

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. Алексеева

На правах рукописи



Кочеганов Дамир Михайлович

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Серебряков А.В.

Нижний Новгород 2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Электроснабжение потребителей вне Единой энергетической системы России	12
1.1 Анализ возможностей использования возобновляемых источников энергии на территории России	12
1.2 Структуры электростанций для электроснабжения потребителей вне ЕЭС России.....	22
1.2.1 Системы выработки электроэнергии на основе ископаемого топлива.....	22
1.2.2 Системы выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников.....	25
1.2.3 Комбинированные системы выработки электроэнергии	27
Выводы по первой главе:	32
ГЛАВА 2. Имитационная модель комбинированной электростанции	34
2.1 Структура имитационной модели комбинированной электростанции	34
2.1.1 Преобразователь солнечной энергии	36
2.1.2 Преобразователь энергии ветра	38
2.1.3 Дизель-генераторная установка переменной частоты вращения	42
2.2 Результаты имитационного моделирования	44
2.2.1 Моделирование работы преобразователя солнечной энергии.....	44
2.2.2 Моделирование работы преобразователя энергии ветра	48
2.2.3 Моделирование работы дизель-генераторной установки	54
2.2.4 Моделирование совместной работы каналов преобразования энергии.....	59
Выводы по второй главе:	61
ГЛАВА 3. Оценка технического состояния оборудования	62
3.1 Алгоритмы диагностирования комбинированной электростанции ...	63
3.1.1 Разработка алгоритмов диагностирования	67

3.1.2 Разработка системы распознавания неполных последовательностей результатов проверок.....	75
3.2 Количественная оценка технического состояния оборудования	84
Выводы по третьей главе:	95
ГЛАВА 4. Прогнозирование количественной оценки технического состояния оборудования	98
4.1 Прогнозирование оценки технического состояния при помощи ANFIS	98
4.2 Прогнозирование оценки технического состояния при помощи LSTM	111
Выводы по четвертой главе:	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
Список принятых сокращений	125
Список использованных источников	126
Приложение А	143
Приложение Б.....	150
Приложение В	153
Приложение Г	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Актуальность научной работы на тему «Оценка технического состояния оборудования комбинированной электростанции» обусловлена следующими обстоятельствами. Для электроэнергетики России отличительной чертой является отсутствие централизованного электроснабжения на значительной части территории страны. Из-за небольшой плотности населения в данных областях установившейся практикой является использование генерирующих комплексов малой мощности для индивидуального электроснабжения потребителей (малые населенные пункты, автономные промышленные объекты). Сейчас большая часть таких генерирующих комплексов представляет собой устройства, использующие углеводородное топливо – бензиновые и дизельные генераторные установки [1]. К их достоинствам относится простота устройства и изготовления. К недостаткам – необходимость доставки топлива, что может являться проблемой для удаленных и труднодоступных объектов, ограниченное количество полезных ископаемых, а также негативное влияние на экологическую обстановку. Способствовать компенсации данных недостатков может использование экологически чистых и неисчерпаемых возобновляемых источников энергии. В настоящее время увеличение доли возобновляемых источников в энергетическом балансе является приоритетной задачей развития электроэнергетики для многих государств [2-4], а наибольшее распространение на данный момент имеют ветровые и фотоэлектрические генерирующие установки [5]. Основными недостатками данных возобновляемых источников энергии являются неравномерное распределение их потенциала на территории России, а также их нестабильность, связанная с изменением времени суток и сезонов, что требует использования накопителей и резервных источников энергии.

Создание комбинированных генерирующих комплексов, использующих возобновляемые источники энергии и углеводородное топливо, является перспективным решением, уменьшающим проявления недостатков данных источников энергии и позволяющим в полной мере использовать преимущества каждого источника. Выбор структуры такого комплекса в настоящее время является актуальной задачей, поскольку характеристики каждого потребителя электрической энергии (населенный пункт, промышленный объект и др.), особенности территориального расположения и климатической обстановки формируют уникальный набор факторов, требующих индивидуального подхода при разработке генерирующего комплекса. Кроме того, прогресс машиностроения, приборостроения, развитие силовой электроники, требует постоянного пересмотра существующих решений с целью повышения их эффективности и надежности.

Для поддержания работоспособности подобных объектов энергетики необходимо проведение своевременного технического обслуживания. Плановое техническое обслуживание удаленных объектов может быть связано со значительными капитальными затратами из-за погодных и климатических условий, изолированного расположения. Также важной задачей является снижение численности персонала, находящегося непосредственно на объекте, поскольку присутствие людей всегда сопряжено с финансовыми издержками, может представлять опасность для жизни и здоровья, или попросту невозможно. Переходу от планового технического обслуживания к обслуживанию по мере необходимости, а также уменьшению численности обслуживающего персонала, способствует построение развитой системы мониторинга и диагностики. Однако на данный момент эта задача является нерешенной, а подходы к разработке подобных систем требуют совершенствования с целью повышения точности прогнозирования технического состояния

оборудования.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.2. - «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа соответствует формуле специальности в части исследования самостоятельного электротехнического комплекса, в качестве которого рассматривается комбинированная электростанция с совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерацией, элементы которой требуют диагностики и прогнозирования технического состояния.

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности по пункту 1 – имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования промышленного назначения (глава 2), по пункту 3 – разработка, структурный и параметрический синтез систем и их компонентов (глава 1, 2), по пункту 4 – исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов (главы 3, 4).

Степень разработанности проблемы.

Исследования в области систем диагностирования и прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования ведут коллективы многих российских и зарубежных организаций: ВНИИЭ, ОАО Сигма, ОАО Звезда, НПП Полет, ВГУВТ, ЛЭТИ, Fubag, Honda, Kipor, и др. Авторами исследований в данном направлении являются российские и зарубежные ученые Ключев В.В., Осипов О.И., Усынин Ю.С., Пархоменко П.П., Саушев А.В., Сарваров А.С., Крюков О.В., Верзаков Г.Ф., Мозгалеvский А.В., Глазунов Л.П., Назарычев А.Н.,

Байдюк М.А., Мещеряков В.Н., Петушков М.Ю., Левин В.М., Мироновский Л.А., Норенков И.П., Половко А.М., Портнягин Н.Н., Рябинин И.А., Сахаров В.В., Yang C., Gangsar P., Choudhary A., Shi M., Mateus, V. C., Aydin O. и др. Несмотря на значительную важность и актуальность, многие задачи в данной области в настоящее время являются нерешенными и создают свободное поле для исследований. Причиной медленного и неполного решения обозначенных задач является сложность точного описания процессов старения и износа при помощи математического аппарата, наличие большого количества трудноизмеримых факторов, влияющих на техническое состояние оборудования, а также необходимость проведения длительных экспериментальных исследований на действующем оборудовании, включая разрушающие испытания.

Цель работы: разработка и исследование систем количественной оценки и прогнозирования технического состояния оборудования автономной комбинированной электростанции.

Задачи исследования:

- разработка имитационной модели электростанции с совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерацией;
- экспертный анализ диагностических признаков, влияющих на техническое состояние оборудования комбинированной электростанции;
- разработка алгоритмов поиска неисправного элемента электротехнического оборудования;
- разработка экспертных систем количественной оценки технического состояния электротехнического оборудования;
- разработка системы прогнозирования количественной оценки технического состояния электротехнического оборудования.

Объект исследования - комбинированная электростанция с ветро-солнечно-дизельной генерацией.

Предмет исследования - диагностика и прогнозирование технического состояния устройств, входящих в состав электротехнического комплекса.

Методы исследования - для решения поставленных задач применяются методы имитационного моделирования, теория электрических машин и аппаратов, теория надежности, теория нечетких множеств, теория и методы машинного обучения.

Научная новизна работы:

- предложен способ модификации алгоритмов диагностирования оборудования электротехнического комплекса на основе теории графов, отличающийся от известных уменьшением числа проверок, необходимых для поиска неисправного элемента, без уменьшения требуемой глубины диагностирования, благодаря распознаванию и классификации неполных последовательностей результатов проверок при помощи нейронной сети, позволяющий осуществлять поиск единичных неисправностей объекта диагностирования;

- предложен способ количественной оценки технического состояния оборудования, входящего в состав электротехнического комплекса, с использованием аппарата нечеткой логики, отличающийся от известных методов способностью к учету любых характерных состояний объекта оценки и комбинаций величин диагностических признаков, а также необратимых процессов ухудшения технического состояния оборудования, позволяющий проводить ранжирование и прогнозирование технического состояния оборудования, а также оптимизировать периодичность технического обслуживания;

- предложен способ формирования вариативного прогноза количественной оценки технического состояния оборудования, входящего в состав электротехнического комплекса, с помощью адаптивных нейро-нечетких сетей и сетей с долгой кратковременной памятью, позволяющий уменьшить вероятность внезапного выхода оборудования из строя и

принять меры по минимизации возможных негативных последствий, а также снизить вероятность неверных управленческих решений в случае возникновения ошибочных результатов прогнозирования.

Практическая значимость.

Разработанные алгоритмы поиска неисправностей элементов комбинированной электростанции могут быть использованы в программном обеспечении автоматической системы мониторинга.

Разработанные системы оценки и прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования могут быть интегрированы в существующие экспертные системы поддержки принятия решения оператором энергетического комплекса с целью предотвращения внезапных отказов оборудования и для перехода от планового технического обслуживания к техническому обслуживанию по требованию.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы поиска неисправного элемента электротехнического оборудования комбинированной электростанции с распознаванием и классификацией неполных последовательностей результатов проверок.

2. Способ формирования количественной оценки технического состояния электротехнического оборудования при помощи систем нечеткой логики.

3. Способ прогнозирования технического состояния комбинированной электростанции путем анализа оценок технического состояния при помощи адаптивных нейро-нечетких сетей и сетей с долгой кратковременной памятью.

Апробация результатов работы.

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы были представлены, обсуждены и получили положительные отзывы на региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях: Научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики» (г. Нижний Новгород, 2017, 2019, 2020, 2021 гг.); Научно-техническая конференция Будущее технической науки (г. Нижний Новгород, 2017, 2019 гг.), Научно-техническая конференция Фёдоровские чтения (г. Москва, 2019 г.), Научно-техническая конференция Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (г. Тольятти, 2019 г.), Международная (XXII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП- 2020 (г. Санкт-Петербург, 2020), International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA (г. Липецк, 2020, 2021 гг.).

Связь диссертации с научными программами.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности по теме «Автономные гибридные электроэнергетические комплексы» (FSWE-2022-0005).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 20 работ, включая 4 статьи в периодических журналах, рекомендованных ВАК, из них 1 статью – в периодическом журнале базы RSCI, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных IEEE/Scopus, 6 статей в материалах Международных и Всероссийских конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688432.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и четырех приложений.

Объем диссертации составляет 142 страницы основного текста, 74 рисунка, 5 таблиц, список использованных источников включает 125 наименований.

ГЛАВА 1. Электроснабжение потребителей вне Единой энергетической системы России

1.1 Анализ возможностей использования возобновляемых источников энергии на территории России

Увеличение доли использования экологически чистых и возобновляемых источников энергии является важной целью, поставленной в рамках политики устойчивого развития энергетических систем многих государств. Достижение данной цели особенно важно для областей, находящихся вне централизованных энергосистем, для электроснабжения которых используется топливо из ископаемых источников. Главные причины для этого – ограниченность запасов полезных ископаемых, а также негативное воздействие на окружающую среду продуктов сгорания. Многие технологии преобразования энергии из возобновляемых источников были разработаны сравнительно недавно, однако уже в настоящее время достигли уровня развития, позволяющего им конкурировать с традиционными системами выработки электроэнергии.

Солнечное излучение и потоки ветра являются на данный момент наиболее широко используемыми возобновляемыми источниками энергии, которые применяются для выработки электроэнергии и нагрева различных теплоносителей.

На текущий момент солнечная энергетика занимает первое место по суммарной мощности генерирующих установок среди других возобновляемых источников, не считая традиционной гидроэнергетики [6]. Потенциал солнечного излучения как источника энергии крайне высок: суммарная мощность излучения, поступающего на Землю, многократно превышает мощность действующих энергетических установок. Солнечное излучение доступно практически повсеместно. Ресурсы солнечной энергии, располагаемые всеми государствами, даже

расположенными на высокой географической широте, могли бы в значительной степени обеспечить их потребности в энергии с учетом обозримой перспективы.

