллектуальные системы оценки состояния бортовых комплексов оборудования [Текст] / Д.С. Ергалиев, А.Н. Коптев, К.Ж. Саханов // Сб. научн. трудов Международного симпозиума «Надежность и качество», I том. – Пенза: ИПО ПГУ, 2008. – С.444–446. 7.

40. **Жмуров Б.В.** Перспективы развития электроэнергетических систем беспилотных летательных аппаратов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий, No 1, 2010, С. 231-234.

41. **Жмуров Б.В.** Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект автоматизации. Научный вестник МГТУ ГА, Том: 21, Номер: 1, 2018, С. 88-103.

42. **Зиборов С. Р.** Синтез линейных радиотехнических дисциплин: Учебное пособие / С. Р. Зиборов. — Севастополь, Изд-во СевНТУ, 2013. — 92 с.

43. **Иванов Ю.П., Никитин В.Г., Чернов В.Ю.** Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов. Учеб. Пособие/СПбГУАП. СПб., 2004. 98с.

44. Информационно-диагностические системы встроенного контроля состояния воздушных судов // Программные системы и вычислительные методы. – 2014. – № 4. – С. 437 - 445. DOI: 10.7256/2454-0714.2014.4.13995 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=13995

45. Исследование катушек индуктивности [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://gigabaza.ru/doc/32133-pall.html>

46. **Калистратов Т.А.** Методы и алгоритмы создания структуры нейронной сети в контексте универсальной аппроксимации функций / Т.А. Калистратов // Вестник ТГУ. -2019. - Т.19, вып.6. - С. 1845.

47. **Кечин А.В.** Организация электроснабжения приемников первой категории перспективных воздушных судов гражданской авиации / А.В. Кечин, А.В. Левин, С.П. Халютин, Б.В. Жмуров // Научный вестник московского государственного технического университета гражданской авиации. - 2018. - Т. 21. - № 6. - С. 54.

48. Классификация приемников электрической энергии [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2687584/page:7/>.

49. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

50. **Колодежный, Л.П.** Надежность и техническая диагностика / Л.П. Колодежный, А.В. Черnodаров. - М.: ВУНЦ ВВС ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. - 452 с.
51. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. – 832с.
52. **Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, ГРФМЛ, 1985, 640с.
53. **Крюков О.В.** Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга//Дис. д-ра техн. наук. М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». 2015.
54. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации бортовых комплексов и функциональных систем авионики / С.В. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. - 2017. - Т. 20, № 1. - С. 132.
55. **Кузнецов С.В.** Определение аналитических функций интенсивности отказов и вероятности безотказной работы пилотажно-навигационного оборудования по статистическим данным / С.В. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. - 2012. - № 185. - С. 19.
56. **Лёвин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В.** Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, Vol. 213 (3), 2015. pp. 50–57.
57. **Левин А.В.** Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования / А.В. Левин, С.П. Халютин, А.О. Давидов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. - 2015. - № 213(3). - С. 50.
58. **Левин А.В.** Электрический самолет: концепция и технологии / А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалев, А.А. Герасин, С.П.

Халютин. - Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2014. - 388 с.

59. **Логвин А.И. Гончаров А.В.** Поддержание заданного уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 189. - С. 48-50.

60. **Майская Е.Р., Гончаров А.В.** Мониторинг текущего уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2012. - № 185. - С. 48-55.

61. **Макаровский И.М.** Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники: Учеб. пособие / Самар. Гос. Аэрокосм. Ун-т. Самара, 2004. 116 с.

62. **Машошин О.Ф.** Диагностика авиационной техники: учеб. Пособие. М.: МГТУ ГА, 2007. 141с.

63. **Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В.** Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта//Автоматизация в промышленности. 2010. №8. С. 47–49.

64. Особенности долговременного хранения и консервации конденсаторов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://russianelectronics.ru/hranenie/>

65. Отчет НИИАО № 116-85-УП о НИР «Разработка альтернативных вариантов облика СЭС тяжелого и легкого полностью электрифицированных самолетов» / Госрегистр № Х74077. - 1985.

66. **Передельский Г. И., Диденко Ю. В.** Свойства частотно-независимых двухполюсников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. №2 (219). С. 110-118.

67. Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Измерительная техника. - 2014. - № 12. - С. 47-51.

68. **Прилепский В.А.** Контроль состояния и диагностирование неисправностей авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов. Учеб. Пособие / В.А. Прилепский, А.Н. Коптев. Минобрнауки.

69. Разница между Airbus A380 и Boeing 787 Dreamliner. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://ru.strephonsays.com/airbus-a380-and-vs-boeing-787-dreamliner-2718>.

