

На правах рукописи



ДЕМЧЕНКО АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ
БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

Специальность 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Научный руководитель: заведующий кафедрой «Технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов» (ТЭАЭС и ПНК) ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), доктор технических наук, профессор
Кузнецов Сергей Викторович

Официальные оппоненты: профессор кафедры электроснабжения ракетных комплексов ФГК ВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» МО РФ доктор технических наук, профессор
Капелько Константин Васильевич

главный конструктор – заместитель Генерального директора ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», кандидат технических наук, доцент
Жмуров Борис Владимирович

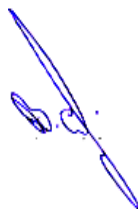
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС)

Защита состоится: «27» апреля 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д223.011.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) по адресу 125993, г. Москва, Кронштадтский б-р, 20.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО МГТУ ГА, а также на сайте ФГБОУ ВО МГТУ ГА www.mstuca.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 223.011.01,
доктор технических наук, профессор



Самойленко В. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Как показывает анализ безопасности полётов, до 5% авиационных инцидентов и происшествий происходят из-за отказов агрегатов бортовой системы электроснабжения (СЭС). С точки зрения влияния на безопасность полётов, бортовая СЭС воздушного судна (ВС) является одной из важнейших бортовых систем, поскольку основное предназначение бортовой СЭС ВС – обеспечение электропитанием бортового оборудования и агрегатов, потребляющих электроэнергию (приёмников электроэнергии). Поэтому отказы агрегатов бортовых СЭС ВС напрямую влияют на работу электрооборудования остальных систем ВС, являющихся приёмниками электроэнергии, приводя, таким образом, к зависимым отказам приёмников электроэнергии. В связи с этим является актуальной задача технического диагностирования и прогнозирования технического состояния бортовой СЭС ВС. Решение данной задачи предполагает получение такого алгоритма диагностирования, который позволит получить расширенное множество технических состояний канала бортовой СЭС ВС, на основе значений определяющих параметров, а также получить прогнозирование значений определяющих параметров, таким образом, можно будет контролировать поведение бортовой СЭС ВС при любом ненормальном режиме, снижая тем самым вероятность возникновения аварийных ситуаций в полёте. Как следствие, это приведёт к повышению уровня безопасности полётов.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам исследования электроэнергетических систем посвящены многочисленные работы отечественных ученых С. А. Лебедева, А. А. Горева, В. С. Кулебакина, А. И. Важнова, М. П. Костенко, В. А. Веникова, Л. П. Веретенникова, В. Т. Морозовского, И. М. Синдеева, В. И. Кривенцева, К. В. Капелько, В. А. Савенко, В. В. Кушнерёва, А. А., Харитонова, С. М. Мусина, А. В. Лёвина, А. А., Савёлова, Ю. П. Артеменко, С. П. Халютинина, А. О. Давидова, Б. В. Жмурова и многих других. Результатами соответствующих исследований стала разработка агрегатов бортовых СЭС отечественных ВС.

Объектом исследования является первичная бортовая СЭС ВС переменного трёхфазного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц. Исследование выполнено при рассмотрении одного канала бортовой СЭС ВС. В соответствии с паспортом специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» выбранный объект исследования соответствует требованиям к объекту исследований, указанным в пункте 1 формулы специальности (воздушные суда, авиационные двигатели, гидромеханические системы, авионика, электрооборудование и другие функциональные системы воздушных судов; наземная авиационная техника).

Предметом исследования является метод и алгоритм диагностирования расширенного множества технических состояний бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров. В соответствии с паспортом специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» предмет исследования соответствует требованиям к области исследований, указанным в пункте 9 перечня областей исследования (разработка методов и средств диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационной техники и метрологического обеспечения).

Целью исследования является повышение уровня безопасности полётов (БП) на основе диагностирования расширенного множества технических состояний бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Научной задачей диссертационной работы является разработка научно-методического аппарата метода диагностирования расширенного множества технических состояний бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Задачи исследования. Для достижения цели исследования и решения научной задачи в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ технических состояний, диагностируемых в канале бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты существующих отечественных ВС;
- определение расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;
- разработка математических и имитационных моделей агрегатов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;
- имитационное моделирование каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;
- определение перечня определяющих параметров для разработки алгоритма диагностирования каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров;
- определение коэффициентов гармонических составляющих фазных напряжений в точке регулирования, коэффициентов искажения фазных напряжений, действующих значений фазных напряжений в точке регулирования как определяющих параметров для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;
- определение различающих функций для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты на основе определённых значений определяющих параметров для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;
- прогнозирование значений определяющих параметров;
- разработка алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Методология и методы исследования. Разработанный научно-методический аппарат базируется на использовании методов математического и имитационного моделирования электроэнергетических систем и их элементов. Отличительными особенностями методологии являются алгоритмы диагностирования, позволяющие различать технические состояния канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты и получить таким образом расширенное множество технических состояний.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии новых методов диагностирования технических состояний в каналах бортовых СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Научная новизна работы.

1. Разработана математическая модель бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ) с учётом насыщения его магнитной цепи. Данная математическая модель разработана в фазной системе координат «АВС», а значит, позволяет описывать процессы, как при симметричных, так и при несимметричных режимах работы генератора. В составе математической модели авиационного синхронного генератора разработаны математические модели основного генератора, возбuditеля, подвозбудителя, вращающегося выпрямителя.

2. Разработана математическая модель регулятора напряжения.

3. Рассмотрены математические модели привода постоянной частоты вращения, линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

4. Разработаны имитационные модели агрегатов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты: бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ), регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения,

линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

5. На основе разработанных имитационных моделей при разложении в ряд Фурье мгновенных значений напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования определены значения определяющих параметров: коэффициентов гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С», коэффициенты искажения напряжений фаз «А», «В» и «С», а также действующие значения напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты.

6. Определены различающие функции для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты.

7. Выполнено прогнозирование значений определяющих параметров: коэффициентов гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С», коэффициентов искажения напряжений фаз «А», «В» и «С», а также действующих значений напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа.

8. Разработан алгоритм диагностирования технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Практическая значимость исследования.

1. Разработанный в работе алгоритм диагностирования технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров может быть использован для модернизации существующего оборудования канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с добавлением необходимого функционала для диагностирования технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

2. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при разработке методов диагностирования технических состояний в бортовых СЭС ВС переменного трёхфазного тока номинальным напряжением 230/400 В постоянной номинальной частоты 400 Гц, бортовых СЭС ВС переменного трёхфазного тока номинальным напряжением 115/200 В переменной частоты 360...800 Гц, бортовых СЭС ВС переменного трёхфазного тока номинальным напряжением 230/400 В переменной частоты 360...800 Гц.

3. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для модернизации бортовых систем технического обслуживания (БСТО) современных ВС с добавлением функций системы управления техническим состоянием (ИСУТС), а также при разработке БСТО перспективных ВС.