Многие другие возобновляемые источники энергии имеют в своей основе солнечное излучение – растительная биомасса, потоки ветра и воды. Рост растений во многом зависит от фотосинтеза, а атмосферные процессы, связанные с передвижением воздуха и влаги возникают по причине неравномерности нагрева земной поверхности солнечным излучением.

Солнце является источником излучения с температурой порядка 6000°K . При характерной для фотоэлектрических преобразователей равновесной температуре, составляющей 350°K , КПД преобразования солнечной энергии в электрическую теоретически может превышать 80%. В настоящее время наибольший достигнутый КПД фотоэлектрических преобразователей составляет 44,5% [7] и стремится к 50% в лабораторных условиях [8].

Значительными недостатками солнечного излучения как источника энергии являются нестабильность, (в зависимости от времени суток, времени года, погодных условий), а также сравнительно малая плотность потока энергии (в среднем около 1 кВт/м^2 [9]).

Ветроэнергетические установки в настоящее время занимают второе место по суммарной мощности генерирующих установок среди возобновляемых источников энергии [6]. Однако площадь территорий, подходящих для использования данного источника для выработки электроэнергии значительно меньше, по сравнению с солнечным излучением. Основным недостатком потока ветра в качестве источника энергии также является его нестабильность. Вместе с этим мощность потока ветра пропорциональна третьей степени его скорости, что приводит к высокой зависимости эффективности ветроэнергетических

установок от места их расположения. В зависимости от класса ветроустановки и средней скорости ветра в месте ее расположения удельная мощность может составлять от 100 Вт/ м² до 1000 Вт/ м² [10].

Данные особенности солнечного излучения и потока ветра как источников энергии затрудняют создание эффективных энергетических установок для массового применения, поскольку приводят к необходимости сооружения фотоэлектрических преобразователей больших размеров, а также использования накопителей энергии для компенсации нестабильности данных источников. Это приводит к тому, что итоговая стоимость энергетических установок, использующих данные источники оказывается значительной, что снижает их конкурентоспособность по отношению к традиционным источникам, в особенности таким дешевым, как каменный уголь. В этих условиях достоверность исходных данных о располагаемом потенциале солнечной и ветровой энергии в конкретной местности является одним из важнейших факторов, которые определяют экономическую эффективность проектирования и использования данных типов генерирующих установок. Поскольку Россия обладает большими территориями, на которых присутствуют практически все типы климатических зон, достоверная оценка доступных ресурсов ветровой и солнечной энергии в конкретных географических местоположениях является крайне важной задачей. Только в случае ее решения потребители и разработчики генерирующих установок данных типов будут иметь информацию об эффективности их работы, сроках окупаемости, необходимости использования резервных источников энергии и других важных аспектах их функционирования.

Информация о суммарной мощности солнечного излучения на территории России является важной при проектировании генерирующих установок, не использующих концентраторы излучения (солнечные коллекторы для нагрева теплоносителей, фотоэлектрических

преобразователей без концентраторов и другие), а также установок, содержащих концентраторы (параболоидные, параболоцилиндрические и другие).

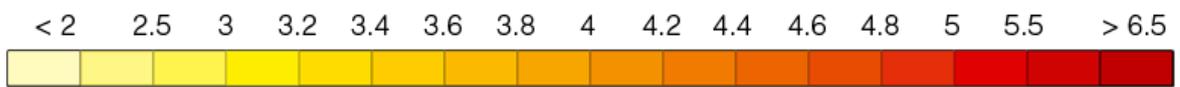
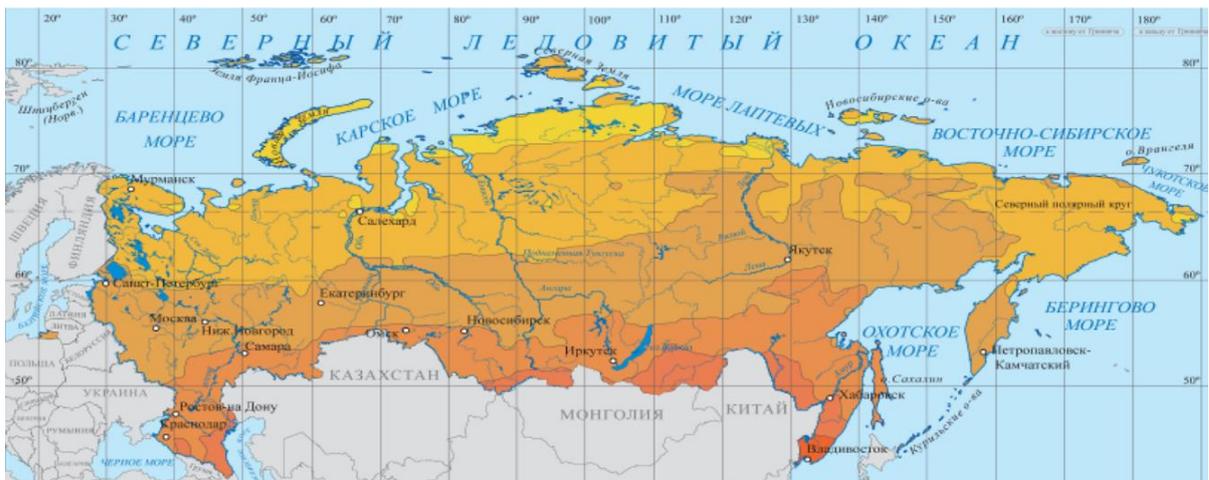
Для разработки ветроэнергетических установок важной является информация о распределении среднегодовых скоростей ветра на высотах 10 и 50 метров. С этой целью составляются карты распределения скоростей ветра, которые позволяют получить представление об энергетическом потенциале потока воздуха в конкретной местности, и дают возможность дать начальную оценку эффективности использования ветроэнергетических установок на данной территории. Однако истинные параметры потоков воздуха значительно зависят от географических условий конкретной местности, и информация, представленная на данных картах требует уточнения путем организации прямых измерений в предполагаемом месте использования энергетической установки.

Специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова, Института энергетики НИУ ВШЭ, Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН) были разработаны атласы, содержащие информацию о распределении энергетического потенциала солнечного излучения и потоков ветра на территории России [11, 12]. На рис. 1.1 представлено распределение средней за год суточной суммы солнечной радиации, приходящей на поверхность с углом наклона, равным географической широте [11].

На рис. 1.2 представлено распределение средней за год суточной суммы прямой солнечной радиации, приходящей на следящую за солнцем поверхность [11].

На рис. 1.3 представлено распределение среднегодовой скорости ветра на высоте 50 метров [12].

На рис.1.4 представлено распределение среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м [12].



кВт·ч/м² в день

Рис. 1.1 – Средняя за год суточная сумма солнечной радиации, приходящей на поверхность с углом наклона, равным географической широте



кВт·ч/м² в день

Рис. 1.2 – Средняя за год суточная сумма прямой (без учета рассеянной) солнечной радиации, приходящей на поверхность, следящую за солнцем

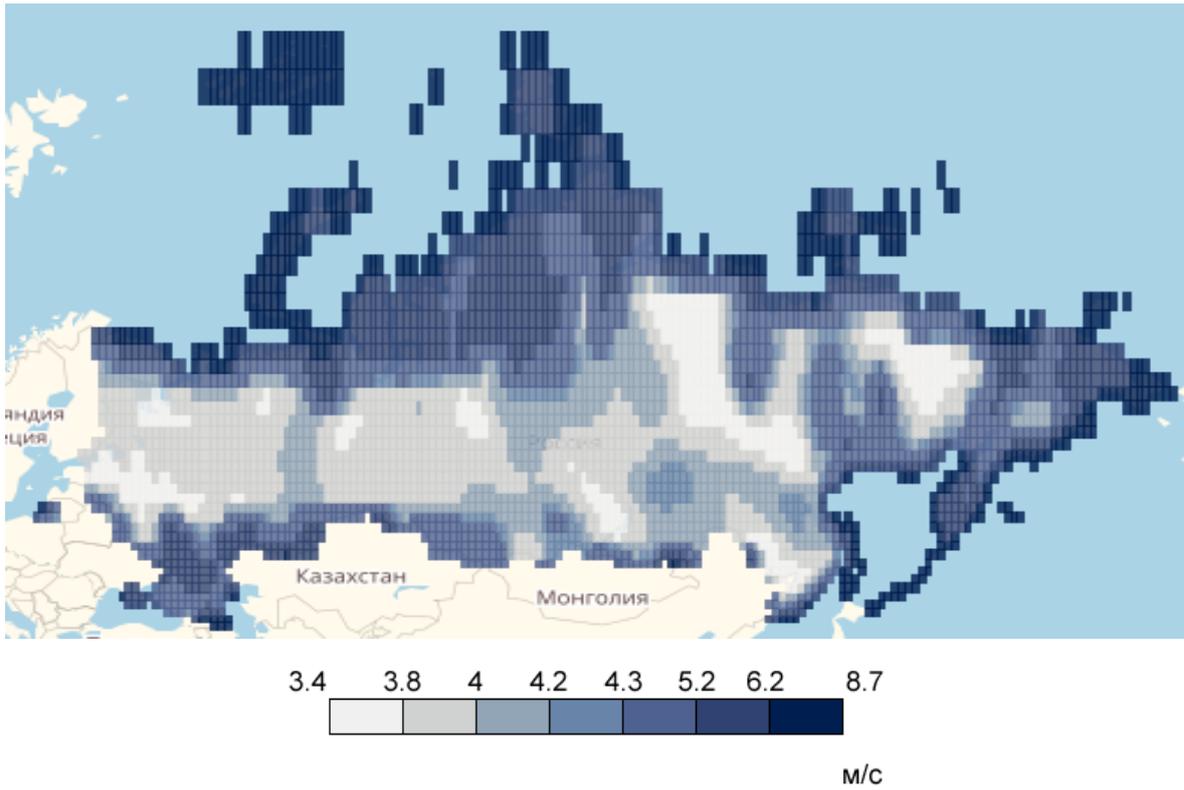


Рис. 1.3 – Среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м

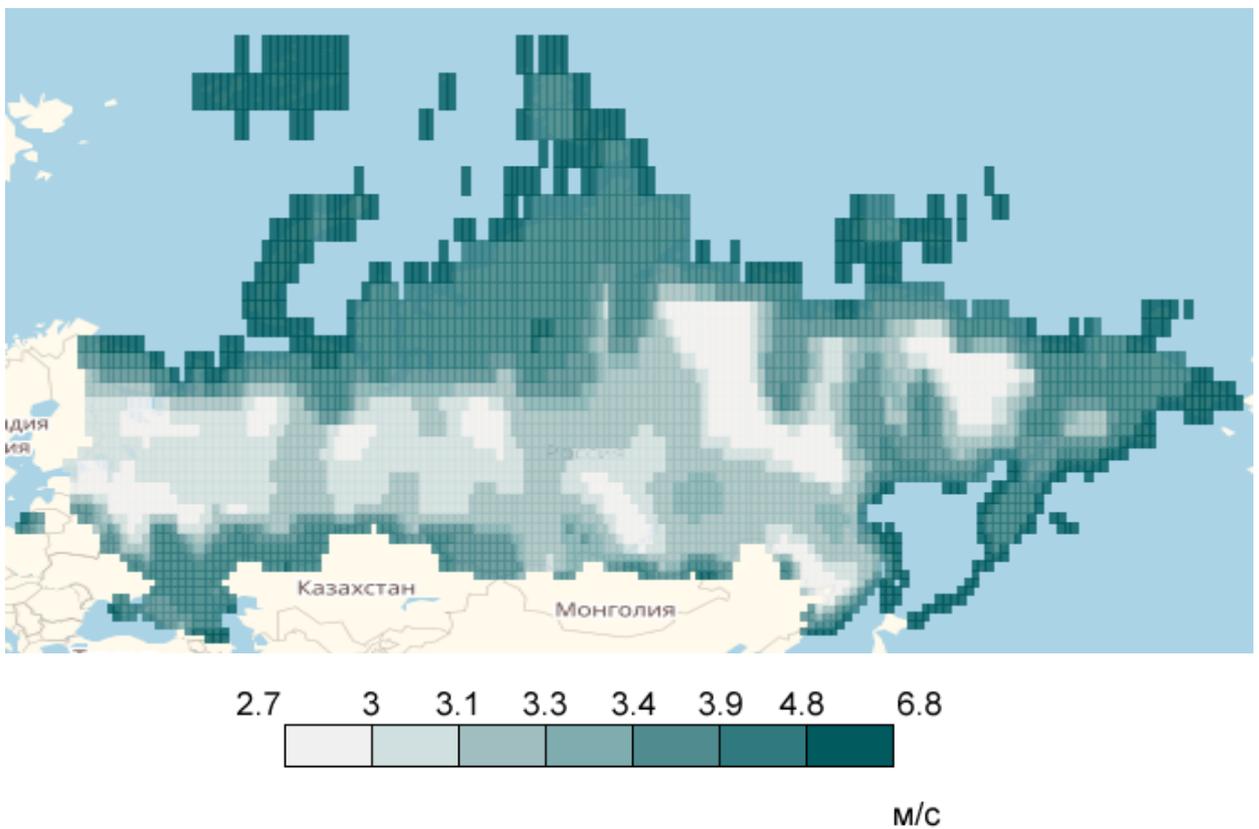


Рис. 1.4 – Среднегодовая скорость ветра на высоте 10 м

Несмотря на то, что территории России располагаются по большей части в средних и высоких географических широтах, исследования специалистов ОИВТ РАН показывают, что средняя за год суточная сумма солнечной радиации, приходящей на поверхность с углом наклона, равным географической широте, для многих районов страны составляет 4-5 кВт·ч/м². Сопоставимыми показателями потенциала солнечного излучения обладают европейские регионы, в которых солнечная энергетика уже имеет высокий уровень развития и значительную суммарную мощность установленных генерирующих установок. Тем не менее, географическое положение территорий России характеризуется значительной сезонной неравномерностью поступления энергии солнечного излучения, из-за которой мощность поступающего излучения в зимний период может быть семикратно ниже, чем в летний период. Данное обстоятельство приводит к тому, что для значительной доли областей использование генерирующих установок на основе энергии солнечного излучения оказывается возможным только в комбинации с другими источниками энергии, к примеру, ветроэнергетическими или дизель-генераторными установками.