70. Разработка демонстратора системы контроля, диагностики, прогнозирования технического состояния потребителей электроэнергии. Отчет о НИР, МГТУ ГА, 2018. 120 с.

71. **Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В.** Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5. № 1. С. 66-72.

72. **Савелов А.А.** Применение локальных центров управления нагрузками для контроля приемников электроэнергии. Электропитание. 2018. № 1. С. 4-13.

73. **Савелов А.А.** Расчет импульсных источников питания устройств авионики. Москва, 2015.

74. **Савелов А.А., Давидов А.О.** “Экспериментальные исследования локальных блоков управления питанием для мониторинга состояния электрооборудования” // Электроснабжение. 2019. № 2. С. 6-21.

75. **Саидумаров, И. М.** Системы встроенного контроля для интегрированного комплекса авионики / И. М. Саидумаров, А. А. Умаров. — Текст : непосредственный // Технические науки в России и за рубежом : материалы V Междунар. науч. конф. (г. Москва, январь 2016 г.). — Москва : Буки-Веди, 2016. — С. 15-17. — URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/164/9443/> (дата обращения: 04.04.2023).

76. **Сансоне, Дж.** Обыкновенные дифференциальные уравнения: монография / Дж. Сан-соне. - М.: Издательство иностранной литературы, 1953. - 346 с.

77. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 496с.

78. Системы электроснабжения воздушных судов: [Учеб. для вузов гражд. авиации] / И. М. Синдеев, А. А. Савелов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Транспорт, 1990. - 295 с. : ил.; 21 см. - (Высш. образование. Учеб.); ISBN 5-277-00989-2 (В пер.): 95 к.

79. **Смирнов, Н.Н.** Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов / Н.Н. Смирнов, Ю.М. Чинючин. - М.: Издательство МГТУ ГА, 2015. - 505 с.

80. **Сохинов, Д.Ю.** Надежность функционирования электрических систем/ Д.Ю. Сохинов, О.В. Логачёва // В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК, материалы X Международной научнопрактической конференции. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2019.

81. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей: централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов : практическое пособие : [16+] / ред. А. Н. Назарычев. – Москва : Инфра-Инженерия, 2006. – 928 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=70526> (дата обращения: 02.05.2023). – ISBN 5-9729-0004-1. – Текст: электронный.

82. Старение конденсаторов и их замена [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://radiostorage.net/2057-starenie-kondensatorov-i-ih-zamena.html>

83. Старение материалов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.obzh.ru/nad/3-10.html>

84. **Старостин И.В.** Научные основы оценивания работоспособности перспективных авиационных химических источников электрической энергии для поддержания летной годности воздушных судов» / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Московский государственный технический университет МГТУ ГА, 2021. - 32 с.

85. **Старостин, И.Е.** Программная реализация на базе СКМ Scilab методологии построения математической модели системы из уравнений физико-химических процессов в ней / И.Е. Старостин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». - 2020. - Т. 1. - С. 41.

86. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 509 с.

87. **Титов А.А.** “Метод предельных состояний. Символьный анализ электрических цепей”. Военно-воздушная инженерная академия имени профессора Н.Е. Жуковского. 2009.

88. **Улахович Д.А.** Основы теории линейных электрических цепей: Учеб. пособие. БХВ-Петербург 2009, 816с.

89. Факторы нагрузки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5996807/page:25/>.

90. **Фаянс А.М.** Возможности выявления полного множества структур однозначно разрешимых многоэлементных двухполюсников, состоящих из элементов двух типов // Датчики и системы. 2013. №1. С. 16-22.

91. **Фаянс А.М.** Возможности определения параметров объектов, представимых в виде многоэлементных RLC – двухполюсников // Технические и программные средства систем управления, контроль и измерения УКИ-10: Труды Рос. Конф. с междун. Участием. ИПУ РАН. М., 2010. С. 236-237.

92. **Фаянс А.М.** Выявление условий однозначного определения параметров объекта, представленного в виде многоэлементного двухполюсника. Измерительная техника № 7, 2017. стр. 26-30.

93. **Халютин С. П.** Объектно-энергетический метод конструирования моделей энергетических систем. Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 24–28.

94. **Халютин С.П.** «Авиационная система распределения электроэнергии – центр диагностики и прогнозирования оборудования» Электропитание. 2020. № 2. стр. 4-14.

95. **Халютин С.П.** Теоретические основы электротехнического оборудования воздушных судов [Текст]: тексты лекций / С.П. Халютин, А.А. Титов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2020. – 160 с.

96. **Халютин С.П.** Новые возможности самолетов на электрической тяге / С.П. Халютин, О.С. Халютина // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». - Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2017. - С. 291.