4. Разработанные математические и имитационные модели бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ), регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения, линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок могут быть использованы при разработке СЭС перспективных ВС.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические и имитационные модели бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ), регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения, линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

2. Метод диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

3. Алгоритм диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

Достоверность и обоснованность результатов. Результаты, полученные автором, разработанные методы и алгоритмы, базируются на фундаментальных результатах математического моделирования электроэнергетических систем и их элементов. Оценка точности математического и имитационного моделирования производилась как на основе сравнения результатов моделирования с результатами испытания реальных систем, так и с учётом определения погрешности моделей, обусловленной неточностью исходных данных.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались и обсуждались на IX Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 40-летию МГТУ ГА (МНТК-2011), на X Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 90-летию гражданской авиации (МНТК-2013), на XI Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 45-летию университета (МНТК-2016), на Всероссийской научно-технической конференции «XV Научные чтения по авиации», посвящённые памяти Н.Е. Жуковского, на XII Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 95-летию гражданской авиации (МНТК-2018), на Всероссийской научно-технической конференции «XVI Научные чтения по авиации», посвящённые памяти Н.Е. Жуковского, на Всероссийской научно-технической конференции «XVII Научные чтения по авиации», посвящённые памяти Н.Е. Жуковского, на XIII Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 50-летию университета (МНТК-2021).

По материалам диссертации автором опубликовано 14 (87 страниц) научных работ, из них в изданиях из перечня ВАК – 6 (61 страница).

Личный вклад автора. Основные результаты работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями в научных изданиях. В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежат постановка задачи, вывод основных соотношений, результаты теоретических и практических исследований.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения общим объёмом (234) страницы печатного текста. Основная часть диссертации изложена на (176) страницах и содержит (59) рисунков и (4) таблицы.

Содержание работы

Во введении приведены общие сведения о диссертации: рассматриваются актуальность темы исследования, степень разработанности темы исследования, объект исследования, предмет исследования, цель исследования, научная задача, задачи исследования, методология и методы исследования, теоретическая значимость, научная новизна работы, практическая значимость исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность и обоснованность результатов, апробация работы и публикации, личный вклад автора, структура и объём работы.

В первой главе проведён анализ состояния безопасности полётов по распределениям отказов бортовых систем. Рассмотрены виды и состав бортовых систем электроснабжения (СЭС) воздушных судов (ВС). Рассмотрена СЭС переменного тока постоянной частоты конкретного типа ВС с регулирующей и защитной аппаратурой. Проведён анализ диагностируемых технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Проведён анализ определения расширенного множества возможных технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты.

Поставлена задача и определена последовательность действий для получения алгоритма диагностирования расширенного множества возможных технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров:

- разработка математических и имитационных моделей агрегатов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;

- имитационное моделирование каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;

- определение значений определяющих параметров – коэффициентов гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В», «С» в точке регулирования, коэффициентов искажения напряжений фаз «А», «В», «С» в точке регулирования, действующих значений напряжений фаз «А», «В», «С» в точке регулирования для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;

- определение различающих функций для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты на основе определённых значений определяющих параметров для каждого отдельного технического состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты;

- прогнозирование значений определяющих параметров;

разработка алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

В таблице 1 показаны элементы расширенного множества технических состояний, возникающих в канале бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты.

Таблица 1. Элементы расширенного множества технических состояний, возникающих в канале бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты

	Наименование технического состояния канала генерирования	Обозначение
1	Исправное состояние канала генерирования	S_0
2	Срабатывание защиты (отказ привода). Выдача сигнала НПРВ.	S_1
3	Срабатывание защиты (отказ блока БРЗУ115ВО2с). Выдача сигнала НБРЗУ.	S_2
4	Обрыв диода вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,1}$
5	Обрыв двух диодов одной группы плеч вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,2}$
6	Обрыв двух диодов разных групп плеч и фаз вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,3}$
7	Обрыв двух диодов разных групп плеч и одной фазы вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,4}$
8	Короткое замыкание диода вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,5}$

Таблица 1. (продолжение)

	Наименование технического состояния канала генерирования	Обозначение
9	Короткое замыкание двух диодов одной группы плеч вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,6}$
10	Короткое замыкание двух диодов разных групп плеч и фаз вращающегося выпрямителя генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»).	$S_{3,7}$
11	Обрыв фазы «А» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,8}$
12	Обрыв фазы «В» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,9}$
13	Обрыв фазы «С» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,10}$
14	Обрывы фаз «А» и «В» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,11}$
15	Обрывы фаз «В» и «С» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,12}$
16	Обрывы фаз «С» и «А» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,13}$
17	Обрывы фаз «А», «В» и «С» фидера генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,14}$
18	Обрыв силового нулевого провода генератора. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,15}$
19	Короткое замыкание фазы «А» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты) на корпус. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,16}$
20	Короткое замыкание фазы «В» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты) на корпус. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,17}$
21	Короткое замыкание фазы «С» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты) на корпус. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,18}$
22	Междуфазное короткое замыкание фаз «А» и «В» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты). Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,19}$
23	Междуфазное короткое замыкание фаз «В» и «С» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты). Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,20}$
24	Междуфазное короткое замыкание фаз «С» и «А» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты). Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,21}$

Таблица 1. (продолжение)

	Наименование технического состояния канала генерирования	Обозначение
25	Междуфазное короткое замыкание фазы «А», «В» и «С» фидера генератора (вне зоны действия дифференциальной токовой защиты). Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,22}$
26	Обрыв измерительного провода фазы «А» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,23}$
27	Обрыв измерительного провода фазы «В» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,24}$
28	Обрыв измерительного провода фазы «С» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,25}$
29	Обрыв измерительных проводов фаз «А» и «В» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,26}$
30	Обрыв измерительных проводов фаз «В» и «С» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,27}$
31	Обрыв измерительных проводов фаз «С» и «А» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,28}$
32	Обрыв измерительных проводов фаз «А», «В» и «С» регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,29}$
33	Обрыв измерительного нулевого провода регулятора напряжения. Срабатывание защиты (отказ «генератор-фидер»). Выдача сигнала НГТФ.	$S_{3,30}$

Во второй главе рассмотрена структурная схема канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты и выполнено математическое моделирование элементов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Разработана математическая модель бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ). В составе общей математической модели авиационного синхронного генератора разработаны математические модели основного генератора, возбудителя, подвозбудителя и вращающегося выпрямителя. Математические модели основного генератора и возбудителя получены в фазной системе координат с учётом насыщения магнитной цепи основного генератора и возбудителя, что позволяет описывать процессы, как при симметричных, так и при несимметричных режимах. Разработана математическая модель регулятора напряжения. Рассмотрена математическая модель привода постоянной частоты вращения. Рассмотрены математические модели линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, а также математическая модель линейной однофазной статической нагрузки. Рассмотрены математические модели контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

Ниже приведена полученная математическая модель электрической части основного генератора с учётом насыщения магнитной цепи:

$$\begin{cases} [U_g] = \frac{d}{dt} [\Psi_g] + [R_g] \cdot [I_g] \\ [\Psi_g] = [L_{\sigma_g}] \cdot [I_g] + [\Psi_{\delta_g}], \\ [\Psi_{\delta_g}] = [L_{\mu\delta_g}] \cdot [I_g] \end{cases}, (1)$$

где $[U_g] = \begin{bmatrix} -[U_{S_g}] \\ [\hat{U}_{R_g}] \end{bmatrix}$ – матрица напряжений фаз обмотки статора и контуров ротора

основного генератора; $[U_{S_g}] = \begin{bmatrix} U_{A_g} \\ U_{B_g} \\ U_{C_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец фазных напряжений основного

генератора; $[\hat{U}_{R_g}] = \begin{bmatrix} \hat{U}_{F_g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор-столбец приведённых напряжений контуров ротора

основного генератора; $[\Psi_g] = \begin{bmatrix} [\Psi_{S_g}] \\ [\hat{\Psi}_{R_g}] \end{bmatrix}$ – матрица потокосцеплений фаз обмотки статора и