Наибольшим потенциалом ветроэнергетических ресурсов обладают южная часть России, а также северные и восточные прибрежные районы. В средней же части территории страны средняя скорость ветра относительно мала. Однако в отличие от солнечного излучения, энергетический потенциал потоков ветра на большей части территории увеличивается в зимнее время. Благодаря этому, совместное использование солнечных и ветровых энергетических установок может уменьшить влияние времени года на стабильность выработки электроэнергии.

Важным обстоятельством является тот факт, что в отличие от поступления солнечной энергии интенсивность ветровых потоков в

зимнее время на большинстве территорий выше, чем летом, и тем самым солнечные и ветровые установки дополняют друг друга с точки зрения обеспечения сезонной стабильности выработки электроэнергии. Исследования, выполненные специалистами Объединенного института высоких температур РАН показывают, что экономическая эффективность установок с совмещенной ветро-солнечной генерацией во многих регионах России может быть сопоставима с эффективностью генераторных установок с двигателями внутреннего сгорания, работающих на подвозимом топливе. Экономический интерес также представляет использование комбинированных генерирующих установок малой мощности для электроснабжения объектов дорожного освещения и устройств дорожной и морской сигнализации.

На рис. 1.5 приведена карта Единой энергетической системы России [13].



Рис. 1.5 – Карта Единой энергетической системы России

Карты распределения ресурсов солнечной и ветровой энергетики позволяют сделать вывод о том, что территории, находящиеся вне Единой энергетической системы обладают сравнительно высоким энергетическим

потенциалом данных возобновляемых источников энергии, использование солнечных и ветровых энергетических установок представляет интерес для многих районов России, расположенных вне зоны централизованного электроснабжения. Эффективность использования возобновляемых источников энергии на труднодоступных территориях и удаленных объектах обусловлена также проблемой транспортировки топлива, приводящей к значительному увеличению стоимости электрической и тепловой энергии во многих северных областях и высокогорных регионах. В этих условиях установки на основе возобновляемых источников энергии могут гармонично дополнить существующие системы генерации на основе ДВС.

Можно заключить, что перспективность использования энергии солнечного излучения и потоков ветра в России определяется следующими причинами:

- значительная часть территории страны находится вне Единой энергетической системы, для электроснабжения данных областей используется большое количество установок малой мощности, в настоящее время использующих топливо, производимое из полезных ископаемых;

- низкая степень газификации городских и сельских населенных пунктов;

- освоение новых территорий, в том числе Арктической зоны, Дальнего Востока и других требует постепенного увеличения мощности генерирующих установок, использующих локальные энергетические ресурсы, не требующие транспортировки;

- в зонах централизованного энергоснабжения для повышения энергетической безопасности потребителей приоритетно развитие малой распределенной энергетики, создание резервных источников энергоснабжения;

- развитие новых энергетических технологий – важный аспект усиления экспортного потенциала страны в энергетической сфере, а также обороноспособности и независимости от внешнеполитической обстановки;

- необходимость уменьшения эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу с целью улучшения глобальной экологической обстановки.

Следует отметить, что использование возобновляемых источников энергии также поощряется правительством Российской Федерации. 24 марта 2022 были утверждены изменения, которые вносятся в Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года [2]. Согласно документу, инвесторы, финансирующие строительство таких энергетических установок, использующих возобновляемые источники энергии, получают фиксированный возврат средств за каждую произведенную единицу электрической энергии.

Вице-премьер Российской Федерации Александр Валентинович Новак на Международном финансовом конгрессе 28 июня- 2 июля 2021 года сообщил, что в данный момент перед энергетической отраслью стоит задача увеличения доли электроэнергии от возобновляемых источников в энергобалансе страны с 1% до 10% к 2040 году. Перед этим компания «Россети» сообщила, что намерена к 2024 году увеличить генерируемую мощность объектов возобновляемой энергетики почти в 20 раз - до 3,8 ГВт [14]. В последнее время в работу были введены крупнейшие в России ветряные электростанции: Кочубеевская и Адыгейская, мощностью 210 и 150 МВт, а также солнечные электростанции «Медведица», «Луч», «Светлая», «Астерион», «Шовгеновская» и другие. Министерством энергетики РФ разрабатываются проекты правительственных постановлений, направленных на выравнивание конкурентных условий

для производителей электроэнергии на основе использования возобновляемых источников энергии и ископаемых видов органического топлива, что должно способствовать ускоренному развитию возобновляемой энергетики России.

1.2 Структуры электростанций для электроснабжения потребителей вне ЕЭС России

Выбор структуры генерирующего комплекса для электроснабжения потребителей, не имеющих доступа к Единой энергетической системе, зависит от большого числа факторов, среди которых необходимо выделить следующие: величина мощности электроэнергии, потребляемой объектом, требования к надежности и бесперебойности электроснабжения, доступность того или иного источника энергии для данного потребителя, технико-экономические показатели системы электроснабжения [15]. В зависимости от этих и других факторов осуществляется выбор подходящих источников энергии и структуры генерирующего комплекса.

1.2.1 Системы выработки электроэнергии на основе ископаемого топлива

В настоящее время устоявшимся решением задачи электроснабжения потребителей, находящихся вне зоны централизованного электроснабжения, является использование системы, состоящей из двигателя внутреннего сгорания и генератора. Могут применяться газовые, бензиновые, дизельные двигатели внутреннего сгорания, синхронные и асинхронные генераторы. Наиболее распространена система с дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и синхронным генератором (СГ). В данной системе постоянство частоты выходного напряжения обеспечивается регулятором скорости вращения ДВС, поддерживающего частоту вращения вала неизменной, постоянство амплитуды выходного напряжения обеспечивается

регулятором тока возбуждения СГ [16, 17]. Данная схема широко распространена благодаря относительно высокой надежности, простоте и дешевизне, а при работе с мощностью электрической нагрузки, близкой к номинальной – имеет сравнительно высокий КПД. Однако практически для любого потребителя электроснабжения характерно непостоянство требуемой мощности электроэнергии, из-за чего эксплуатация подобных дизель-генераторных установок с мощностью нагрузки, близкой к номинальной, является крайне сложно разрешимой задачей. При этом работа дизель-генераторной установки с неизменной частотой вращения вала ДВС и изменяющейся величиной нагрузки имеет ряд негативных последствий, включающих повышенный расход топлива и сниженный КПД [18]. Одно из возможных решений данной проблемы, предложенных к настоящему моменту, заключается в регулировании частоты вращения вала ДВС с обеспечением эффективного режима работы в зависимости от величины мощности электрической нагрузки [19 - 21]. Вместе с этим при изменении частоты вращения вала ДВС возникает задача поддержания требуемых частоты и амплитуды выходного напряжения. Одним из наиболее широко распространенных в настоящее время решений данного вопроса является использование полупроводниковых преобразователей напряжения, подключаемых к генератору переменного тока [22 - 24]. Благодаря высокому уровню развития преобразовательной техники данный способ обеспечивает большую вариативность исполнения генерирующей установки, позволяющую наилучшим образом адаптировать ее к различным применениям. Поскольку значительной части потребителей необходимо питание переменным напряжением, в дизель-генераторных установках с переменной частотой вращения вала зачастую применяются преобразователи типа АС/АС, рис. 1.6-а. По принципу действия выделяют двухзвенные преобразователи со звеном постоянного тока (ДПЧ), и преобразователи с непосредственной связью

(НПЧ), обеспечивающие изменение параметров электрической энергии без промежуточных преобразований.

ДПЧ в настоящее время является наиболее распространенной топологией, полностью подходящей для большинства видов промышленного и бытового применения. Однако для данной топологии характерны двукратное преобразование энергии, приводящее к дополнительным потерям, а также старение и выход из строя электролитических конденсаторов звена постоянного тока.

Среди существующих типов непосредственных преобразователей частоты перспективным направлением развития являются матричные преобразователи частоты (МПЧ) [25 - 27]. МПЧ обладает такими преимуществами, как отсутствие элементов звена постоянного тока, подверженных старению, что повышает надежность устройства, повышает коэффициент полезного действия и уменьшает габариты, а также обеспечение двунаправленного потока передачи энергии, что позволяет производить коррекцию входного коэффициента мощности без дополнительных технических средств [28 - 31].

МПЧ также имеют следующие недостатки:

- максимальный коэффициент передачи по напряжению ограничен величиной 0,866 при синусоидальных формах входных токов и выходных напряжений;

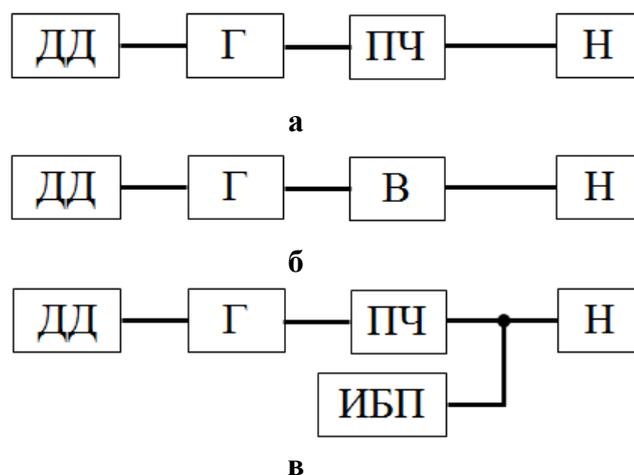
- используется большее количество полупроводниковых приборов, чем в преобразователях частоты со звеном постоянного тока;

- сложность алгоритмов системы управления.

МПЧ не имеют столь широкого распространения по сравнению с ДПЧ, однако их применение в составе дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения вала является возможным и в некоторых ситуациях более предпочтительным, чем использование ДПЧ [32 - 34].

В случае, если потребители электроэнергии адаптированы к питанию постоянным напряжением, в дизель-генераторных установках с переменной частотой вращения вала используются преобразователи типа АС/DC, которые чаще всего выполняются по схеме с понижающим высокочастотным трансформатором, позволяющим получить выходное напряжение 12 В или 24 В, рис. 1.6-б.

При необходимости наличия резервного источника энергии применяются схемы, в которых в состав комплекса включается источник бесперебойного питания, содержащий зарядное устройство аккумуляторных батарей и инвертор напряжения, осуществляющий питание потребителей в течение определенного времени при отключении ДВС по той или иной причине, рис. 1.6-в.



ДД – дизельный двигатель; Г – генератор; ПЧ – преобразователь частоты; В – выпрямитель; ИБП – источник бесперебойного питания; Н – нагрузка;

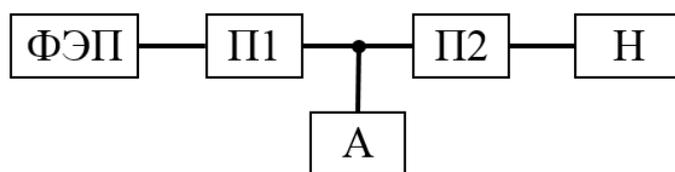
Рис. 1.6. Структурные схемы дизель-генераторных установок переменной частоты вращения: а – для потребителей переменного тока; б – для потребителей постоянного тока; в – с использованием источника бесперебойного питания

1.2.2 Системы выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников

В настоящее время наиболее широко используемыми для генерации электроэнергии среди возобновляемых источников являются солнечное излучение и потоки ветра. Возможность использования данных

источников энергии для электроснабжения потребителей во многом зависит от энергетического потенциала данных источников в конкретной местности, стабильности их во времени, а также величины требуемой потребителем мощности электроэнергии.

