

Экз. № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д42.2.001.01  
ФГБОУ ВО «МГТУ ГА»

САМОЙЛЕНКО В.М.

ФГБОУ ВО «МГТУ ГА»  
Кронштадтский бульвар, 20, г. Москва,  
125993

### **ОТЗЫВ**

официального оппонента Мусина Сергея Миргасовича на диссертационную работу ПАВЛОВОЙ Виктории Игоревны на тему «Метод диагностирования технического состояния входных цепей питания потребителей электроэнергии в интеллектуальных системах электроснабжения воздушных судов на основе цифровых двойников», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Диссертация ПАВЛОВОЙ Виктории Игоревны посвящена решению актуальной для воздушного транспорта задачи идентификации в эксплуатации отказавших и поврежденных приемников (потребителей) электроэнергии постоянного тока, авиационного и радиоэлектронного оборудования, на основе цифровых двойников, что позволяет сформировать систему их эксплуатации по техническому состоянию с контролем параметров и поддерживать их работоспособное состояние на полном их жизненном цикле, и в целом, летную годность воздушных судов.

В работе представлены метод и методика диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии постоянного тока по степени несовпадения реального, в данный момент времени, технического цифрового портрета приемника с цифровым двойником приемника электроэнергии, полученного по модели его функционирования в работоспособном состоянии, выступающего в качестве эталона.

Исследования в области электротехнической совместимости авиационных систем электроснабжения и бортового оборудования в эксплуатации показали, что появление ложных информационных и управляющих сигналов, повышение уровня помех в связных радиостанциях, сбой в работе бортовых вычислительных машин,

появление дополнительных погрешностей в инерциальных системах, снижение статической устойчивости систем автоматического управления полетом в определяющей степени обусловлено качеством потребляемой электроэнергии, генерируемой в системе электроснабжения и взаимовлиянием обменных мощностей приемников (импеданса, амплитудно-частотных характеристик, спектральных характеристик, автокорреляционных и корреляционных характеристик и т.п.) посредством ухудшения качества электроэнергии в централизованной системе распределения электроэнергии, что обуславливает актуальность работы.

Решение поставленной в работе научной задачи, разработки метода диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии постоянного тока, на основе имеющейся в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии информации о мгновенных значениях потребляемого тока и напряжения питания, осуществляется за счет сравнения реальной амплитудно-частотной характеристики и входного импеданса приемника в контрольные моменты времени с моделированными (эталонными) амплитудно-частотной характеристикой и входным импедансом приемника электроэнергии относительно работоспособности приемника в переходных режимах функционирования.

Решение научной задачи позволит увеличить достоверность выявления предотказных, отказных и поврежденных состояний приемников (потребителей) электроэнергии и осуществлять их эффективное техническое обслуживание.

Исследование, проведенное в данной диссертационной работе, направленное на решение указанной задачи является актуальным, способствует повышению безопасности полетов, поддержанию летной годности воздушных судов и имеет важное хозяйственное значение в области воздушного транспорта.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая и достаточная информация для разработки метода и методики диагностирования технического состояния приемников (потребителей) электроэнергии постоянного тока по степени искажения параметров, питающей электроэнергии на входе приемника (потребителя) на основе цифровых двойников.

Теоретические и экспериментальные исследования проводились в условиях ФГБОУ ВО «МГТУ ГА», ООО «НПО НаукаСофт», из которых получены акты реализации результатов исследования.

**Цель работы** повышение полноты технического диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии за счет внедрения диагностических функций в цифровые интеллектуальные системы распределения электроэнергии в целях сохранения летной годности воздушных судов в процессе их эксплуатации.

По цели исследования и решаемой научной задачи исследование проведено по специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники, пункты: 4. Разработка и совершенствование методов контроля, проведения летных и наземных испытаний, диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационной техники на всех этапах жизненного цикла, 6. Поддержание летной годности воздушных судов, выбор и обоснование оптимальных стратегий,

режимов и программ технического обслуживания и ремонта, разработка методов и технологических процессов восстановления работоспособности авиационной техники, ..., согласно паспорту.

**Научная новизна**, имеющая важное значение для науки и практики, заключается в следующем:

- изучена закономерность отклонения параметров реактивных элементов приемников (потребителей) электроэнергии, бортовое оборудование, на их работоспособность;

- определены критические значения отклонений параметров реактивных элементов приемников (потребителей) электроэнергии, бортовое оборудование, характеризующие их переход из работоспособного состояния в неработоспособное состояние;

- установлены точность измерения параметров и чувствительность цифрового двойника с целью обеспечения необходимой и достаточной достоверности принятия решения о работоспособности приемника (потребителя) электрической энергии по критерию минимума отклонения амплитудно-частотных характеристик и входного импеданса от исходных амплитудно-частотных характеристик и импеданса типа оборудования;

- разработана методика диагностирования технического состояния приемника (потребителя) электроэнергии, бортовое оборудование, по критерию минимума отклонения их амплитудно-частотных характеристик и входного импеданса от исходных амплитудно-частотных характеристик и импеданса типа оборудования;

- представлены рекомендации по техническому обслуживанию бортового оборудования с применением системы диагностирования на основе цифровых двойников по состоянию с контролем параметров.