97. **Халютин С.П.** Определение параметров схемы замещения потенциально-потоковой модели никель-кадмиевого аккумулятора методом гидроокисных пленок / С.П. Халютин, И.Е. Старостин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 2: в 2 т. - 2011. - Т. 2. - С. 318.

98. **Халютин С.П.** Оценка удельных свойств энергосистем самолетов на электрической тяге / С.П. Халютин, А.О. Давидов // Электропитание. - 2019. - № 2. - С. 43.

99. **Халютин С.П.** Размышления о возможности электрификации самолетов / С.П. Халютин, А.О. Давидов // Труды научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии «ИНФО-2017». - М.: МИРЭА-Российский технологический университет, 2017. - С. 28.

100. **Халютин С.П.** Системы электроснабжения летательных аппаратов / С.П. Халютин, М.Л. Тюляев, Б.В. Жмуров, В.В. Иванов, В.А. Савенко, С.М. Мусин. - М.: Издательство ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010. - 428 с.

101. **Халютин С.П.** Электрификация летательных аппаратов - от ПЕ-2 до полностью электрического самолета. Направления и исследования / С.П. Халютин // Электропитание. - 2018. - № 4. - С. 4.

102. **Халютин С.П.** Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания / С.П. Халютин, А.О. Давидов, Б.В. Жмуров // Электричество. - 2017. - № 9. - С. 4.

103. **Халютин С.П.** Энергетика электрического самолета / С.П. Халютин // Труды научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии «ИНФО-2016». - М.: МИРЭА-Российский технологический университет, 2016. - С. 25.

104. **Харьков В.П.** Адаптивное управление динамической системой на основе обратных задач динамики / В .П. Харьков // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 1. - Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2016. - С. 176.

105. **Царев М.В., Андреев Ю.С.** Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. – 2021 – Т.64. - № 7.

106. **Чернодаров А.В.** Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. – М.: Научтехлитиздат, 2017. – 300с.

107. **Чинючин Ю.М.** Проблемы совершенствования системы поддержания летной годности воздушных судов [Текст]// Ю.М. Чинючин, Н.Н. Смирнов, В.С. Кирдюшкин//М. Научный вестник МГТУ ГА. Выпуск №178. – МГУ ГА, 2012. – С. 7-12.

108. **Чинючин Ю.М.** К задачам поддержания летной годности воздушных судов на основе мониторинга их ресурсного состояния / Ю.М. Чинючин, Н. Ойдов // Научный вестник МГТУ ГА. - 2017. - Т. 20, № 3. - С. 110.

109. **Чинючин Ю.М.** Моделирование работоспособности объектов авиационной техники на длительный период эксплуатации / Ю.М. Чинючин, В.В. Воробьев, Е.Д. Герасимова // Авиационная промышленность. - 2019. - № 2. - С. 10.

110. A Novel Modelling Approach of RLC Electrical Circuits for Symbolic Circuit Analysis by the Direct Topological Method. Abderrahmane Euldji,

Abderrahim Tienti & Amine Boudghene Stambouli. Arabian Journal for Science and Engineering volume 45, pages1897–1909(2020)

111. **A.A. Savelov, N.A. Simankov, V.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), 2021, pp. 104-109, doi: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628347

112. **Al-Taee, M.A.; Al-Naima, F.M.; Al-Jewad, B.Z.**: Optimised sparse storage mode for symbolic analysis of large networks. Adv. Eng. Softw. 38,112–120 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.07.002>

113. Avionics Technology: Diagnostic Tools for Next Generation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aviationpros.com/tools-equipment/inspection-testing/article/10357826/avionics-technology-diagnostic-tools-for-the-next-generation>.

114. **Bierman G.J.** Factorization methods for discrete sequential estimation. – N.Y.: Academic Press, 1977. – 320p.

115. **Cybenko, G.V.** Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function / G.V. Cybenko // Mathematics of Control Signals and Systems. - 1989. - Т. 2, № 4. - С. 303.

116. Esterline Power Systems. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.esterline.com.

117. **Fernandez, F.V.; Rodríguez-Vázquez, Á.; Huertas, J.L.; Gielen, G.G.E.**: Symbolic Analysis Techniques. Wiley, New York (1998)

118. **Gielen, G.; Wambacq, P.; Sansen, W.M.**: Symbolic analysis methods and applications for analog circuits: a tutorial overview. Proc. IEEE 82, 287–304 (1994). <https://doi.org/10.1109/5.265355>

119. **Kailath T.** An innovations approach to least squares estimation. Part 1: Linear filtering in additive white noise // IEEE Trans. on Automatic Control, 1968, Vol. 13, № 6. pp. 646–655.