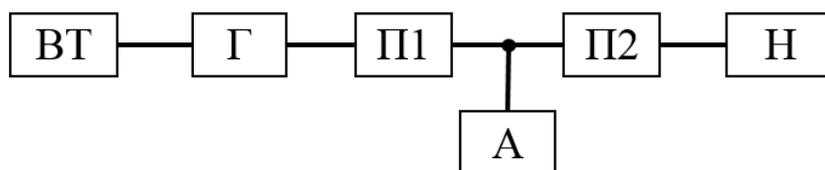
В большинстве географических местоположений солнечное излучение и ветровой поток обладают значительной изменчивостью во времени, поэтому в составе генерирующей установки должно присутствовать устройство накопления электроэнергии, в противном случае стабильное электроснабжение потребителей при помощи только одного возобновляемого источника становится практически невозможным. Наиболее часто в роли накопителей используются аккумуляторные батареи. Структурные схемы генерирующих установок малой мощности, в которых применяются энергия ветра и солнечного излучения, представлены на рис. 1.7 и рис. 1.8.



ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; П1 – DC/DC преобразователь; А – аккумуляторная батарея; П2 – DC/AC преобразователь; Н – нагрузка;

Рис. 1.7 – Структурная схема генерирующей установки с использованием солнечной энергии

В приведенной на рис. 1.7 структуре генерирующей установки преобразование энергии солнечного излучения в электрическую осуществляется при помощи фотоэлектрических преобразователей. Следующим элементом системы является DC/DC преобразователь, осуществляющий питание DC/AC преобразователя и направляющий избыток энергии на заряд аккумуляторных батарей, которые выступают источником энергии при отсутствии солнечного излучения. DC/AC преобразователь формирует выходное напряжение требуемой амплитуды и частоты.



ВТ – ветровая турбина; Г – генератор; П1 – АС/DC преобразователь; А – аккумуляторная батарея; П2 – DC/AC преобразователь; Н – нагрузка;
Рис. 1.8 – Структурная схема генерирующей установки с использованием энергии ветра

В структуре, приведенной на рис. 1.8 движение ветрового потока преобразуется во вращательное движение вала с помощью ветровой турбины. Ветровая турбина приводит во вращение электрический генератор, чаще представляющий собой синхронный генератор с постоянными магнитами. К генератору подключается АС/DC преобразователь, осуществляющий питание DC/AC преобразователя и направляющий избыток энергии на заряд аккумуляторных батарей. Аккумуляторные батареи являются источником энергии при отсутствии ветрового потока достаточной скорости. DC/AC преобразователь формирует выходное напряжение требуемой амплитуды и частоты.

1.2.3 Комбинированные системы выработки электроэнергии

Поскольку энергетический потенциал солнечного излучения и ветрового потока подвержены значительным изменениям, имеющим стохастический характер и не соотносящимся с типичными графиками потребления электроэнергии, электроснабжение потребителей, не имеющих доступа к Единой энергетической системе только лишь от данных возобновляемых источников является крайне трудноразрешимой задачей.

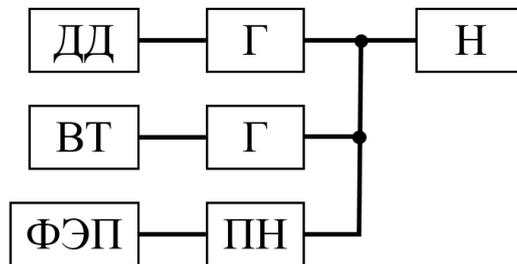
Повысить надежность и бесперебойность электроснабжения может применение систем с совмещенной солнечно-ветровой генерацией. Однако из-за нестабильности данных источников даже совместное их использование не может исключить возможных перебоев

электроснабжения, для этого необходимо использование гарантированного источника энергии на основе топлива из полезных ископаемых [35 - 37].

Современные энергетические установки для питания потребителей, находящихся вне зоны централизованного электроснабжения, могут включать в себя преобразователи солнечной, ветровой энергии и ДВС в различных сочетаниях, соотношение мощностей и роль данных источников может также варьироваться. Известны различные варианты подобных энергетических комплексов [38 - 41], однако вопрос создания структуры комбинированного энергетического комплекса в настоящий момент не имеет однозначного технического решения, что объясняется наличием преимуществ и недостатков у всех существующих структурных схем, а также постоянным прогрессом и совершенствованием приборостроения и машиностроения, требующим пересмотра имеющихся решений. Возможны варианты систем выработки электроэнергии, в которых ДВС является основным источником энергии, или используется только в качестве резерва. Возобновляемые источники также могут играть основную роль в объеме выработки электроэнергии, или применяться только для частичного уменьшения расхода топлива.

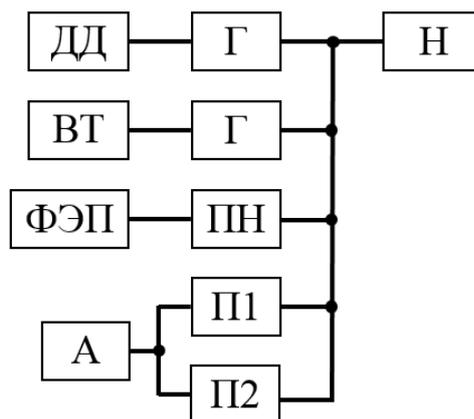
Наиболее простая структура комбинированной системы генерации с использованием возобновляемых источников энергии и дизельного двигателя представлена на рис. 1.9. В подобных системах основным источником энергии является дизельный генератор, а использование дополнительных возобновляемых источников энергии позволяет уменьшить номинальную мощность дизель-генераторной установки. В состав комплекса входят дизель-генераторная установка с постоянной частотой вращения вала, ветровая турбина с механическим регулятором частоты вращения вала, приводящая во вращение генератор, фотоэлектрические преобразователи с преобразователем напряжения

(инвертором). Каналы преобразования энергии объединены шиной переменного тока. Данная схема, благодаря простоте структуры, позволяет минимизировать перечень необходимого оборудования, а также не требует использования сложных алгоритмов системы управления, недостатком же является ее низкая функциональность. Включение источника бесперебойного питания достаточной емкости в данную схему генерирующего комплекса позволяет использовать возобновляемые ресурсы в качестве основного источника энергии, рис. 1.10.



ДД – дизельный двигатель; ВТ – ветровая турбина; Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; ПН – преобразователь напряжения; Н – нагрузка;

Рис. 1.9 – Структурная схема комбинированной генерирующей установки



ДД – дизельный двигатель; ВТ – ветровая турбина; Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; ПН – преобразователь напряжения; П1 – АС/DC преобразователь; А – аккумуляторная батарея; П2 – DC/AC преобразователь; Н – нагрузка;

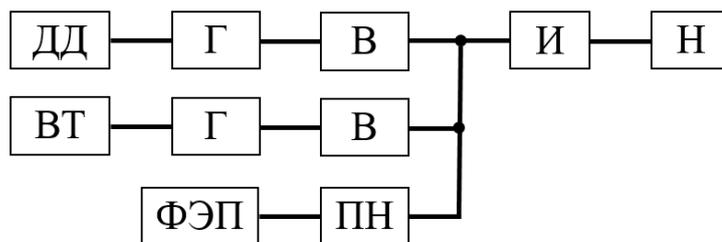
Рис. 1.10 – Структурная схема комбинированной генерирующей установки с источником бесперебойного питания

В этом случае запуск дизель-генераторной установки становится необходимым только при условии, если недостаточный потенциал возобновляемых источников сохраняется на протяжении длительного времени. Краткосрочные спады скорости ветрового потока и интенсивности солнечного излучения компенсируются за счет энергии, запасенной в аккумуляторной батарее источника бесперебойного питания. Для увеличения времени работы до разряда аккумуляторных батарей источника бесперебойного питания может быть целесообразным временное отключение неответственных потребителей [42 - 44].

Данная схема позволяет сократить использование дизель-генераторной установки, что обеспечивает экономию топлива и уменьшает расход моторесурса. Расширение функционала приводит к увеличению перечня необходимого оборудования и усложнению алгоритмов системы управления.

Следующей возможной модификацией является применение в комбинированной электростанции дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения вала. Как было отмечено ранее, их преимуществом является уменьшение расхода топлива при работе установки с нагрузкой, меньше номинальной величины за счет уменьшения частоты вращения вала ДВС.

В данном варианте структурной схемы преобразователи напряжения присутствуют в каждом канале генерации. В составе дизель-генераторной установки может использоваться преобразователь частоты со звеном постоянного тока, для стабилизации параметров выходного напряжения ветрогенератора также может быть использован преобразователь частоты со звеном постоянного тока, таким образом появляется возможность объединять каналы генерации не только шиной переменного тока, но и шиной постоянного тока, рис. 1.11.

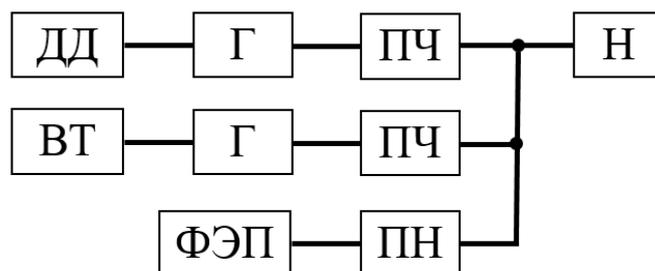


ДД – дизельный двигатель; ВТ – ветровая турбина; Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; ПН – преобразователь напряжения; В – выпрямитель; И – инвертор напряжения; Н – нагрузка;

Рис. 1.11 – Структурная схема комбинированной генерирующей установки с шиной постоянного тока

По сравнению с шиной переменного тока шина постоянного тока облегчает синхронизацию при одновременной работе каналов генерации, поскольку в данном случае нет необходимости синхронизировать фазу и частоту напряжений источников. Однако в данном варианте для обеспечения совместной работы каналов преобразования энергии номинальная мощность инвертора должна соответствовать суммарной мощности всех каналов преобразования энергии. Это обстоятельство уменьшает экономическую эффективность при работе электростанции с отключением одного или нескольких каналов преобразования энергии из-за недоиспользования инвертора по мощности. Кроме того, инвертор в данной схеме является единой точкой отказа, что требует принятия дополнительных мер для обеспечения бесперебойности электроснабжения.

Структурная схема комбинированной электростанции с дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения вала и объединением каналов генерации шиной переменного тока представлена на рис. 1.12.



ДД – дизельный двигатель; ВТ – ветровая турбина; Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты; ПН – преобразователь напряжения; Н – нагрузка;

Рис. 1.12 – Структурная схема комбинированной генерирующей установки с шиной переменного тока

Объединение источников энергии шиной переменного тока увеличивает требования к системе управления, поскольку требует синхронизации амплитуды, фазы и частоты напряжений источников, но вместе с этим облегчается интеграция генерирующего комплекса в существующую систему электроснабжения переменного тока и построение систем распределенной генерации [45, 46]. Кроме того, в данной схеме отсутствует единая точка отказа, что повышает надежность электроснабжения потребителей.

Выводы по первой главе:

1. Проведен обзор возможностей и перспектив использования возобновляемых источников энергии на территории России для электроснабжения областей, лежащих вне Единой энергетической системы. Перспективным вариантом электроснабжения таких областей является использование ветровой и солнечной энергии в качестве дополнения к используемому в настоящее время топливу из ископаемых источников.

2. Проведен обзор возможных схем генерирующих установок с различными комбинациями источников энергии. Схемы с использованием только одного источника энергии обладают простотой и дешевизной, однако, для получения синергетического эффекта необходимо

использование совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерации. Для объединения источников в единую систему могут использоваться схемы с шиной постоянного и переменного тока. Выбор схемы во многом зависит от особенностей конкретного объекта электроснабжения. В рамках данной работы в качестве объекта исследования была выбрана схема с совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерацией и объединением источников энергии шиной переменного тока. Данная схема представляет интерес в качестве объекта диагностирования, поскольку включает в себя широкий перечень оборудования, а также является перспективной с точки зрения создания систем распределенной генерации, в которых имеющиеся дизельные генераторы дополняются ветряными и солнечными источниками энергии.