**Практическая ценность и реализация** результатов исследований определяется тем, что решение научной задачи и технологические решения внедрены в ООО «НПО НаукаСофт» и ФГБОУ ВО «МГТУ ГА» в виде:

- методики диагностирования технического состояния потребителей (приемников) электроэнергии, бортовое оборудование, по критерию минимума отклонения их амплитудно-частотных характеристик и входного импеданса от исходного импеданса бортового оборудования разработки ООО «НПО НаукаСофт» в процессе эксплуатации;

- базы знаний и базы данных диагностирования бортового оборудования по их импедансу и амплитудно-частотным характеристикам с применением цифровых двойников в среде Scilab 6.11;

- цифрового метода численно-аналитического преобразования непрерывных амплитудно-частотных характеристик в цифровой облик на основе быстрого преобразования Фурье;

- раздела дисциплины «Теоретические основы электротехнического оборудования воздушных судов», изучаемой в ФГБОУ ВО «МГТУ ГА».

**Оценка достоверности результатов:**

- **практические** результаты получены при экспериментальных исследованиях вторичных источников питания серий ИП1600-024 ИРБИС, МДМ320-1М27ТУП;

- **теория построена** на теории спектрального анализа непрерывных детерминированных и случайных процессов, протекающих в системах распределения

электроэнергии, цифровыми методами анализа и согласуется с опубликованными материалами по теме диссертации;

- **идея базируется** на создании цифрового двойника приемника электроэнергии, выступающего в качестве эталона, с которым сравнивается реальный в данный момент времени технический портрет приемника, и по степени несовпадения портрета с двойником принимается решение об исправности приемника электроэнергии;

- **использованы** данные, полученные другими авторами по рассматриваемой тематике, для сравнения авторских данных. Сравнение показало непротиворечивость результатов расчета;

- **установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами оценки работоспособности вторичных источников питания серий ИП1600-024 ИРБИС, МДМ320-1М27ТУП;

- **использованы** современные методики организации математического и имитационного эксперимента, сбора и обработки исходной информации, представительные выборочные совокупности.

#### **Личный вклад соискателя состоит:**

- в создании цифровой компьютерной методики диагностирования бортового оборудования в системе технического обслуживания воздушных судов;

- в развитии практики применения цифровых двойников в целях технического обслуживания воздушных судов в эксплуатации;

- в личном участии в создании методики диагностирования на основе цифровых двойников и проведении вычислительного и натурного экспериментов;

- в физической и целевой интерпретации экспериментальных данных, полученных лично автором;

- в личном участии в апробации результатов исследования;

- в подготовке основных публикаций соискателя по выполненной работе.

**Апробация работы.** Основные положения представлены и обсуждены на 3-х Международных конференциях молодых специалистов в области электронных устройств и материалов (International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices), республика Алтай в период 2019-2022 гг. «EDM», 2-х научно-технических конференциях по авиации, посвященных памяти Н.Е. Жуковского, г. Москва в период 2021-2022 гг., шестой международной научно-практической конференции «Авиатор», г. Воронеж, 2019 гг., Всероссийской научно-практической конференции «Электропитание - 2021», г. Великий Новгород 2021 гг.

**В первой главе** диссертации проведен целевой анализ исследований в области диагностики и технического диагностирования авиационного бортового оборудования (приемников электроэнергии) в эксплуатации.

Определены пути развития методов и методик диагностирования приемников электроэнергии с элементами прогнозирования их технического состояния в процессе эксплуатации воздушных судов.

Предложен метод диагностирования приемников электрической энергии по характеристикам импеданса и амплитудно-частотным характеристикам на основе цифровых двойников.

Семантически определены научная задача, разработка методики диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии на основе имеющейся в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии информации о мгновенных значениях потребляемого постоянного тока и напряжения питания, объект, предмет исследования и пути решения научной задачи.

**Во второй главе** представлен анализ методик диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии на основе теорий спектрального анализа непрерывных детерминированных и случайных процессов, протекающих в системах распределения электроэнергии при функционировании приемников (потребителей) электроэнергии. Изучен способ контроля приемников электроэнергии по амплитудно-частотным характеристикам путем цифрового их анализа.

**Третья глава** посвящена разработке метода диагностирования технического состояния приемников (потребителей) электроэнергии типа авиационное электрооборудование по критерию минимума отклонения амплитудно-частотных характеристик и входного импеданса от исходных амплитудно-частотных характеристик и импеданса цифрового двойника. Приведена формализация методики диагностирования технического состояния приемников (потребителей) электроэнергии.