120. **Kuznetsov, S.V.** Avionics technical operation system and scientific basis for its formation / S.V. Kuznetsov // Qvil Aviation High Technologies. - 2017. - V. 20, № 6. - P. 15.

121. **Makarov, D.V., Kharitonov, S.A., Yukhnin, M.M.** Study of the power generating system with variable frequency and amplitude being maintained based on permanent magnets synchronous machine and voltage source inverter (2012) Technical Electrodynamics (3) PP. 65–66.

122. MatLab/Simulink [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://matlab.ru/products/Simulink>.

123. MDT (Maintenance Diagnostic Tables) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://portal.rockwellcollins.com/web/support-self-service/mdt-maintenance-data-tables->

124. **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.

125. **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.

126. **Punt, E.A., Khalyutin, S.P., Davidov, A.O.** “Analysis of tasks of forming thermal imaging of electrical devices”. 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering, PIERE 2020, 2020, стр. 104–107, 09314647

127. Scilab/Xcos [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.scilab.org/software/xcos>.

128. **Simankov, N.A., Savelov, A.A., Davidov, A.O.** «Possibility of aircraft electrical equipment diagnostics by the local load control units». International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2020-June, стр. 318–323.

129. **Suoc, H.:** Direct topological method for analysis of networks without magnetic coupling. Arch. Electrotech. Wars. 22(2), 387–405 (1974)

130. **Suoc, H.:** Direct topological method of network analysis. PhD thesis, Institute of Electronic Systems, Faculty of Electronics and Information Technology, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland. <http://www.ise.pw.edu.pl/Dzialalnosc-naukowa/Doktoraty> (1974). Accessed June 2018

131. **Zhanhai, Q.; Chung-Kuan, C.; Sheldon, X.D.T.:** Symbolic Analysis and Reduction of VLSI Circuits. Springer, Boston (2005)

132. **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.

133. **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.

134. **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.

135. **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.

136. **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. C. 109-117.

Приложения

Листинг программного приложения Scilab 6.1.1 «Определение чувствительности изменения контролируемых параметров R, L, C от измеренных»

```

0001 Path = get_absolute_file_path("AW1.sce");
0002
0003 //Имя файла данных
0004 datasFileName = "datas1.csv";
0005 paramsFileName = "datas1par.csv";
0006
0007 //Амплитуды шумов
0008 ampNoises = [0.0:0.1:20.1];
0009
0010 //Через сколько позиций строим график
0011 stepPlot = 15;
0012
0013 //Размеры графиков амплитудно-частотных характеристик
0014 ACHKHSize = [800, 500];
0015
0016 //Размеры графиков относительных погрешностей
0017 RefErrorSize = [850, 600];
0018
0019 //Считываем данные
0020 [datas,..//Получаемые из файла данные
0021  datasHeaders..//заголовок получаемых из файла данных
0022  ]=CSVFromFileToDatas(%t,fullfile(Path,datasFileName),","," ",",,%f);
0023
0024 //Вычлняем исходные параметры
0025 [params,..
0026  paramsHeaders] = SelectionDatas(datasHeaders,..
0027                                ['C1','C2','L1','L2','R1','R2','R3'],..
0028                                datas);
0029 params = unique(params,'r');
0030 params = evstr(params);
0031
0032 //Вычлняем амплитуду и частоту
0033 [datas,..
0034  datasHeaders] = SelectionDatas(datasHeaders,..
0035                                ['w','АЧХ(w)'],..
0036                                datas);
0037
0038 //Убираем последнюю строку
0039 datas($,:) = [];
0040 datas = evstr(datas);
0041
0042 //Рассчитываем относительные погрешности (от зашумлений)
0043 datasAmp = SelectionDatas(datasHeaders,"АЧХ(w)",datas); //Вычлняем амплитуду
0044 meanAmp = mean(datasAmp); //Усредняем амплитуду по всем частотам
0045 refAmpNoises = ampNoises*100 / meanAmp; //Получаем относительные погрешности
0046
0047 //Начальные значения
0048 C1_0 = 0.01;
0049 C2_0 = 0.001;
0050 L1_0 = 0.01;
0051 L2_0 = 0.01;
0052 R1_0 = 0.1;