ГЛАВА 2. Имитационная модель комбинированной электростанции

2.1 Структура имитационной модели комбинированной электростанции

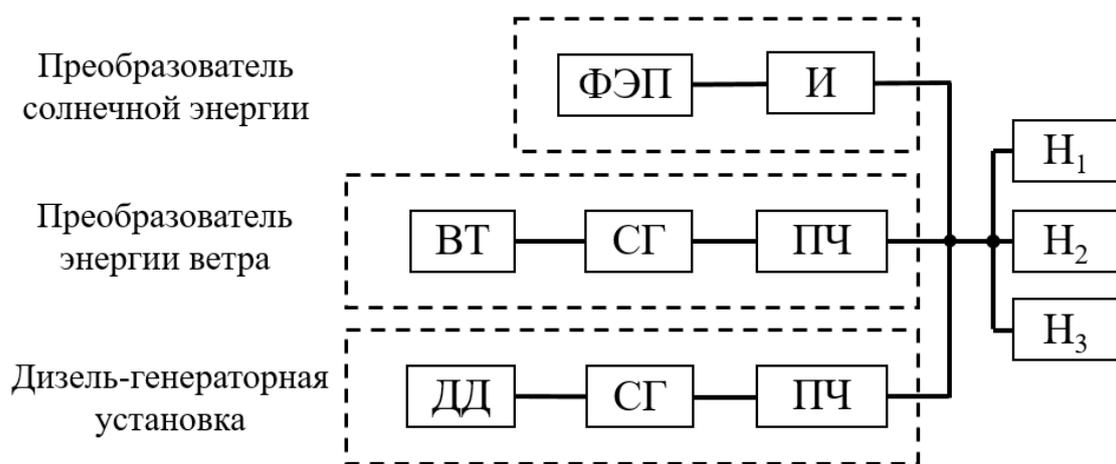
Для разработки систем мониторинга и прогнозирования технического состояния необходима информация о значениях физических величин, характеризующих объект диагностирования при его функционировании в различных режимах, включая аварийные. Поскольку такие режимы работы представляют опасность для оборудования и персонала, использование физической модели на данном этапе работы было признано нецелесообразным, поэтому для получения информации о значениях физических величин необходима разработка имитационной модели ветро-солнечно-дизельной электростанции. Имитационные модели комбинированных электростанций описываются в работах [47 - 50], однако их принципиальные схемы отличаются от схемы, рассматриваемой в данной работе. Кроме того, сжатость и неполнота описания, привязка к конкретным образцам оборудования, также, в некоторых случаях, значительные допущения и упрощения (замена детализированной модели оборудования передаточной функцией с одним входом и одним выходом, при которой из расчетов отбрасываются некоторые важные диагностические признаки) приводят к тому, что воссоздать описанные модели и использовать их для построения систем мониторинга и диагностики не представляется возможным. Можно заключить, что задача построения имитационной модели комбинированной электростанции с совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерацией в настоящее время полностью не решена, и для выполнения обозначенных целей исследования необходима разработка соответствующей модели, обладающей требуемым уровнем детализации. Для построения имитационной модели была выбрана схема комбинированной ветро-солнечно-дизельной электростанции с объединением каналов

преобразования энергии шиной переменного тока как один из наиболее универсальных вариантов структуры комбинированных электростанций, включающий в себя широкий перечень электротехнических устройств, подлежащих диагностике. В качестве основного инструмента моделирования используется программный пакет Matlab Simulink – среда с поддержкой визуального программирования для моделирования и анализа различных динамических систем.

Разработанная имитационная модель имеет следующую структуру:

- преобразователь солнечной энергии, включающий в себя фотоэлектрические преобразователи, инвертор напряжения;
- преобразователь энергии ветра, включающий в себя ветровую турбину, синхронный генератор, преобразователь частоты [51];
- дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, включающая в себя дизельный двигатель, синхронный генератор, преобразователь частоты;
- трёхфазная активно-индуктивная нагрузка, подключённая к шине переменного тока, состоящая из трех блоков.

Структурная схема модели представлена на рис. 2.1.



ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; **И** – инвертор напряжения; **ВТ** – ветровая турбина; **СГ** – синхронный генератор; **ПЧ** – преобразователь частоты; **N₁, N₂, N₃**, – трёхфазная активно-индуктивная нагрузка, потребители первой, второй, третьей категорий надёжности электроснабжения

Рис. 2.1. Структурная схема имитационной модели электростанции

Предлагаемая модель позволяет учитывать влияние физических величин, являющихся основными диагностическими признаками электротехнического оборудования, кроме того, позволяет воспроизводить одновременную работу каналов преобразования энергии на общую нагрузку, а также позволяет варьировать конфигурацию нагрузки в соответствии с категориями надежности электроснабжения потребителей. Соотношение мощностей источников энергии и потребителей было выбрано таким образом, чтобы обеспечить возможность моделирования как нормального режима работы оборудования, так и режима превышения номинальной мощности нагрузки, с целью формирования более полного набора данных для систем мониторинга, учитывающего различные вероятные режимы работы оборудования.

2.1.1 Преобразователь солнечной энергии

В качестве модели фотоэлектрических преобразователей используется блок PV array [52]. В блоке использованы параметры фотоэлектрических модулей 1Solitech 1STH-215-P. Расчетная генерируемая мощность системы фотоэлектрических преобразователей составляет 10 кВт при мощности солнечного излучения 500 Вт/м².

Блок PV Array представляет собой модель с пятью параметрами, включающую в себя источник тока, генерируемого солнечным излучением, диод, последовательное сопротивление и шунтирующее сопротивление для представления зависящих от освещенности и температуры вольт-амперных характеристик модулей, которые определяются выражениями:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T \cdot nI \cdot N}{q},$$

где I_d – ток диода, V_d – напряжение диода, I_0 – ток насыщения диода, nI

– фактор идеальности диода, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, T – температура модуля, N – количество модулей.

Фотоэлектрические преобразователи питают трехфазный трехуровневый (NPC) инвертор напряжения, представлен на рис. 2.2. Схемы замещения полупроводниковых приборов приводятся на рис. 2.3.

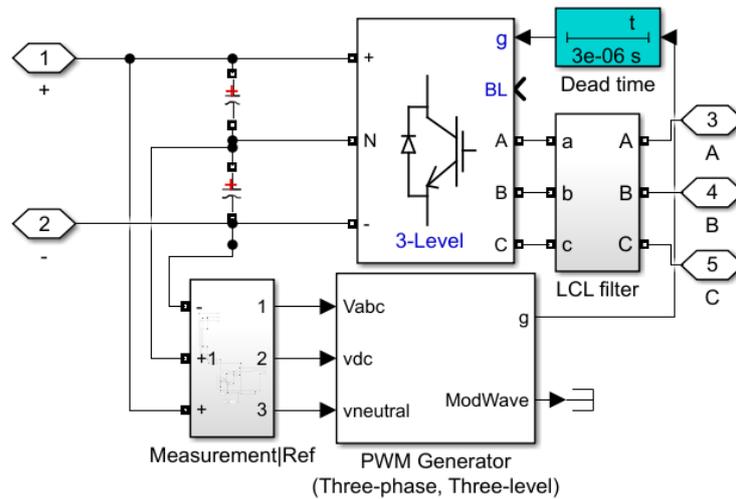


Рис. 2.2. Структура блока инвертора напряжения

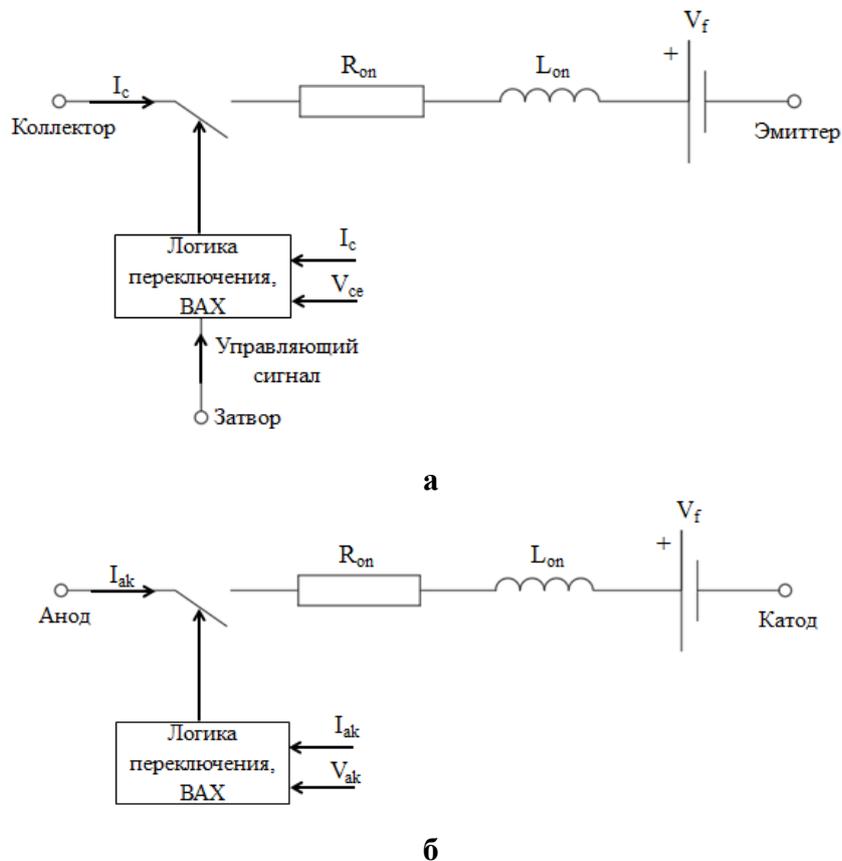


Рис. 2.3. Схемы замещения полупроводниковых приборов: а – IGBT транзистора; б - диода;

Предполагаем, что для диодов активное сопротивление R_{on} равно 0,001 Ом, индуктивное сопротивление L_{on} пренебрежимо мало, падение напряжения при протекании прямого тока V_f равно 0,8 В, для транзисторов активное сопротивление R_{on} равно 0,001 Ом, индуктивное сопротивление L_{on} пренебрежимо мало, падение напряжения при протекании прямого тока V_f равно 1,2 В. Импульсы управления формируются блоком ШИМ генератора в соответствии с заданием на амплитуду и частоту выходного напряжения. Частота ШИМ равна 6 КГц. Мертвое время при формировании сигналов управления транзисторами выбрано равным 3 мкс. Для фильтрации выходного напряжения преобразователя используется LCL-фильтр низких частот с параметрами $L_1=5$ мГн, $L_2=5$ мГн, $C=1,5$ мкФ. Структура преобразователя солнечной энергии в среде моделирования представлена на рис. 2.4.

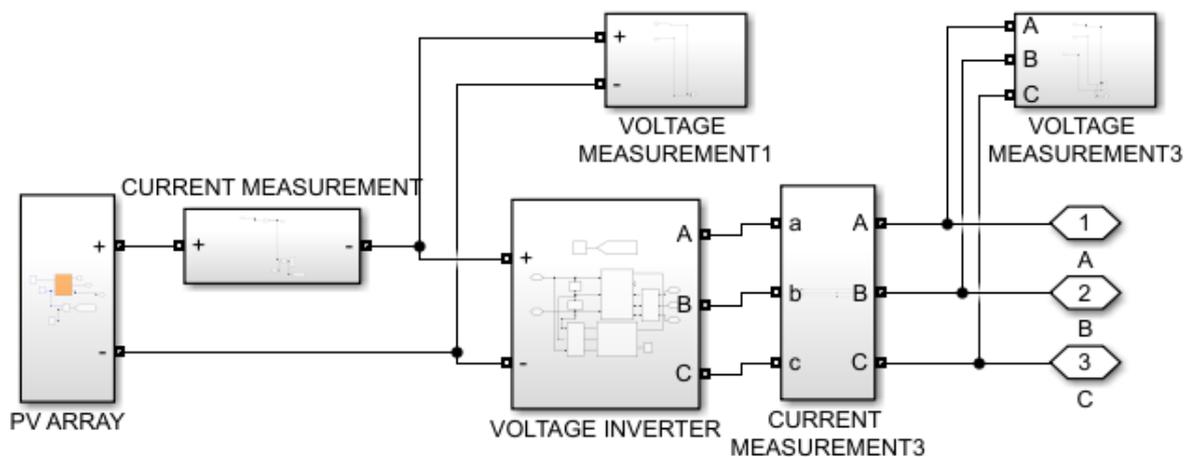


Рис. 2.4. Преобразователь солнечной энергии в среде моделирования

2.1.2 Преобразователь энергии ветра

Модель ветровой турбины представлена блоком Wind Turbine [53]. Блок имитирует работу ветровой турбины с горизонтальной осью вращения с номинальной механической мощностью 15 кВт, номинальной скоростью ветра 5 м/с, и формирует сигнал механической мощности, передаваемый в модель синхронного генератора, определяемой следующим выражением:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} V^3, \quad (2.2)$$

где P_m – выходная механическая мощность турбины, c_p – коэффициент использования энергии ветра, ρ – плотность воздуха, A – ометаемая площадь ветроколеса, V – скорость ветра, β – угол наклона лопастей, λ – быстроходность ветроколеса.