контуров ротора основного генератора; $[\Psi_{S_g}] = \begin{bmatrix} \Psi_{A_g} \\ \Psi_{B_g} \\ \Psi_{C_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец потокосцеплений фаз

обмотки статора основного генератора; $[\hat{\Psi}_{R_g}] = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{F_g} \\ \hat{\Psi}_{Rd_g} \\ \hat{\Psi}_{Rq_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец приведённых

потокосцеплений контуров ротора основного генератора; $[R_g] = \begin{bmatrix} [R_{S_g}] & [O_{3 \times 3}] \\ [O_{3 \times 3}] & [\hat{R}_{R_g}] \end{bmatrix}$ – матрица

активных сопротивлений фаз обмотки статора и контуров ротора основного генератора;

$[R_{S_g}] = \begin{bmatrix} R_g & 0 & 0 \\ 0 & R_g & 0 \\ 0 & 0 & R_g \end{bmatrix}$ – матрица активных сопротивлений фаз обмотки статора основного

генератора; $[O_{3 \times 3}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – нулевая матрица; $[\hat{R}_{R_g}] = \begin{bmatrix} \hat{R}_{F_g} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{R}_{Rd_g} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{R}_{Rq_g} \end{bmatrix}$ – матрица

приведённых сопротивлений контуров ротора основного генератора; $[I_g] = \begin{bmatrix} I_{S_g} \\ \hat{I}_{R_g} \end{bmatrix}$ – матрица

токов фаз обмотки статора и контуров ротора основного генератора; $[I_{S_g}] = \begin{bmatrix} I_{A_g} \\ I_{B_g} \\ I_{C_g} \end{bmatrix}$ – вектор-

столбец фазных токов основного генератора; $[\hat{I}_{R_g}] = \begin{bmatrix} \hat{I}_{F_g} \\ \hat{I}_{Rd_g} \\ \hat{I}_{Rq_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец приведённых

токов контуров ротора основного генератора; $[\Psi_{\delta_g}] = \begin{bmatrix} \Psi_{\delta S_g} \\ \Psi_{\delta R_g} \end{bmatrix}$ – матрица потокосцеплений в

воздушном зазоре фаз обмотки статора и контуров ротора основного генератора;

$[\Psi_{\delta S_g}] = \begin{bmatrix} \Psi_{\delta A_g} \\ \Psi_{\delta B_g} \\ \Psi_{\delta C_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец потокосцеплений в воздушном зазоре фаз обмотки статора

основного генератора; $[\hat{\Psi}_{\delta R_g}] = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{\delta F_g} \\ \hat{\Psi}_{\delta Rd_g} \\ \hat{\Psi}_{\delta Rq_g} \end{bmatrix}$ – вектор-столбец потокосцеплений в воздушном

зазоре контуров ротора основного генератора; $[L_{\mu\delta_g}] = \begin{bmatrix} [L_{\mu\delta SS_g}] & [\hat{L}_{\mu SR_g}] \\ [\hat{L}_{\mu RS_g}] & [L_{\mu\delta RR_g}] \end{bmatrix}$;

$[L_{\mu\delta SS_g}] = \begin{bmatrix} L_{\mu\delta A_g} & M_{\mu\delta AB_g} & M_{\mu\delta AC_g} \\ M_{\mu\delta BA_g} & L_{\mu\delta B_g} & M_{\mu\delta BC_g} \\ M_{\mu\delta CA_g} & M_{\mu\delta CB_g} & L_{\mu\delta C_g} \end{bmatrix}$ – матрица индуктивностей и взаимных

индуктивностей фаз обмотки статора основного генератора с учётом потокосцеплений в воздушном зазоре с учётом насыщения магнитной цепи;

$[\hat{L}_{\mu SR_g}] = \begin{bmatrix} \hat{M}_{\mu AF_g} & \hat{M}_{\mu ARd_g} & \hat{M}_{\mu ARq_g} \\ \hat{M}_{\mu BF_g} & \hat{M}_{\mu BRd_g} & \hat{M}_{\mu BRq_g} \\ \hat{M}_{\mu CF_g} & \hat{M}_{\mu CRd_g} & \hat{M}_{\mu CRq_g} \end{bmatrix}$ – матрица взаимных индуктивностей фаз обмотки

статора и контуров ротора основного генератора с учётом насыщения магнитной цепи;

$$\left[\hat{L}_{\mu RS_g} \right] = \begin{bmatrix} \hat{M}_{\mu FA_g} & \hat{M}_{\mu FB_g} & \hat{M}_{\mu FC_g} \\ \hat{M}_{\mu RdA_g} & \hat{M}_{\mu RdB_g} & \hat{M}_{\mu RdC_g} \\ \hat{M}_{\mu RqA_g} & \hat{M}_{\mu RqB_g} & \hat{M}_{\mu RqC_g} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матрица приведенных взаимных}$$

индуктивностей между контурами ротора и фазами обмотки статора основного генератора с

учётом насыщения магнитной цепи; $\left[L_{\mu \delta RR_g} \right] = \begin{bmatrix} L_{\mu ad_g} & \hat{M}_{\mu FRd_g} & 0 \\ \hat{M}_{\mu RdF_g} & L_{\mu ad_g} & 0 \\ 0 & 0 & L_{\mu aq_g} \end{bmatrix}$ – матрица

приведённых индуктивностей и взаимных индуктивностей цепей ротора основного генератора с учётом потокосцеплений в воздушном зазоре с учётом насыщения магнитной цепи.

В третьей главе рассмотрено имитационное моделирование элементов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты в среде имитационного моделирования Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

Разработана имитационная модель бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ) на основе его математической модели, полученной ранее. В составе общей имитационной модели авиационного синхронного генератора разработаны имитационные модели основного генератора, возбuditеля, подвозбудителя и вращающегося выпрямителя. Разработана имитационная модель регулятора напряжения. Разработана имитационная модель привода постоянной частоты вращения. Разработаны имитационные модели линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, а также имитационная модель линейной однофазной статической нагрузки. Разработаны имитационные модели контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

На рисунке 1 представлена имитационная модель канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты, реализованная в среде имитационного моделирования Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

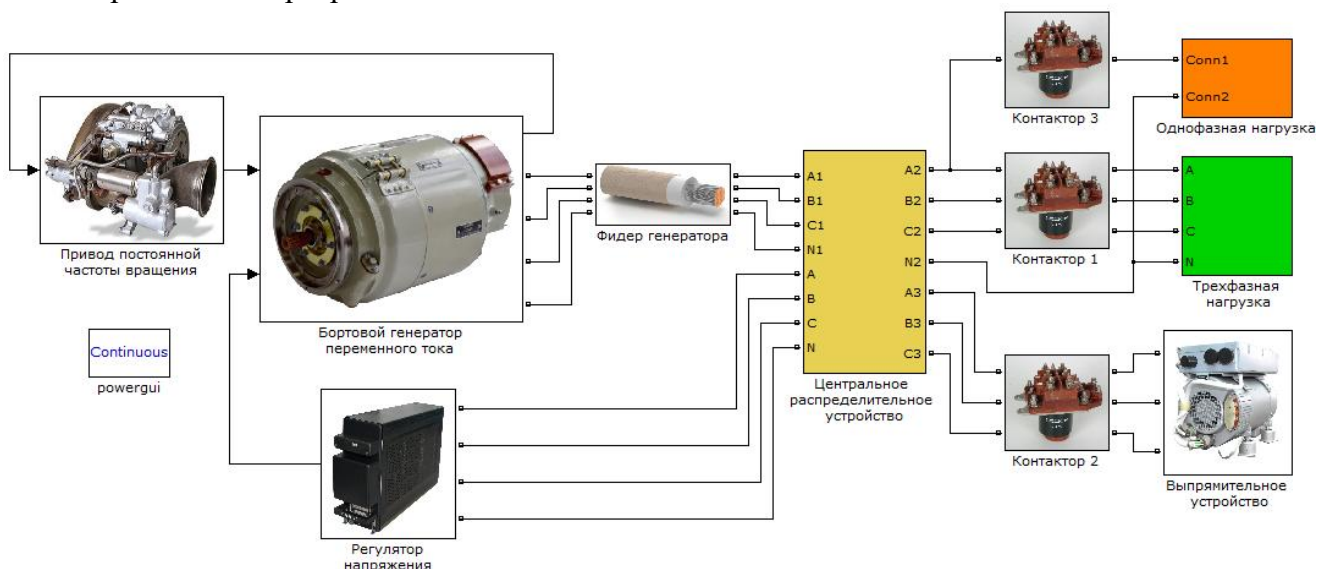




Рисунок 1. Имитационная модель канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты


В четвертой главе рассмотрено имитационное моделирование элементов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты в среде имитационного моделирования Simulink пакета прикладных программ MATLAB. В среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink на имитационной модели канала бортовой СЭС


переменного тока постоянной частоты смоделированы технические состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$. Получены переходные процессы мгновенных значений напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования. Рассчитаны значения определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}}, K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$ для каждого отдельного технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$. Определены границы доверительных интервалов значений определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}}, K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$ для каждого отдельного технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$. Сформулированы критерии появления каждого из технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$ и определены различающие функции технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$. Построен алгоритм диагностирования технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$. Поставлена и решена задача прогнозирования технического состояния канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Произведено прогнозирование значений определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}}, K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$ с помощью определения данных определяющих параметров как функций времени на основе полинома Лагранжа. Определена общая различающая функция появления отказа в момент времени $t_n < t \leq t_{n+1}$ при проведении диагностирования в момент времени $t = t_n$. Построен общий алгоритм диагностирования появления отказа в момент времени $t_n < t \leq t_{n+1}$ при проведении диагностирования в момент времени $t = t_n$.


На рисунке 2 приведены результаты имитационного моделирования по определению коэффициентов гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования для случаев обрыва диода вращающегося выпрямителя генератора в результате моделирования каждого отдельного технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$.

Чёрным цветом () показаны переходные процессы по коэффициентам 1-ой, 6-ой, 11-ой, 16-ой, 21-ой, 26-ой, 31-ой, 36-ой гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С».

Розовым цветом () показаны переходные процессы по коэффициентам 2-ой, 7-ой, 12-ой, 17-ой, 22-ой, 27-ой, 32-ой, 37-ой гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С».

Бирюзовым цветом () показаны переходные процессы по коэффициентам 3-ей, 8-ой, 13-ой, 18-ой, 23-ей, 28-ой, 33-ей, 38-ой гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С».

Красным цветом () показаны переходные процессы по коэффициентам 4-ой, 9-ой, 14-ой, 19-ой, 24-ой, 29-ой, 34-ой, 39-ой гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С».

Зелёным цветом () показаны переходные процессы по коэффициентам 5-ой, 10-ой, 15-ой, 20-ой, 25-ой, 30-ой, 35-ой, 40-ой гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В» и «С».

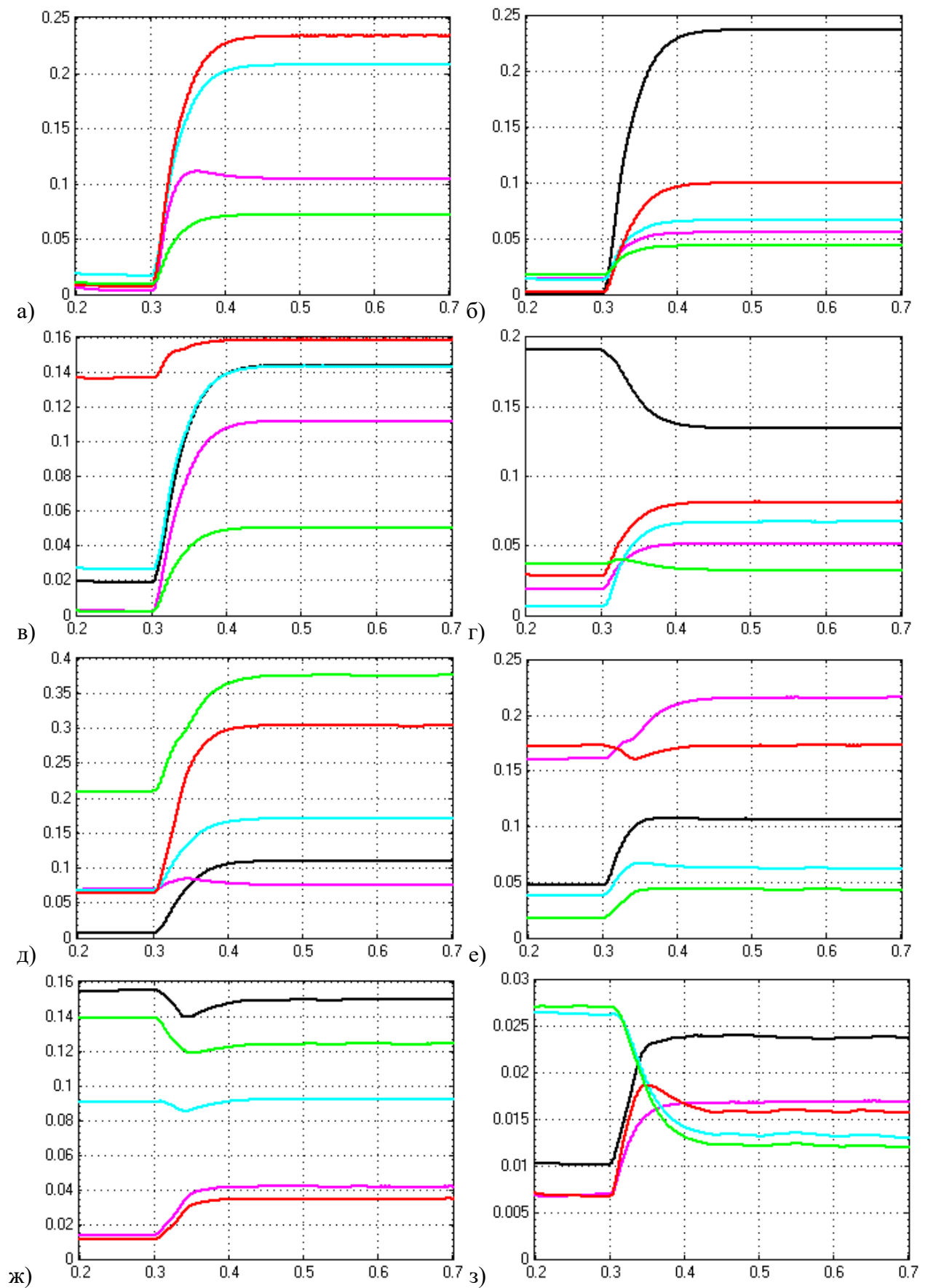


Рисунок 2. Переходные процессы коэффициентов гармонических составляющих напряжения фазы «А» при обрыве диода вращающегося выпрямителя генератора

В таблице 2 приведены результаты имитационного моделирования по определению коэффициентов гармонических составляющих напряжений фаз «А», «В», «С», коэффициентов искажения напряжений фаз «А», «В», «С» и действующие значения напряжений фаз «А», «В», «С» в точке регулирования при обрыве диода вращающегося выпрямителя генератора в результате моделирования каждого отдельного технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$.