```

```

0053 R2_0 = 1.0;
0054 R3_0 = 100;
0055 p0 = [C1_0;C2_0;L1_0;L2_0;R1_0;R2_0;R3_0];
0056
0057 //Обрабатываем данные
0001 function [ACHH]=fACHH(omega, C1, C2, L1, L2, R1, R2, R3)
0002     //Переводим единицы измерения
0003
0004     //Рассчитываем параметры
0005     a = C1*C2*L2*(R3^2);
0006     b = C1*L2*R3 + C1*C2*R2*R3^2;
0007     c = C1*R2*R3 + C2*R3^2 + C1*R3^2;
0008     d = C1*C2*L1*L2*R3;
0009     f = C1*C2*L2*R1*R3 + C1*L1*L2 + C1*C2*L1*R2*R3;
0010     e = C1*L1*R2 + C1*L2*R1 + C1*L1*R3 + C2*L1*R3 + C2*L2*R3 + C1*C2*R1*R2*R3;
0011     g = C1*R1*R3 + L2 + L1 + C1*R1*R2 + C2*R1*R3 + C2*R2*R3;
0012
0013     //Получаем передаточную функцию
0014 KPF = (-(omega.^3)*a*%i - (omega.^2)*b + omega*c*%i + R3) ./ ((omega.^4)*d - (omega.^3)*f*%i -
(omega.^2)*e + omega*g*%i + R1 + R2 + R3);
0015
0016     //Получаем амплитудно-частотную характеристику
0017     АСНН = abs(KPF);
0018 endfunction
0076
0077 //Создаем директорию графиков
0078 АСНКНDir = fullfile(Path,'АЧХ(w)');
0079 mkdir(АСНКНDir);
0080
0081 //Высчитываем при разных зашумлениях
0082 for ampNoise=ampNoises
0083     //Зашумляем
0084     _datas = datas;
0085     _datas(:,2) = _datas(:,2) + ampNoise*(2*rand(_datas(:,2),'u') - 1);
0086
0087     //Определяем параметры
0001     function e=G(p, Datas)
0002         //Вычисляем невязку
0003         e = Datas(2,:) - fACHH(Datas(1,:),p(1),p(2),p(3),p(4),p(5),p(6),p(7));
0004     endfunction
0092     p = datafit(G,_datas',p0);
0093
0094     //Получаем искомые параметры
0095     C1 = p(1);
0096     C2 = p(2);
0097     L1 = p(3);
0098     L2 = p(4);
0099     R1 = p(5);
0100     R2 = p(6);
0101     R3 = p(7);
0102
0103     //Строим графики
0104     pos = find(ampNoise == ampNoises);
0105     if modulo(pos - 1,stepPlot) == 0 then
0106         //Рисуем график
0107         omega = _datas(:,1);
0108         amp = _datas(:,2);
0109         camp = fACHH(omega,C1,C2,L1,L2,R1,R2,R3);
0110         numPlot = floor((pos - 1) / stepPlot) + 1;
0111         f = scf(numPlot);
0112         f.figure_size = АСНКНSize;
0113         set('current_figure',f);
0114         xgrid(0,1,7); //Добавляем сетку
0115         xtitle('Сопоставление расчета с экспериментом','Частота','Амплитуда');
0116         plot2d(omega,amp,-1);
0117         plot2d(omega,camp,3);
0118         legend(['Измерение','Расчет'],-1);
0119
0120         //Сохраняем график в файл
0121         plotFile = fullfile(АСНКНDir,'АСНКН_' + string(numPlot) + '.jpg');//Полное имя
графикескогофайла
0122         xs2jpg(numPlot,plotFile);
0123     end
0124
0125     //Добавляем параметры
0126     params = [params;..
0127             C1,C2,L1,L2,R1,R2,R3];
0128 end