В качестве модели синхронного генератора используется блок Synchronous Machine PU [54]. Схема замещения синхронной машины в системе координат d, q, лежащая в основе модели, представлена на рис. 2.5.

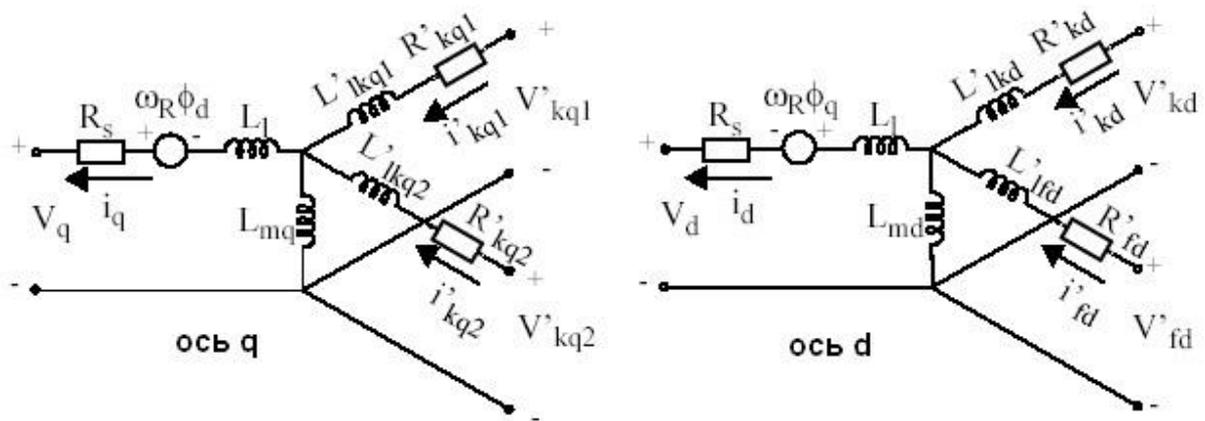


Рис. 2.5. Схема замещения синхронной машины

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору. Используются следующие индексы переменных и параметров:

- d, q: проекции переменных на оси d, q;
- R, s: параметры ротора и статора;
- l, m: индуктивности рассеяния и контура намагничивания;
- f, k: переменные цепи возбуждения и демпферной обмотки.

Данная схема замещения описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$V_d = -i_d R_s - \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt},$$

$$V_q = -i_q R_s + \omega \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt},$$

$$V_0 = -i_0 R_0 + \frac{d\psi_0}{dt},$$

$$V_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd},$$

$$0 = \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} i_{kd},$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq1}}{dt} + R_{kq1} i_{kq1},$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq2}}{dt} + R_{kq2} i_{kq2},$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{kd} \\ \psi_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{md} + L_l & L_{md} & L_{md} \\ L_{md} & L_{lkd} + L_{f1d} + L_{md} & L_{f1d} + L_{md} \\ L_{md} & L_{f1d} + L_{md} & L_{lfd} + L_{f1d} + L_{md} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{kq1} \\ \psi_{kq2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mq} + L_l & L_{mq} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} + L_{kq1} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} & L_{mq} + L_{kq2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{kq1} \\ i_{kq2} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Блок моделирует работу синхронного генератора номинальной мощностью 10 кВА. Номинальное действующее линейное напряжение статора 660 В, частота 50 Гц.

Преобразователь частоты выполнен по схеме со звеном постоянного тока, и состоит из неуправляемого выпрямителя (трехфазная мостовая схема), фильтра звена постоянного тока, трехфазного трехуровневого (NPC) инвертора напряжения, генератора сигналов управления ключами инвертора. Структура преобразователя частоты в среде моделирования представлена на рис. 2.6. Схемы замещения полупроводниковых приборов приведены на рис. 2.3. Предполагаем, что для диодов активное сопротивление R_{on} равно 0,001 Ом, индуктивное сопротивление L_{on} пренебрежимо мало, падение напряжения при протекании прямого тока V_f равно 0,8 В, для транзисторов активное сопротивление R_{on} равно 0,001 Ом, индуктивное сопротивление L_{on} пренебрежимо мало, падение напряжения

при протекании прямого тока V_f равно 1,2 В. Импульсы управления формируются блоком ШИМ генератора в соответствии с заданием на амплитуду и частоту выходного напряжения. Частота ШИМ равна 6 КГц. Мертвое время при формировании сигналов управления транзисторами выбрано равным 3 мкс. Для фильтрации выходного напряжения преобразователя используется LCL-фильтр низких частот с параметрами $L_1=5$ мГн, $L_2=5$ мГн, $C=1,5$ мкФ. Емкость звена постоянного тока 5000 мкФ, индуктивность 0,2 мГн.

Структурная схема преобразователя энергии ветра в среде моделирования представлена на рис.2.7.

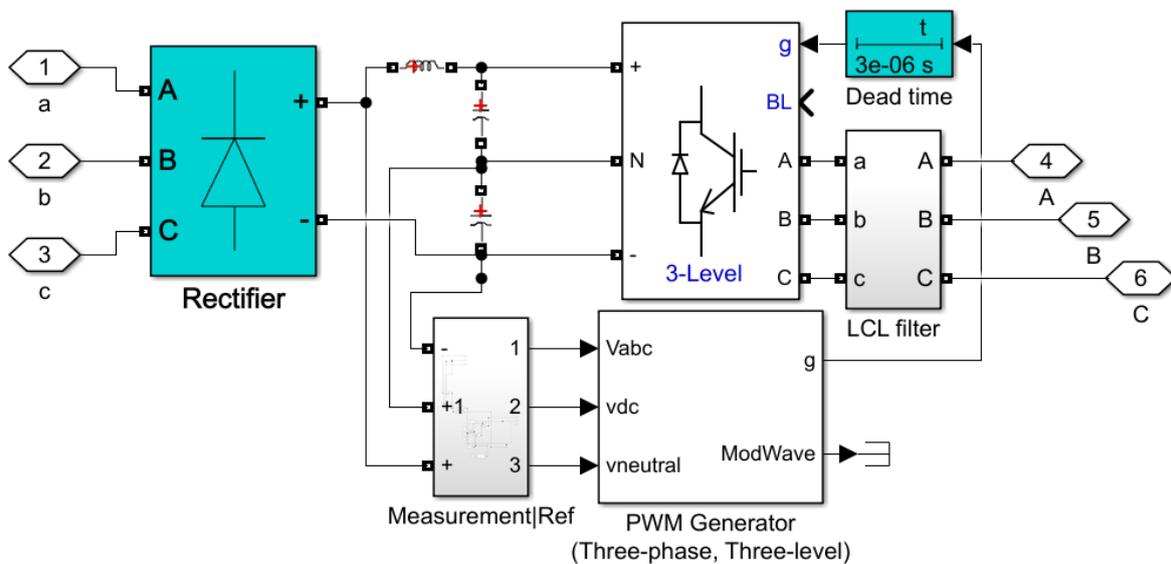


Рис. 2.6. Структура блока преобразователя частоты

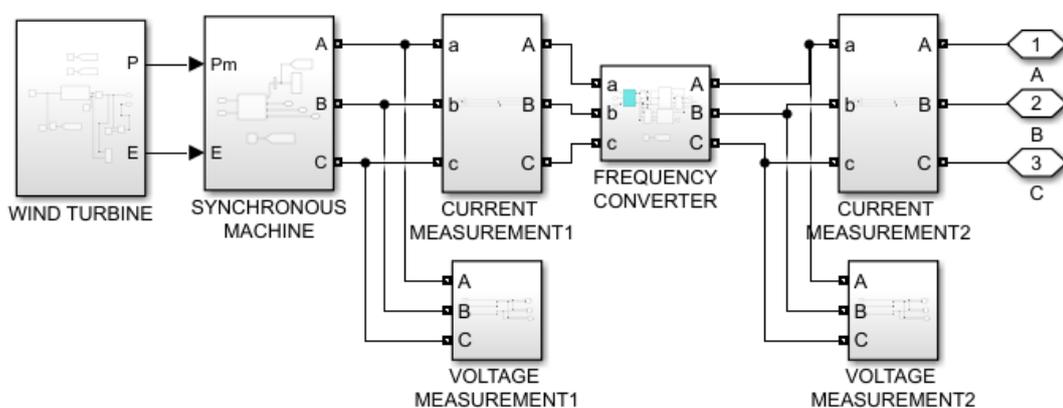


Рис. 2.7. Преобразователь энергии ветра в среде моделирования

2.1.3 Дизель-генераторная установка переменной частоты вращения

В качестве модели дизельного двигателя используется блок Simscapre Generic internal combustion engine [55]. Модель описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\omega_N(\omega) &= \frac{\omega}{\omega_{PP}}, \\ \omega_{NPT}(\omega) &= \frac{\omega}{\omega_{PT}}, \\ T(\omega_N) &= p_1 + p_2 \omega_N + p_3 \omega_N^2, \\ p_1 &= \frac{s_1 P_P}{\omega_{PP}}, \\ p_2 &= \frac{s_2 P_P}{\omega_{PP}}, \\ p_3 &= \frac{s_3 P_P}{\omega_{PP}}, \\ s_1 &= \frac{3-4\omega_{NPT}}{2(1-\omega_{NPT})}, \\ s_2 &= \frac{\omega_{NPT}}{\omega_{NPT}-1}, \\ s_3 &= \frac{1}{2(1-\omega_{NPT})},\end{aligned}\tag{2.4}$$

где ω – мгновенная скорость вращения вала, ω_{PP} – скорость вращения вала при максимальной мощности на валу, ω_{PT} – скорость вращения вала при максимальном крутящем моменте на валу, T – крутящий момент на валу, $s_1, s_2, s_3, p_1, p_2, p_3$ – полиномиальные коэффициенты.

В модели присутствуют регуляторы скорости вращения вала и положения дроссельной заслонки, обеспечивающие максимум мощности на валу двигателя при заданной скорости. Передаточные функции регулятора скорости вращения двигателя и привода дроссельной заслонки представлены выражениями:

$$H_c = \frac{K(1+T_3 p)}{(1+T_1 p+T_2 p^2)},\tag{2.5}$$

$$H_a = \frac{1+T_4p}{p(1+T_5p)(1+T_6p)},$$

где H_c – передаточная функция регулятора скорости, K – коэффициент усиления регулятора скорости, T_1, T_2, T_3 – постоянные времени регулятора скорости, H_a – передаточная функция привода дроссельной заслонки, T_4, T_5, T_6 – постоянные времени привода дроссельной заслонки, p – оператор Лапласа.

Модели синхронного генератора и преобразователя частоты аналогичны используемым в преобразователе энергии ветра, которые были описаны ранее. Структура дизель-генераторной установки в среде моделирования представлена на рис. 2.8.