Таблица 2. Коэффициенты гармонических составляющих, коэффициент искажения напряжения и действующее значения напряжения фазы «А» при обрыве диода вращающегося выпрямителя генератора

$K_{U_{A_2}}$	$K_{U_{A_3}}$	$K_{U_{A_4}}$	$K_{U_{A_5}}$	$K_{U_{A_6}}$	$K_{U_{A_7}}$	$K_{U_{A_8}}$	$K_{U_{A_9}}$	$K_{U_{A_{10}}}$
0,105	0,208	0,234	0,0718	0,237	0,0552	0,0662	0,0997	0,0434

Таблица 2. (продолжение)

$K_{U_{A_{11}}}$	$K_{U_{A_{12}}}$	$K_{U_{A_{13}}}$	$K_{U_{A_{14}}}$	$K_{U_{A_{15}}}$	$K_{U_{A_{16}}}$	$K_{U_{A_{17}}}$	$K_{U_{A_{18}}}$	$K_{U_{A_{19}}}$
0,144	0,112	0,143	0,159	0,0505	0,134	0,0514	0,067	0,0812

Таблица 2. (продолжение)

$K_{U_{A_{20}}}$	$K_{U_{A_{21}}}$	$K_{U_{A_{22}}}$	$K_{U_{A_{23}}}$	$K_{U_{A_{24}}}$	$K_{U_{A_{25}}}$	$K_{U_{A_{26}}}$	$K_{U_{A_{27}}}$	$K_{U_{A_{28}}}$
0,0323	0,11	0,0759	0,171	0,304	0,376	0,107	0,216	0,0625

Таблица 2. (продолжение)

$K_{U_{A_{29}}}$	$K_{U_{A_{30}}}$	$K_{U_{A_{31}}}$	$K_{U_{A_{32}}}$	$K_{U_{A_{33}}}$	$K_{U_{A_{34}}}$	$K_{U_{A_{35}}}$	$K_{U_{A_{36}}}$	$K_{U_{A_{37}}}$
0,173	0,0434	0,15	0,0419	0,0919	0,035	0,124	0,0239	0,0169

Таблица 2. (продолжение)

$K_{U_{A_{38}}}$	$K_{U_{A_{39}}}$	$K_{U_{A_{40}}}$	K_{U_A}	U_A, B	U_{A_0}, B
0,0131	0,0157	0,012	0,854	123,3	<0,1

Ниже приведена различающая функция для технического состояния $S_{3,k}$:

$$F_{3,k} \left(F_{AS_{3,k}}, F_{BS_{3,k}}, F_{CS_{3,k}} \right) = F_{AS_{3,k}} \wedge F_{BS_{3,k}} \wedge F_{CS_{3,k}}, \quad (2)$$

где $F_{AS_{3,k}}$ – различающая функция напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$;

$$\begin{aligned} F_{AS_{3,k}} &= F_{AS_{3,k}} \left(K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A \right) = \\ &= \left(K_{U_{A_2,S_{3,k}}} - \Delta K_{U_{A_2,S_{3,k}}} \leq K_{U_{A_2}} \leq K_{U_{A_2,S_{3,k}}} + \Delta K_{U_{A_2,S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{U_{A_3,S_{3,k}}} - \Delta K_{U_{A_3,S_{3,k}}} \leq \right. \\ &\leq K_{U_{A_3}} \leq K_{U_{A_3,S_{3,k}}} + \Delta K_{U_{A_3,S_{3,k}}} \left. \right) \wedge \left(K_{U_{A_4,S_{3,k}}} - \Delta K_{U_{A_4,S_{3,k}}} \leq K_{U_{A_4}} \leq K_{U_{A_4,S_{3,k}}} + \right. \\ &+ \Delta K_{U_{A_4,S_{3,k}}} \left. \right) \wedge \dots \wedge \left(K_{U_{A_h,S_{3,k}}} - \Delta K_{U_{A_h,S_{3,k}}} \leq K_{U_{A_h}} \leq K_{U_{A_h,S_{3,k}}} + \Delta K_{U_{A_h,S_{3,k}}} \right) \wedge \dots \wedge \\ &\wedge \left(K_{U_{A_{40},S_{3,k}}} - \Delta K_{U_{A_{40},S_{3,k}}} \leq K_{U_{A_{40}}} \leq K_{U_{A_{40},S_{3,k}}} + \Delta K_{U_{A_{40},S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{U_{AS_{3,k}}} - \Delta K_{U_{AS_{3,k}}} \leq \right. \\ &\leq K_{U_A} \leq K_{U_{AS_{3,k}}} + \Delta K_{U_{AS_{3,k}}} \left. \right) \wedge \left(U_{AS_{3,k}} - \Delta U_{AS_{3,k}} \leq U_A \leq U_{AS_{3,k}} + \Delta U_{AS_{3,k}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$K_{U_{A2,S_{3,k}}}, K_{U_{A3,S_{3,k}}}, K_{U_{A4,S_{3,k}}}, \dots, K_{U_{Ah,S_{3,k}}}, \dots, K_{U_{A40,S_{3,k}}}$ – значения коэффициентов соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$;

$K_{U_{AS_{3,k}}}$ – значение коэффициента искажений напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$. $U_{AS_{3,k}}$ – действующее значение напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{U_{A2,S_{3,k}}}, \Delta K_{U_{A3,S_{3,k}}}, \Delta K_{U_{A4,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{U_{Ah,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{U_{A40,S_{3,k}}}$ – значения приращений относительно средних значений коэффициентов соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{U_{AS_{3,k}}}$ – значение приращения относительно среднего значения коэффициента искажений напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$; $\Delta U_{AS_{3,k}}$ – значение приращения относительно среднего значения действующего напряжения фазы «А» для технического состояния $S_{3,k}$;

$F_{BS_{3,k}}$ – различающая функция напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$;

$$\begin{aligned}
 F_{BS_{3,k}} &= F_{BS_{3,k}} \left(K_{UB_2}, K_{UB_3}, K_{UB_4}, \dots, K_{UB_{40}}, K_{UB}, U_B \right) = \\
 &= \left(K_{UB_{2,S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{2,S_{3,k}}} \leq K_{UB_2} \leq K_{UB_{2,S_{3,k}}} + \Delta K_{UB_{2,S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{UB_{3,S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{3,S_{3,k}}} \leq \right. \\
 &\leq K_{UB_3} \leq K_{UB_{3,S_{3,k}}} + \Delta K_{UB_{3,S_{3,k}}} \left. \right) \wedge \left(K_{UB_{4,S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{4,S_{3,k}}} \leq K_{UB_4} \leq K_{UB_{4,S_{3,k}}} + \right. \\
 &\left. + \Delta K_{UB_{4,S_{3,k}}} \right) \wedge \dots \wedge \left(K_{UB_{h,S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{h,S_{3,k}}} \leq K_{UB_h} \leq K_{UB_{h,S_{3,k}}} + \Delta K_{UB_{h,S_{3,k}}} \right) \wedge \dots \wedge \\
 &\wedge \left(K_{UB_{40,S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{40,S_{3,k}}} \leq K_{UB_{40}} \leq K_{UB_{40,S_{3,k}}} + \Delta K_{UB_{40,S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{UB_{S_{3,k}}} - \Delta K_{UB_{S_{3,k}}} \leq \right. \\
 &\left. \leq K_{UB} \leq K_{UB_{S_{3,k}}} + \Delta K_{UB_{S_{3,k}}} \right) \wedge \left(U_{BS_{3,k}} - \Delta U_{BS_{3,k}} \leq U_B \leq U_{BS_{3,k}} + \Delta U_{BS_{3,k}} \right)
 \end{aligned}$$