```

```

0129
0130 //Добавляем зашумленность
0131 [parameters,..
0132   parametersHeaders] = AddDatas([0.0;ampNoises'],parameters,..
0133   "Error",parametersHeaders,"c");
0134 [parameters,..
0135   parametersHeaders] = AddDatas([0.0;refAmpNoises'],parameters,..
0136   "Ref Error",parametersHeaders,"c");
0137
0138 //Выводим в csv-файл
0139 DatasToCSVFile(parameters,parametersHeaders,%t,fullfile(Path,parametersFileName),";","");
0140
0141 //Построим график параметров
0142 numScf0 = size(refAmpNoises,'*');//Начальный номер графического окна
0143 f = scf(numPlot + 1);
0144 f.figure_size = RefErrorSize;
0145 set('current_figure',f);
0146 xgrid(0,1,7);//Добавляем сетку
0147 xtitle('Относительная погрешность определения параметров','Относительная погрешность
  параметра','Относительная погрешность амплитудно-частотной характеристики');//Добавляем заголовок
0148 parameters0 = SelectionDatasSubset(parameters,1);
0149 parameters = parameters(2:$,:);
0150 C1 = SelectionDatas(parametersHeaders,'C1',parameters);
0151 C1_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'C1',parameters0);
0152 plot2d(refAmpNoises',abs(C1 - C1_0)*100 / C1_0,color(0,0,0));
0153 C2 = SelectionDatas(parametersHeaders,'C2',parameters);
0154 C2_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'C2',parameters0);
0155 plot2d(refAmpNoises',abs(C2 - C2_0)*100 / C2_0,color(0,255,0));
0156 L1 = SelectionDatas(parametersHeaders,'L1',parameters);
0157 L1_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'L1',parameters0);
0158 plot2d(refAmpNoises',abs(L1 - L1_0)*100 / L1_0,color(255,0,0));
0159 L2 = SelectionDatas(parametersHeaders,'L2',parameters);
0160 L2_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'L2',parameters0);
0161 plot2d(refAmpNoises',abs(L2 - L2_0)*100 / L2_0,color(0,0,255));
0162 R1 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R1',parameters);
0163 R1_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R1',parameters0);
0164 plot2d(refAmpNoises',abs(R1 - R1_0)*100 / R1_0,color(128,0,0));
0165 R2 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R2',parameters);
0166 R2_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R2',parameters0);
0167 plot2d(refAmpNoises',abs(R2 - R2_0)*100 / R2_0,color(0,0,64));
0168 R3 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R3',parameters);
0169 R3_0 = SelectionDatas(parametersHeaders,'R3',parameters0);
0170 plot2d(refAmpNoises',abs(R3 - R3_0)*100 / R3_0,color(128,0,255));
0171 legend(['C1','C2','L1','L2','R1','R2','R3'],-1);
0172
0173 //Сохраняем графики в файл
0174 plotFile = fullfile(Path,'Reference errors.jpg');//Полное имя графического файла
0175 xs2jpg(numPlot + 1,plotFile);
0176
0177 //Закрываем при необходимости графические окна
0178 if ~or(input('Закреть графические окна графиков амплитудно-частотных характеристик? (Y/
  N)','s') == ['N','n']) then
0179   close([1:numPlot]);
0180 end
0181 if ~or(input('Закреть графические окна графиков ошибок? (Y/N)','s') == ['N','n']) then
0182   close(numPlot + 1);
0183 end

```

Листинг программного приложения Scilab 6.1.1 «Экспериментальные исследования переходных процессов схемы замещения входных цепей вторичного источника питания»

```

0001 //Индекс данных
0002 indDatas = 2;
0003
0004 //Параметры кривой
0005 tuston = 0.375; //Время релаксации
0006 tustoff = 0.435; //Время релаксации
0007 Pow = 21;
0008
0009 //Времена релаксации при отключении
0010 tauOff1 = 0.01;
0011 tauOff2 = 0.03;
0012 tauOff3 = 0.06;
0013
0014 //Путь к файлам
0015 Path = get_absolute_file_path("Approximate.sce"); 0016
0017 //Имя файла данных
0018 inputDatasFile = "Input voltage " + string(indDatas) + ".csv";
0019 outputDatasFile = "Output voltage " + string(indDatas) + ".csv";
0020
0021 //Считываем данные
0001 function [timeData, voltageData]=ReadDatas(datasFile)
0002     //Считываем данные из csv-файлов
0003     [datas,..
0004     datasHeaders]=CSVFromFileToDatas(%t,datasFile,";",",",",",%f);
0005     [timeData,..
0006     voltageData]=InputOutputDataSplit(datasHeaders,datas,"Time","Voltage");//Выделяем напряжение
и время
0007
0008     //Парсим данные
0009     timeData = evstr(timeData); //Переводим время в число
0010     strVoltageData = voltageData;
0011     voltageData = [];
0012     for strVolt=matrix(strVoltageData,1,-1)
0013         //Парсим напряжение
0014         endStrVolt = part(strVolt,$); //Конец строки напряжений
0015         if part(strVolt,$) == "m" then
0016             Volt = evstr(part(strVolt,1:($-1))) / 1e3;
0017         elseif part(strVolt,$) == "u" then
0018             Volt = evstr(part(strVolt,1:($-1))) / 1e6;
0019         elseif part(strVolt,$) == "n" then
0020             Volt = evstr(part(strVolt,1:($-1))) / 1e9;
0021         else
0022             Volt = evstr(strVolt);
0023         end
0024
0025         //Добавляем в ланные напряжений
0026         voltageData = [voltageData;Volt];
0027     end
0028 endfunction
0050
0051 //Считываем данные
0052 [inTimeData,inVoltageData]=ReadDatas(fullfile(Path,inputDatasFile));