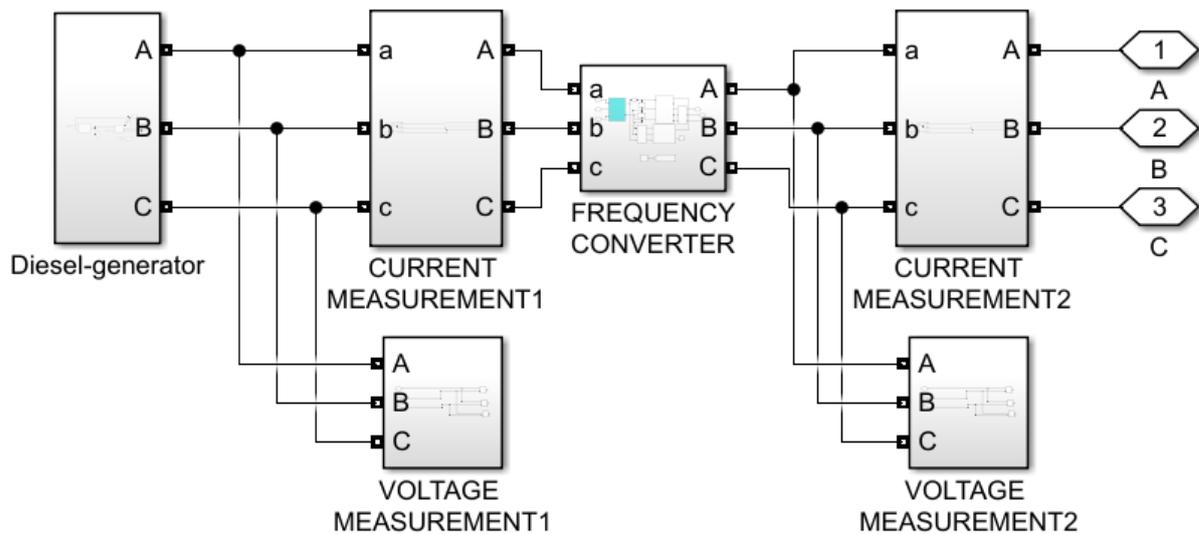


Рис. 2.8. Дизель-генераторная установка в среде моделирования

На рис. 2.9. представлена полная схема имитационной модели с преобразователем солнечной энергии, преобразователем энергии ветра, дизель-генераторной установкой, объединенными шиной переменного тока с действующим линейным значением напряжения 380 В, частотой 50 Гц. К шине переменного тока может быть подключено от одного до трех блоков активно-индуктивной электрической нагрузки с номинальной мощностью 10 кВА каждый (активное сопротивление фазы нагрузки 27 Ом, индуктивное сопротивление фазы нагрузки 41 мГн).

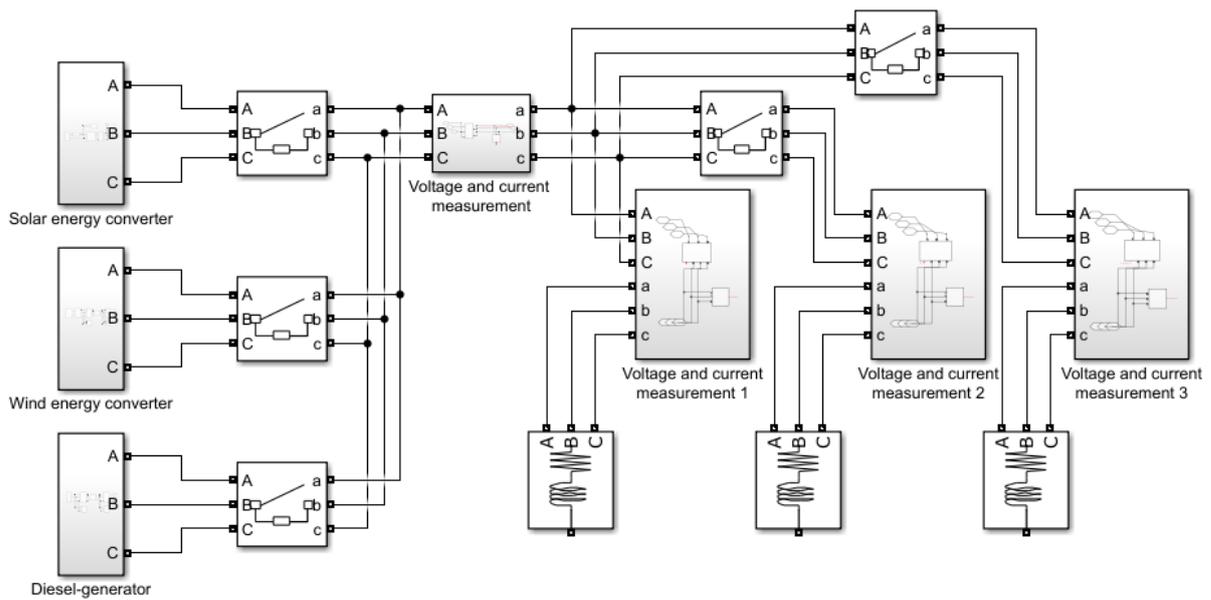


Рис. 2.9. Полная схема имитационной модели

2.2 Результаты имитационного моделирования

При моделировании рассматривалась отдельная работа каналов преобразования энергии в рамках режима нормальной эксплуатации, в котором величины диагностических параметров не превышают установленных пределов с номинальной электрической мощностью нагрузки 10 кВА. Также было проведено моделирование работы системы с превышением границ нормального режима эксплуатации, для чего осуществлялось подключение второго блока нагрузки с номинальной электрической мощностью 10 кВА. Было проведено моделирование отдельной работы каналов преобразования энергии в условиях изменения скорости ветра, интенсивности солнечного излучения, частоты вращения вала дизельного двигателя. Также проводилось моделирование поочередного ввода каналов преобразования энергии в совместную работу в условиях увеличения номинальной электрической мощности нагрузки от 10 кВА до 30 кВА.

2.2.1 Моделирование работы преобразователя солнечной энергии

На рис. 2.10 представлены диаграммы работы преобразователя солнечной энергии с номинальной электрической мощностью нагрузки,

равной 10 кВА, $\cos\varphi$ 0,9. Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, а также мощности нагрузки в относительных единицах. Действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 381 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,7 А.

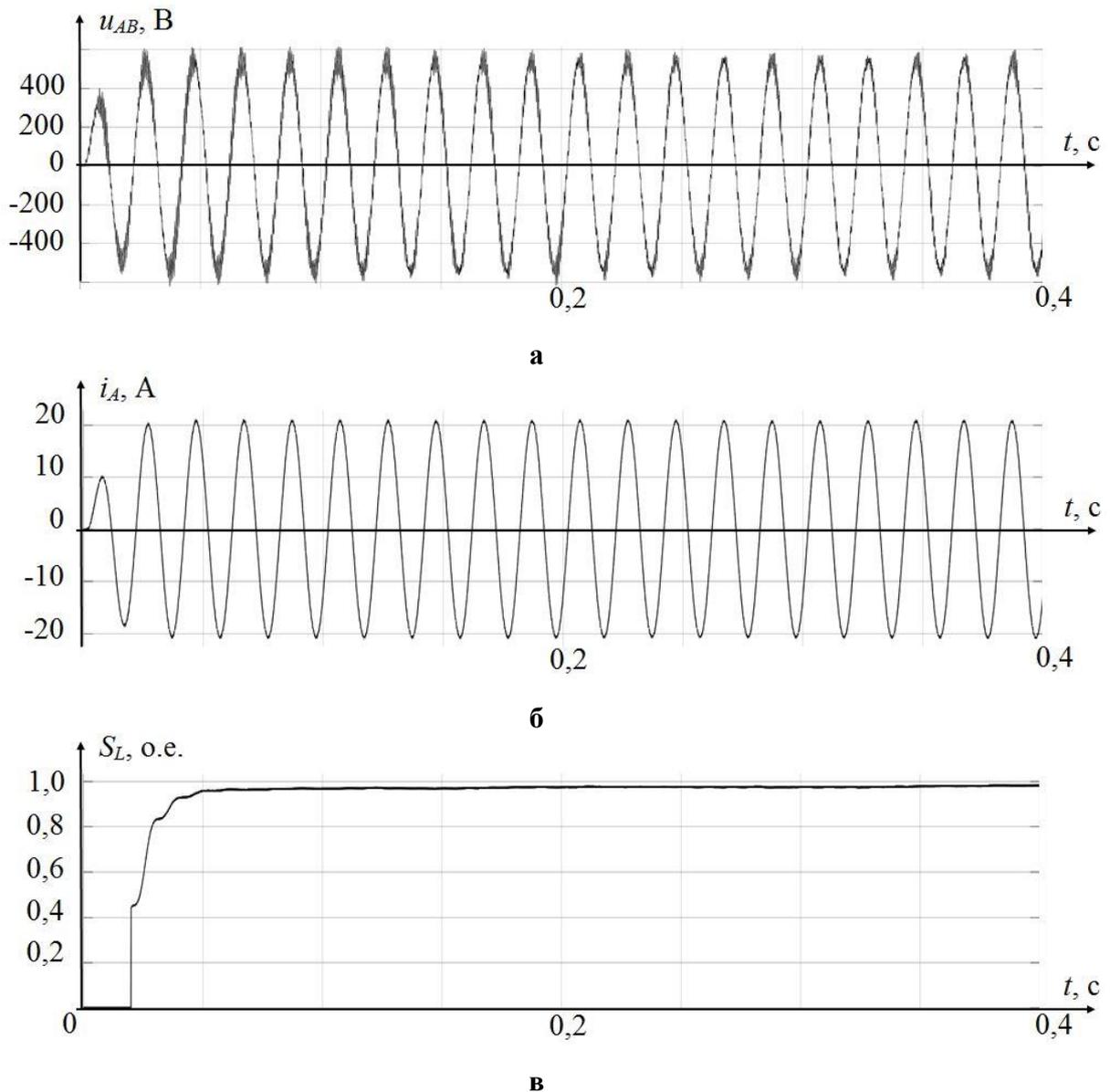


Рис. 2.10. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии с номинальной мощностью нагрузки: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки

На рис. 2.11 представлены диаграммы работы преобразователя солнечной энергии при превышении пределов нормальной эксплуатации.

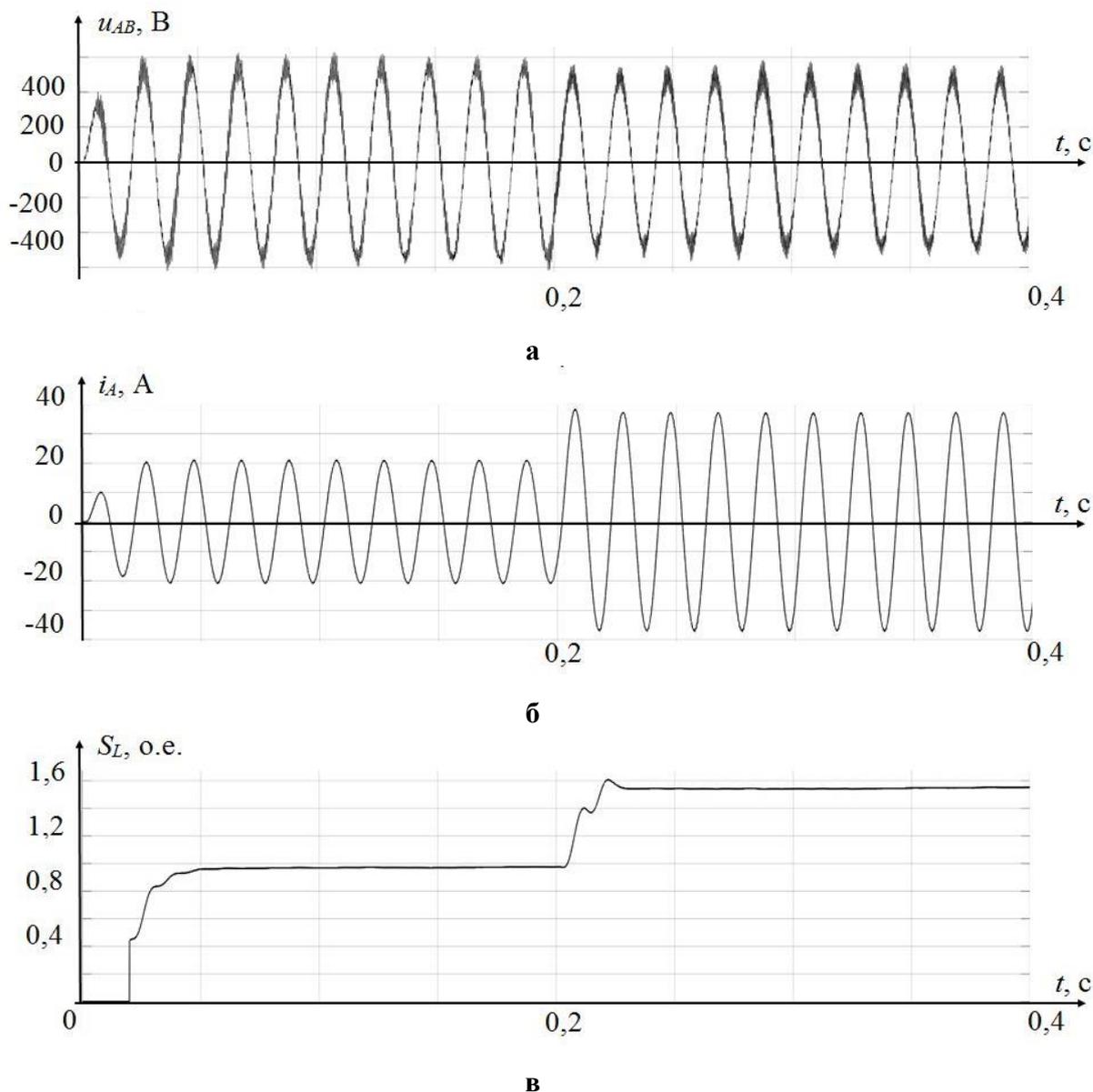


Рис. 2.11. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии с превышением номинальной мощности нагрузки: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки

Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, а также мощности, выделяемой на нагрузке в относительных единицах. После подключения второго блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 339 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 26,2 А.