**Четвертая глава** посвящена реализации методики диагностирования технического состояния приемников (потребителей) электроэнергии относительно параметров цепей питания постоянным током вторичных источников питания по цифровым измерениям переходной функции. Представленные результаты анализа экспериментов подтвердили принципиальную возможность реализации метода диагностирования приемников (потребителей) электроэнергии в цифровых интеллектуальных системах распределения электроэнергии.

**В целом** все главы диссертации отражают глубину проработки рассматриваемых в них вопросов и подтверждают заявленную автором новизну полученных результатов исследований.

Текст диссертации написан грамотно, на хорошем научном и техническом языке. Работа оформлена аккуратно, достаточно хорошо изучается, но не содержит списка принятых в диссертации сокращений. Содержание автореферата достаточно полно отражает основные положения диссертации.

**Публикация** материалов диссертационной работы характеризуется 9 работами, среди них 2 научные статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК при Минобрнауки России, 6 статей в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и Web of Science, один отчет о НИР.

### **Основные замечания по диссертации.**

1. Не представлена формализованная постановка задачи и ее решение.
2. Не представлено соответствие диссертации паспорту специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники.
3. Представленные основные результаты не содержат итогового заключения о решении поставленной научной задачи.
4. Импеданс приемников (потребителей) электроэнергии рассмотрен исходя из положений Фризе для постоянного тока, что полная энергия равна корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной энергий, в результате при определении параметров импеданса не учитываются стоячие волны и электрические плечи в авиационной системе распределения электроэнергии. Необходимо рассматривать полную энергию по Фризе для переменного тока, равную корню квадратному из суммы квадратов активной, реактивной энергий и энергии искажения, которая возникает вследствие образования стоячих волн и электрических плеч в сетях синусоидального переменного тока, поскольку в авиационных системах электроснабжения корпус самолета является одновременно нейтралью переменного тока и минусовым проводом постоянного тока.
5. Определение рабочих амплитудно-частотных характеристик приемников (потребителей) электроэнергии при питании от чистой шины, когда к шине подсоединен только один данный приемник, не позволяет с достаточной и необходимой достоверностью определить эталонное работоспособное состояние приемника при его функционировании на воздушном судне, поскольку импеданс источника электроэнергии при питании нескольких приемников значительно отличается от импеданса чистой шины, что значительно увеличивает вероятность ошибки второго рода при диагностировании.
6. В качестве критерия применена евклидова метрика сравнения реальной в данный момент времени амплитудно-частотной характеристики приемника (потребителя) с эталонной характеристикой цифрового двойника, которая не учитывает взаимовлияние приемников (потребителей) электроэнергии, подключенных к одной шине, на их импеданс и амплитудно-частотные характеристики, что значительно увеличивает вероятность ошибки второго рода при диагностировании. Необходимо использовать метрики Махаланобиса или Минковского.

Указанные недостатки не являются принципиальными для общей оценки выполненной диссертационной работы.

Результаты работы могут быть использованы научными, образовательными, производственными и эксплуатирующими предприятиями и учреждениями авиационной отрасли.

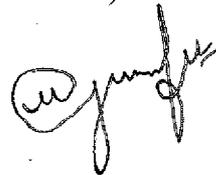
## ВЫВОД

Диссертация ПАВЛОВОЙ Виктории Игоревны является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в соответствии с пп. 9-11, 13, 14 действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней. В диссертации изложено решение научной задачи, разработка методики диагностирования приемников электроэнергии постоянного тока (бортовое оборудование) на основе цифровых интеллектуальных систем распределения электроэнергии, имеющей существенное значение для поддержания летной годности воздушных судов воздушного транспорта России. Приведены научно обоснованные рекомендации по техническому обслуживанию бортового оборудования с применением системы диагностирования на основе цифровых двойников по состоянию с контролем параметров.

Качество и объем проведенных актуальных исследований, полученные теоретические результаты и практическая значимость удовлетворяют требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, работа соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней», а автор, ПАВЛОВА Виктория Игоревна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники.

### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Заместитель по эксплуатации директора ОКБ-главного конструктора АО «УАПО»  
доктор технических наук (20.02.17), профессор (20.02.14)



С.М. Мусин

« 17 » октября 2023 года

Мусин Сергей Миргасович

г. Москва, Энтузиастов проезд, д. 15.

ОКБ АО «УАПО» (Обособленное конструкторское бюро Акционерного общества «Уфимское агрегатное производственное объединение»)

Тел. +7-495-627-10-99 доб. 3436

E.mail: smusin@tdhc.ru

Подпись официального оппонента доктора технических наук, профессора Мусина С.М. удостоверяю.

Специалист по кадрам АО «УАПО»



Е.В. Харитонова

« 17 » октября 2023 года