(4)

$K_{UB_{2,S_{3,k}}}, K_{UB_{3,S_{3,k}}}, K_{UB_{4,S_{3,k}}}, \dots, K_{UB_{h,S_{3,k}}}, \dots, K_{UB_{40,S_{3,k}}}$ – значения коэффициентов соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$;

$K_{UB_{S_{3,k}}}$ – значение коэффициента искажений напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$. $U_{BS_{3,k}}$ – действующее значение напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{UB_{2,S_{3,k}}}, \Delta K_{UB_{3,S_{3,k}}}, \Delta K_{UB_{4,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{UB_{h,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{UB_{40,S_{3,k}}}$ – значения приращений относительно средних значений коэффициентов соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-

ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{U_{BS_{3,k}}}$ – значение приращения относительно среднего значения коэффициента

искажений напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$; $\Delta U_{BS_{3,k}}$ – значение приращения относительно среднего значения действующего напряжения фазы «В» для технического состояния $S_{3,k}$;

$F_{CS_{3,k}}$ – различающая функция напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$;

$$\begin{aligned}
 F_{CS_{3,k}} &= F_{CS_{3,k}} \left(K_{UC_2}, K_{UC_3}, K_{UC_4}, \dots, K_{UC_{40}}, K_{UC}, U_C \right) = \\
 &= \left(K_{UC_{2,S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{2,S_{3,k}}} \leq K_{UC_2} \leq K_{UC_{2,S_{3,k}}} + \Delta K_{UC_{2,S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{UC_{3,S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{3,S_{3,k}}} \leq \right. \\
 &\leq K_{UC_3} \leq K_{UC_{3,S_{3,k}}} + \Delta K_{UC_{3,S_{3,k}}} \left. \right) \wedge \left(K_{UC_{4,S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{4,S_{3,k}}} \leq K_{UC_4} \leq K_{UC_{4,S_{3,k}}} + \right. \\
 &\left. + \Delta K_{UC_{4,S_{3,k}}} \right) \wedge \dots \wedge \left(K_{UC_{h,S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{h,S_{3,k}}} \leq K_{UC_h} \leq K_{UC_{h,S_{3,k}}} + \Delta K_{UC_{h,S_{3,k}}} \right) \wedge \dots \wedge \\
 &\wedge \left(K_{UC_{40,S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{40,S_{3,k}}} \leq K_{UC_{40}} \leq K_{UC_{40,S_{3,k}}} + \Delta K_{UC_{40,S_{3,k}}} \right) \wedge \left(K_{UC_{S_{3,k}}} - \Delta K_{UC_{S_{3,k}}} \leq \right. \\
 &\left. \leq K_{UC} \leq K_{UC_{S_{3,k}}} + \Delta K_{UC_{S_{3,k}}} \right) \wedge \left(U_{CS_{3,k}} - \Delta U_{CS_{3,k}} \leq U_C \leq U_{CS_{3,k}} + \Delta U_{CS_{3,k}} \right)
 \end{aligned}$$

(5)

$K_{UC_{2,S_{3,k}}}, K_{UC_{3,S_{3,k}}}, K_{UC_{4,S_{3,k}}}, \dots, K_{UC_{h,S_{3,k}}}, \dots, K_{UC_{40,S_{3,k}}}$ – значения коэффициентов

соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$;

$K_{UC_{S_{3,k}}}$ – значение коэффициента искажений напряжения фазы «С» для технического

состояния $S_{3,k}$; $U_{CS_{3,k}}$ – действующее значение напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{UC_{2,S_{3,k}}}, \Delta K_{UC_{3,S_{3,k}}}, \Delta K_{UC_{4,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{UC_{h,S_{3,k}}}, \dots, \Delta K_{UC_{40,S_{3,k}}}$ – значения

приращений относительно средних значений коэффициентов соответственно для 2-ой, 3-ей, 4-ой, ..., h-той, ..., 40-ой гармонических составляющих напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$;

$\Delta K_{UC_{S_{3,k}}}$ – значение приращения относительно среднего значения коэффициента

искажений напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$. $\Delta U_{CS_{3,k}}$ – значение приращения относительно среднего значения действующего напряжения фазы «С» для технического состояния $S_{3,k}$.

Ниже приведены выражения для определения прогнозируемых значений определяющих параметров помощью определения данных определяющих параметров $K_{UA_2}, K_{UA_3}, K_{UA_4}, \dots, K_{UA_h}, \dots, K_{UA_{40}}, K_{UA}, U_A$ как функций времени на основе полиномов Лагранжа:

$$\left\{ \begin{array}{l}
K_{U_{A_2}}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_{A_2}} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
K_{U_{A_3}}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_{A_3}} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
K_{U_{A_4}}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_{A_4}} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
\cdots \\
K_{U_{A_h}}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_{A_h}} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
\cdots \\
K_{U_{A_{40}}}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_{A_{40}}} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
K_{U_A}(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot K_{U_A} \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right) \\
U_A(t) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{m=0, m \neq i}^n \left(\frac{t - \sum_{j=0}^m \Delta t_j}{\sum_{j=0}^i \Delta t_j - \sum_{j=0}^m \Delta t_j} \right) \right) \cdot U_A \left(\sum_{j=0}^m \Delta t_j \right)
\end{array} \right. , (6)$$

На рисунках 3-5 представлены фрагменты блок-схемы алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

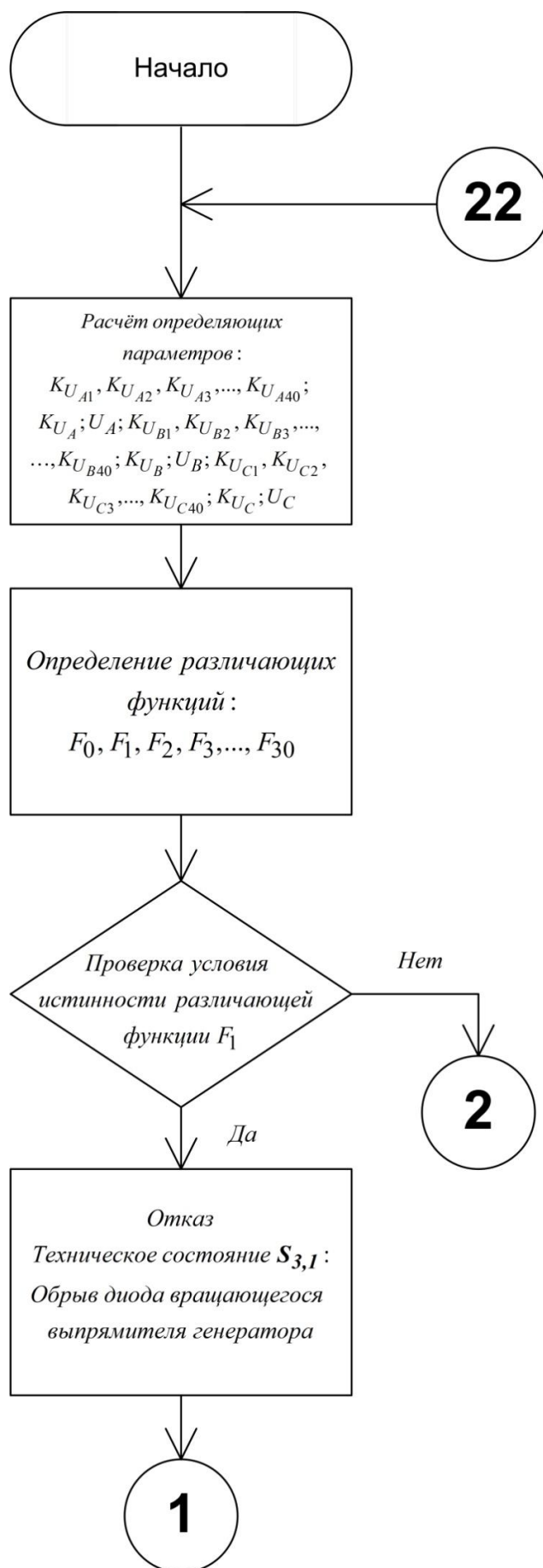


Рисунок 3. Фрагмент блок-схемы алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров

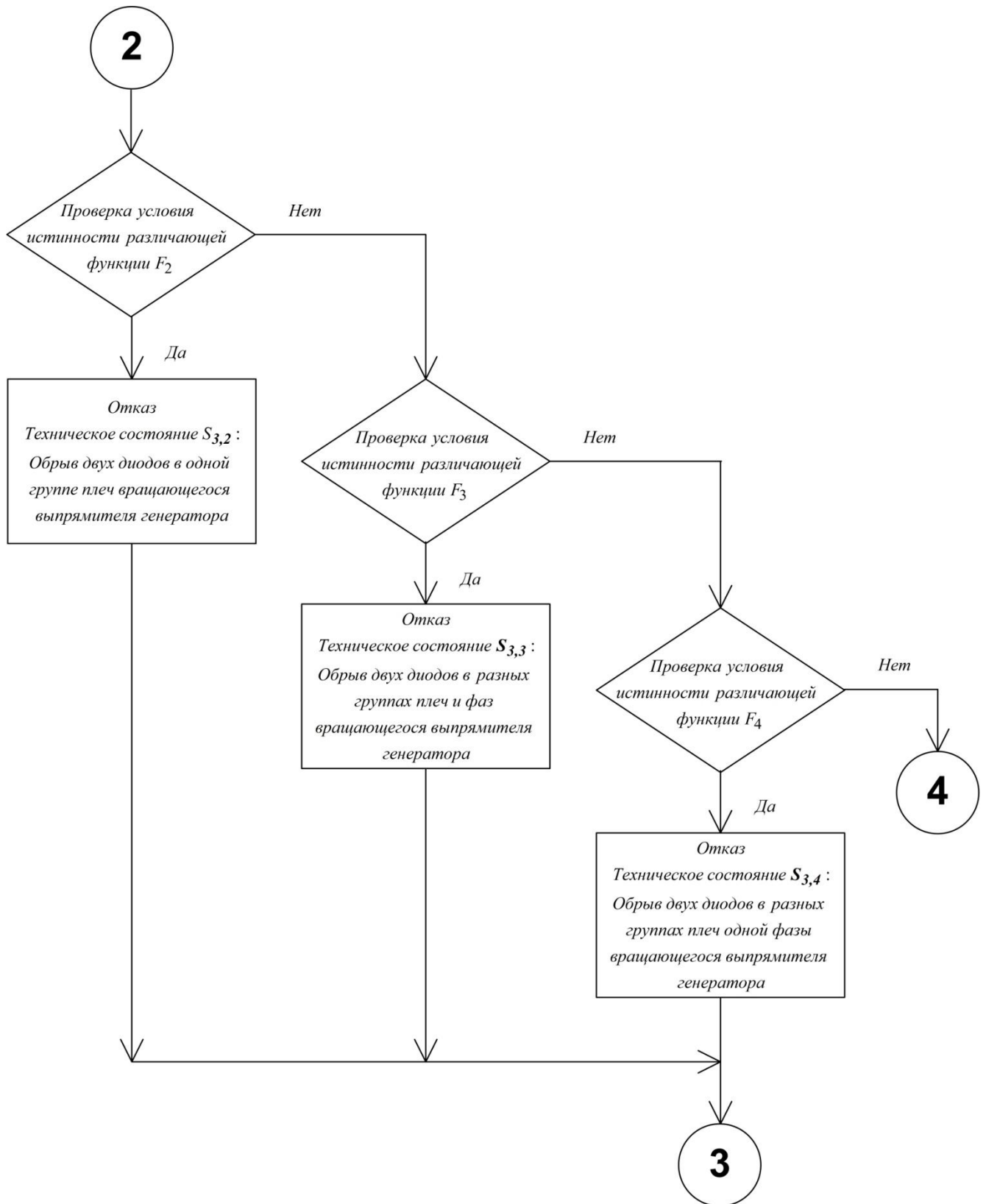


Рисунок 4. Фрагмент блок-схемы алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров (продолжение)