```

```

0053 [outTimeData,inCurrentData]=ReadDdatas(fullfile(Path,outputDdatasFile));
0054
0055 //Приводим данные к одной временной сетке
0056 inCurrentData = interp1(outTimeData,inCurrentData,inTimeData,"spline","extrap");
0057
0058 //Напряжение включения
0059 switchVoltage = zeros(inVoltageData);
0060 switchVoltage(inVoltageData > (max(inVoltageData) + min(inVoltageData)) / 2) = 1;
0061
0062 //Удаляем битый участок
0063 for ind=1:(size(switchVoltage,"*") - 1)
0064     if switchVoltage(ind) ~= switchVoltage(ind + 1) then
0065         deleteInd = ind;
0066
0067         break;
0068     end
0069 end
0070 if deleteInd > 1 then
0071     deleteInd = deleteInd - 1;
0072 end
0073 switchVoltage(1:deleteInd) = [];
0074 inTimeData(1:deleteInd) = [];
0075 inCurrentData(1:deleteInd) = [];
0076 inVoltageData(1:deleteInd) = [];
0077
0078 //Выделяем включение и выключение
0079 inTime = inTimeData(2:$);
0080 for ind=2:size(switchVoltage,"*")
0081     if switchVoltage(ind) ~= switchVoltage(ind - 1) then
0082         inTimeData(ind:$) = inTimeData(ind:$) - inTimeData(ind);
0083     end
0084 end
0085 inTimeData(1) = []; //Удаляем первый символ
0086 switchVoltage(1) = []; //Удаляем первый символ
0087 inVoltageData(1) = []; //Удаляем первый символ
0088 inCurrentData(1) = []; //Удаляем первый символ
0089 switchOnTimeData = inTimeData(switchVoltage > 0.5); //Моменты времени включения
0090 switchOffTimeData = inTimeData(switchVoltage < 0.5); //Моменты времени выключения
0091 switchOninCurrentData = inCurrentData(switchVoltage > 0.5); //Ток в моменты включения
0092 switchOffinCurrentData = inCurrentData(switchVoltage < 0.5); //Ток в моменты отключения
0093
0094 //Аппроксимирующая функция
0001 function [iC, npt]=fIC(pt, Pow)
0002     npt = size(pt,"*");
0003     pows = repmat([0:Pow],[npt,1]);
0004     iC = repmat(pt,[1,Pow + 1]).^pows;
0005 endfunction
0001 function [i]=fI(pC, pt, Pow)
0002     [iC,npt]=fIC(pt,Pow);
0003     pC = repmat(pC,[npt,1]);
0004     i = sum(iC .* pC,"c");
0005 endfunction
0001 function [pt, lambda]=fpt(t, tust)
0002     lambda = 30 / tust;
0003     pt = exp(-lambda*t);
0004 endfunction
0001 function [i]=fIn(i0, C1, C2, C3, C4, lambda1, lambda2, lambda3, lambda4, t, tauSc, n)
0002 i = C1*((-lambda1*tauSc)^n)*exp(-lambda1*t) - C2*((-lambda2*tauSc)^n)*exp(-lambda2*t) +
+C3*((-lambda3*tauSc)^n)*exp(-lambda3*t) - C4*((-lambda4*tauSc)^n)*exp(-lambda4*t);
0003     if n == 0 then
0004         i = i + i0;
0005     end
0006 endfunction
0001 function [i, i0, lambda1, lambda2, lambda3, lambda4, C1, C2, C3, C4]=fIp(iet, t, tust, Pow)
0002     //Замененное время
0003     t = matrix(t,-1,1);
0004     [pt,lambda] = fpt(t,tust);
0005
0006     //Определяем коэффициенты
0007     allIC = fIC(pt, Pow);
0008     pC = linsolve(-allIC'*allIC,allIC'*matrix(iet,-1,1)');
0009
0010     //Получаем lambdas
0011     indPow = [1:Pow];
0012     i0 = pC(1);
0013     pCVar = pC(2:$);
0014     indPowNeg = indPow(pCVar < 0);
0015     indPowPos = indPow(pCVar > 0);