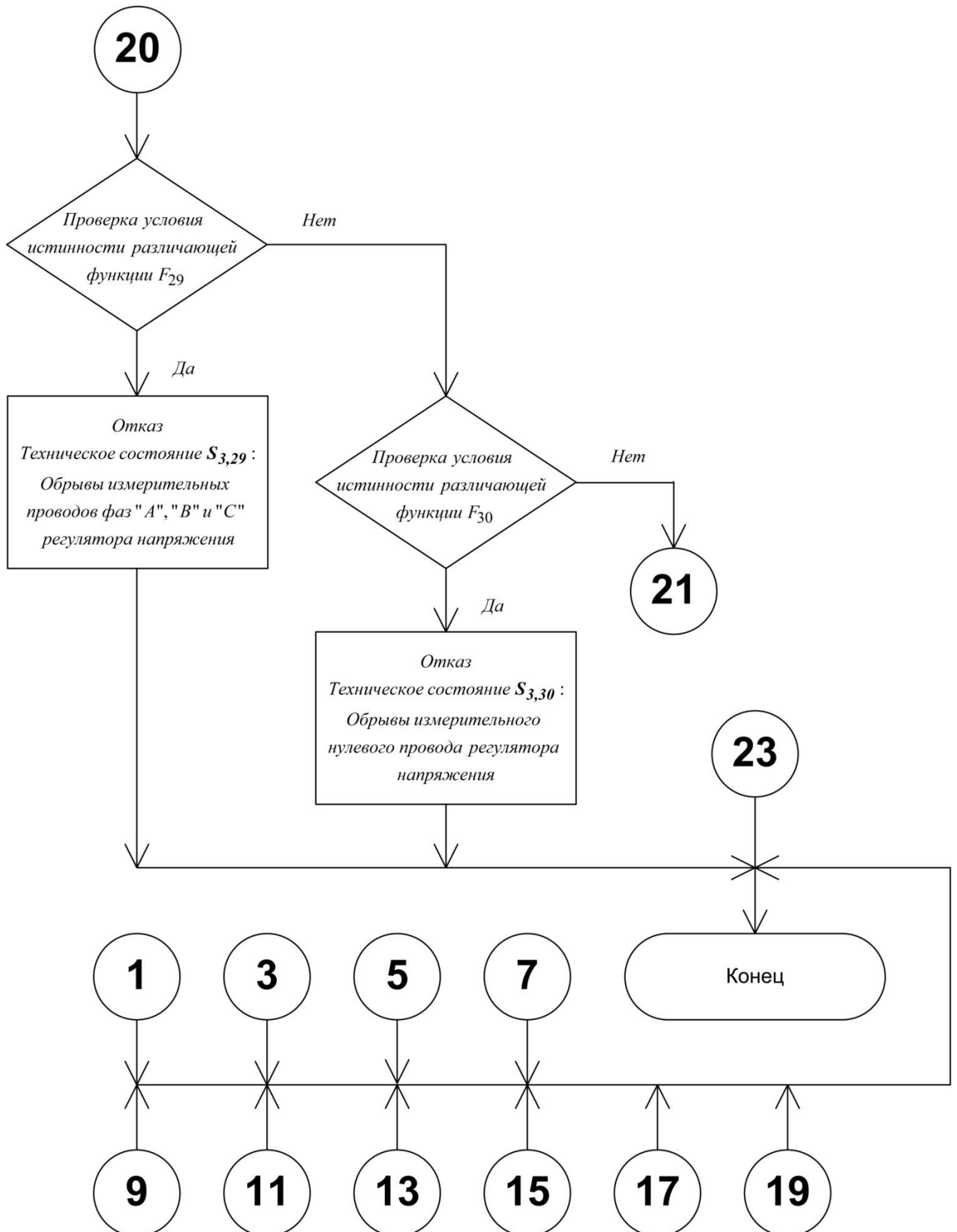


Рисунок 5. Фрагмент блок-схемы алгоритма диагностирования расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров (продолжение)

В заключении приведены основные результаты, полученные в работе:

1. Проведён анализ состояния безопасности полётов по распределениям отказов бортовых систем. Рассмотрены виды и состав бортовых СЭС ВС. Рассмотрена СЭС конкретного типа ВС с регулирующей и защитной аппаратурой. Проведён анализ диагностируемых технических состояний канала рассмотренной бортовой СЭС ВС. Проведён анализ определения расширенного множества возможных технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Поставлена задача и определена последовательность действий для получения алгоритма диагностирования расширенного множества возможных технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты с прогнозированием значений определяющих параметров.

2. Разработана математическая модель бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ). В составе общей математической модели бортового генератора переменного тока получены математические модели основного генератора, возбудителя, подвозбудителя и вращающегося выпрямителя. Математические модели основного генератора и возбудителя получены в фазной системе координат с учётом насыщения магнитной цепи основного генератора и возбудителя, что позволяет описывать процессы как при симметричных, так и при несимметричных режимах. Разработана математическая модель регулятора напряжения. Рассмотрены математические модели привода постоянной частоты вращения, линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок.

3. Разработана имитационная модель бортового генератора переменного тока (авиационного синхронного генератора серии ГТ) на основе его математической модели. В составе общей имитационной модели бортового генератора переменного тока разработаны имитационные модели основного генератора, возбудителя, подвозбудителя и вращающегося выпрямителя. Разработана имитационная модель регулятора напряжения. Разработана имитационная модель привода постоянной частоты вращения, имитационные модели линейной и нелинейной трёхфазных статических нагрузок, линейной однофазной статической нагрузки, контакторов трёхфазных и однофазной нагрузок. Таким образом, с учётом разработанных имитационных моделей агрегатов канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты разработана имитационная модель канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Разработанная имитационная модель позволяет исследовать работу канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты в переходных и установившихся режимах при симметричных и несимметричных, линейных и нелинейных нагрузках. Также разработанная имитационная модель позволяет исследовать работу канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты при введении отказов агрегатов канала бортовой СЭС ВС и тем самым имитировать технические состояния из расширенного множества технических состояний канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты. Результатами расчётов имитационной модели для каждого технического состояния канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты являются переходные процессы мгновенных значений напряжений фаз генератора в точке регулирования и токов фаз фидера генератора.

4. В среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink на имитационной модели канала бортовой СЭС ВС переменного тока постоянной частоты смоделированы технические состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$. Получены переходные процессы мгновенных значений напряжений фаз «А», «В» и «С» в точке регулирования. Рассчитаны значения определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}}, K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$ для каждого технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$. Определены границы доверительных интервалов значения определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}},$

$K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$
для каждого технического состояния $S_{3,1} - S_{3,30}$.

5. Сформулированы критерии появления каждого из технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$ и определены различающие функции технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$.

6. Построен алгоритм диагностирования технических состояний $S_{3,1} - S_{3,30}$. Поставлена и решена задача прогнозирования технического состояния канала бортовой СЭС переменного тока постоянной частоты. Произведено прогнозирование значений определяющих параметров $K_{U_{A_2}}, K_{U_{A_3}}, K_{U_{A_4}}, \dots, K_{U_{A_h}}, \dots, K_{U_{A_{40}}}, K_{U_A}, U_A; K_{U_{B_2}}, K_{U_{B_3}}, K_{U_{B_4}}, \dots, K_{U_{B_h}}, \dots, K_{U_{B_{40}}}, K_{U_B}, U_B; K_{U_{C_2}}, K_{U_{C_3}}, K_{U_{C_4}}, \dots, K_{U_{C_h}}, \dots, K_{U_{C_{40}}}, K_{U_C}, U_C$ с помощью определения данных определяющих параметров как функций времени на основе полинома Лагранжа. Определена общая различающая функция появления отказа в момент времени $t_n < t \leq t_{n+1}$ при проведении диагностирования в момент времени $t = t_n$. Построен общий алгоритм диагностирования появления отказа в момент времени $t_n < t \leq t_{n+1}$ при проведении диагностирования в момент времени $t = t_n$.

В списке сокращений приведён перечень сокращений, использованных в тексте диссертации.

В списке литературы указаны источники, на которые приводятся ссылки в тексте диссертации.

В приложении диссертации приведены таблицы и графики переходных процессов, не вошедшие в основную часть диссертации.

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, (по транспорту) рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Демченко, А. Г. Моделирование параллельной работы бортовой системы электроснабжения переменного тока в пакете MATLAB / А. Г. Демченко, Ю. П. Артёмов // Научный вестник МГТУ ГА №185. — Москва: РИО МГТУ ГА. — 2012. — С. 55-60.

2. Демченко, А. Г. Модель канала бортовой системы электроснабжения переменного тока / А. Г. Демченко // Научный вестник МГТУ ГА. — 2014. — №201. — С. 74-85.

3. Артёмов, Ю. П. Совершенствование модели канала бортовой системы электроснабжения переменного тока / Ю. П. Артёмов, А. Г. Демченко // Научный вестник МГТУ ГА. — 2015. — №213. — С. 34-42.

4. Демченко, А. Г. Модель канала бортовой системы электроснабжения переменного тока, работающего на обобщенную несимметричную трехфазную нагрузку / А. Г. Демченко // Научный вестник МГТУ ГА. — 2017. — Т. 20, №1. — С. 194-203.

5. Артёмов, Ю. П. Модель асинхронного двигателя в составе канала бортовой системы электроснабжения переменного тока / Ю. П. Артёмов, А. Г. Демченко // Научный вестник МГТУ ГА. — 2017. — Т.20 №1. — С. 141-151.

Научные публикации в других рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Демченко, А. Г. Имитационная модель авиационного синхронного генератора / А. Г. Демченко // ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ. — 2017. — №4. — С. 26-38.

Соискатель

Демченко А. Г.

Подписано в печать: 07.02.2022 г.
Объем: 1,34 усл.п.л.
Тираж: 70 экз. Заказ №1946
Отпечатано в типографии «Реглет»
125315, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 74, корп. 1
+7(495)790-47-77
www.reglet.ru