```

```

0016     pCVarNeg = pCVar(pCVar < 0);
0017     pCVarPos = pCVar(pCVar > 0);
0018     [a,bIndNeg] = max(indPowNeg(2:$) - indPowNeg(1:($-1)));
0019     [a,bIndPos] = max(indPowPos(2:$) - indPowPos(1:($-1))); clear a;
0020     indPowNegB = indPowNeg(1:bIndNeg);
0021     indPowNegE = indPowNeg((bIndNeg+1):$);
0022     indPowPosB = indPowPos(1:bIndPos);
0023     indPowPosE = indPowPos((bIndPos+1):$);
0024     pCVarNegB = pCVarNeg(1:bIndNeg);
0025     pCVarNegE = pCVarNeg((bIndNeg+1):$);
0026     pCVarPosB = pCVarPos(1:bIndPos);
0027     pCVarPosE = pCVarPos((bIndPos+1):$);
0001     function [cLambda, cC]=fcLambda(indPow, pCVar, lambda, t)
0002         //Определяем составляющую динамики
0003         i = exp(-t*indPow*lambda)*pCVar';
0004         i = log(i); //Берем логарифм
0005
0006         //Определяем параметры
0007         cMatr = [ones(t), -t];
0008         par = linsolve(-cMatr'*cMatr, cMatr'*i);
0009         cC = par(1);
0010         cLambda = par(2); 0011 endfunction
0039     [lambda1,C1]=fcLambda(indPowPosB, pCVarPosB, lambda, t);
0040     [lambda2,C2]=fcLambda(indPowNegB, -pCVarNegB, lambda, t);
0041     [lambda3,C3]=fcLambda(indPowPosE, pCVarPosE, lambda, t);
0042     [lambda4,C4]=fcLambda(indPowNegE, -pCVarNegE, lambda, t);
0043
0044     //Корректируем лямбду
0045     lambda2 = lambda2*lambda / lambda1;
0046     lambda3 = lambda3*lambda / lambda1;
0047     lambda4 = lambda4*lambda / lambda1;
0048     lambda1 = lambda;
0049
0050     //Определяем токи
0051     i = fI(pC,pt,Pow);
0052 endfunction
0167
0168 //Получаем аппроксимацию тока
0169 [cIon,i0on,lambda1on,lambda2on,lambda3on,lambda4on,C1on,C2on,C3on,C4on]=
=fIp(switchOninCurrentData,switchOnTimeData,tuston,Pow);
0170 [cIoff,i0off,lambda1off,lambda2off,lambda3off,lambda4off,C1off,C2off,C3off,C4off]=
=fIp(switchOffinCurrentData,switchOffTimeData,tustoff,Pow);
0171 cI = zeros(switchVoltage);
0172 cI(switchVoltage > 0.5) = cIon;
0173 cI(switchVoltage < 0.5) = cIoff;
0174
0175 //Строим график
0176 scf(indDatas);
0177 plot(inTime,inVoltageData,"k-");
0178 plot(inTime,inCurrentData,"r-");
0179 plot(inTime,cI,"b:");
0180
0181 //Расчет характеристик схемы замещения
0182 lambda1 = (lambda1on + lambda1off) / 2;
0183 lambda2 = (lambda2on + lambda2off) / 2;
0184 lambda3 = (lambda3on + lambda3off) / 2;
0185 lambda4 = (lambda4on + lambda4off) / 2;
0186 A = mean(inVoltageData(switchVoltage > 0.5))*100 / i0on;
0187 B = (1 / lambda1 + 1 / lambda2 + 1 / lambda3 + 1 / lambda4)*A;
0188 D = (1 / (lambda1*lambda2) + 1 / (lambda1*lambda3) + 1 / (lambda1*lambda4) + 1 /
(lambda2*lambda3) + 1 / (lambda2*lambda4) + 1 / (lambda3*lambda4))*A;
0189 H = A / (lambda1*lambda2*lambda3*lambda4);
0190 G = (lambda1 + lambda2 + lambda3 + lambda4)*H;
0191 M = tauOff1 + tauOff2 + tauOff3;
0192 J = tauOff1*tauOff2 + tauOff1*tauOff3 + tauOff2*tauOff3;
0193 F = tauOff1*tauOff2*tauOff3;
0194 L1 = H / F;
0195 R1 = abs(G - J*L1) / F;
0196 C1 = F / abs(D - M*L1 - J*R1);
0197 L2 = F / (C1*abs(M - C1*(A - R1)));
0198 R2 = abs(J - C1*L2) / (C1*abs(M - C1*(A - R1)));
0199 C2 = abs(M - C1*(A - R1)) / abs(A - R1 - R2);
0200 Rn = abs(A - R1 - R2);
0201
0202 //Выводим характеристики
0203 disp("L1 = " + string(L1*1e3) + "мГн");
0204 disp("R1 = " + string(R1) + "Ом");
0205 disp("C1 = " + string(C1*1e6) + "мкФ");

```

```
0206 disp("L2 = " + string(L2*1e3) + "мГн");
0207 disp("R2 = " + string(R2) + "Ом");
0208 disp("C2 = " + string(C2*1e6) + "мкФ");
0209 disp("Rn = " + string(Rn) + "Ом");
0210
0211 //Чистим память
0212 clear;
```