На рис. 2.12 представлены диаграммы работы преобразователя

солнечной энергии при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности в момент времени 0,2 с.

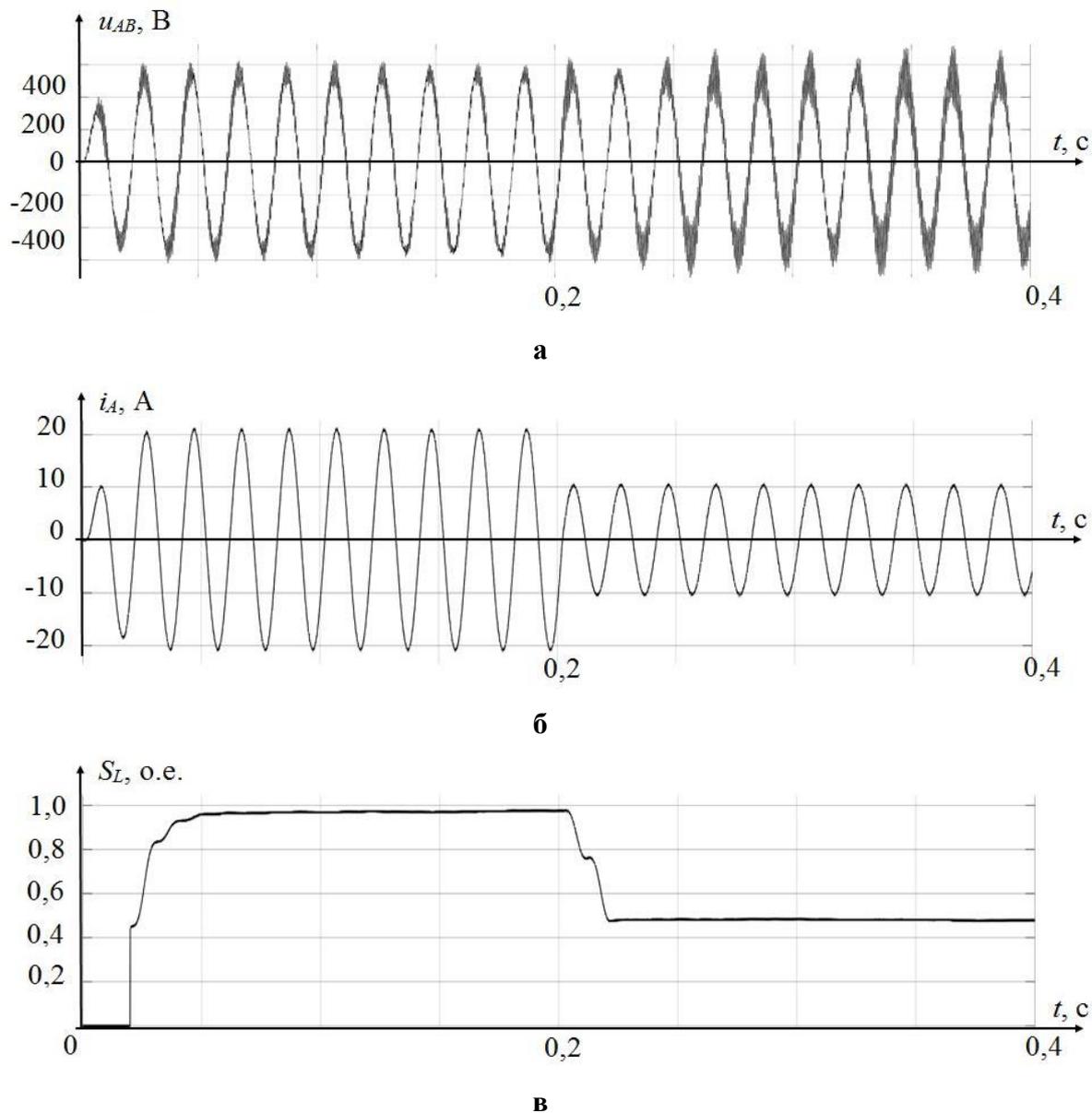


Рис. 2.12. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки

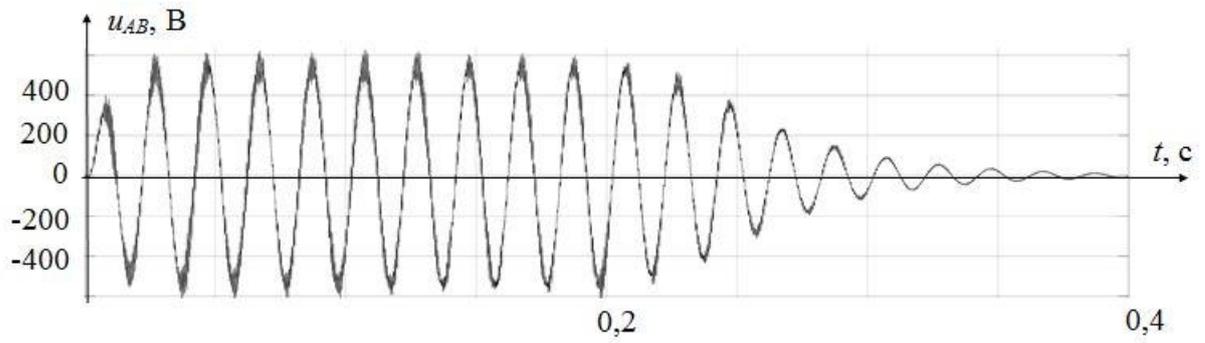
На рис. 2.13 представлены диаграммы работы преобразователя солнечной энергии с номинальной электрической мощностью нагрузки при изменении мощности солнечного излучения с 500 Вт/м^2 до нуля в момент времени 0,2 с.

2.2.2 Моделирование работы преобразователя энергии ветра

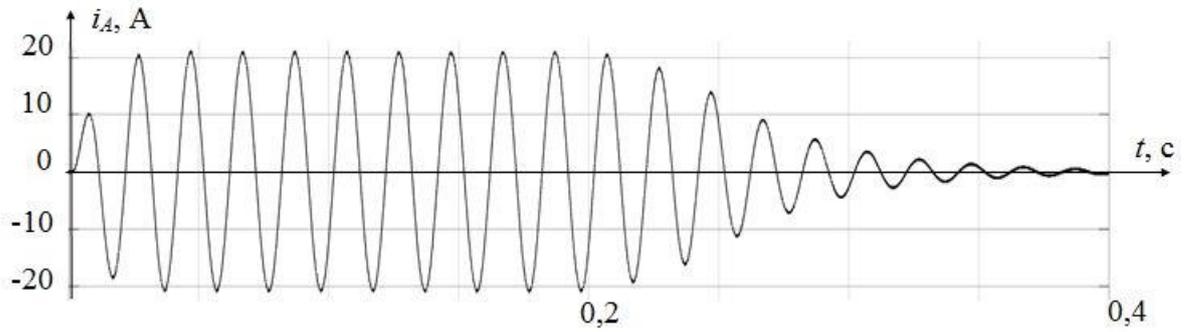
На рис. 2.14 представлены диаграммы работы преобразователя энергии ветра с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА, $\cos\varphi$ 0,9. Для большей наглядности графиков при малом времени моделирования механические постоянные времени модели были уменьшены. Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, мощности нагрузки в относительных единицах. Действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 378 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,5 А.

На рис. 2.15 представлены диаграммы работы преобразователя энергии ветра при превышении пределов нормальной эксплуатации. Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, а также мощности, выделяемой на нагрузке в относительных единицах. После подключения второго блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 332 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 25,7 А.

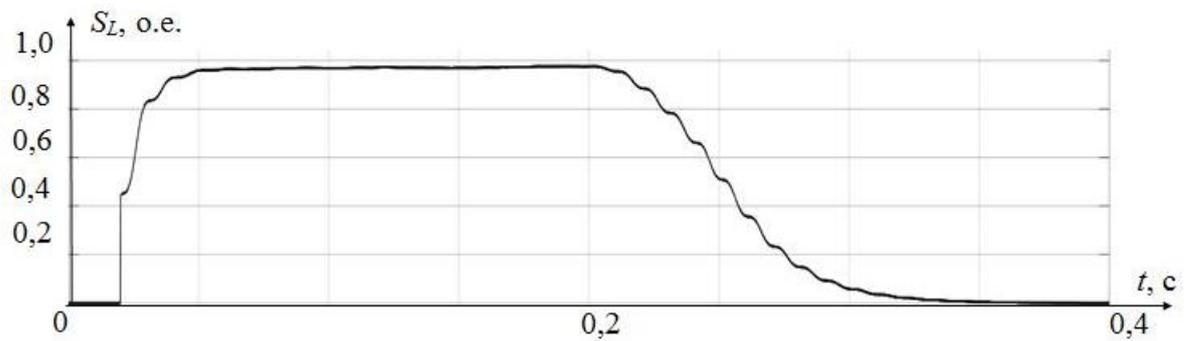
На рис. 2.16 представлены диаграммы работы преобразователя энергии ветра при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности в момент времени 0,2 с.



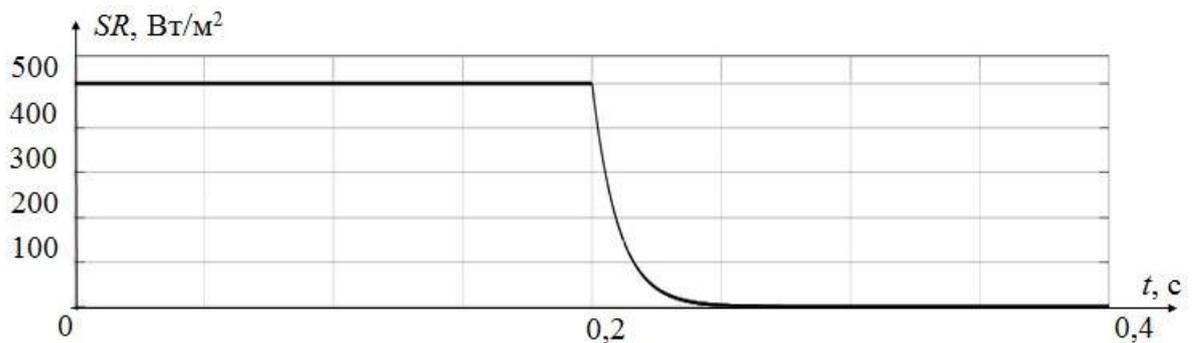
а



б

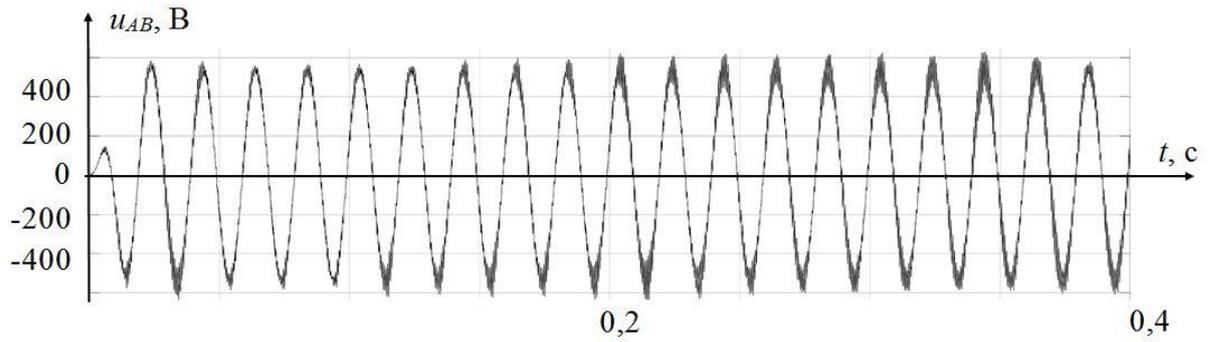


в

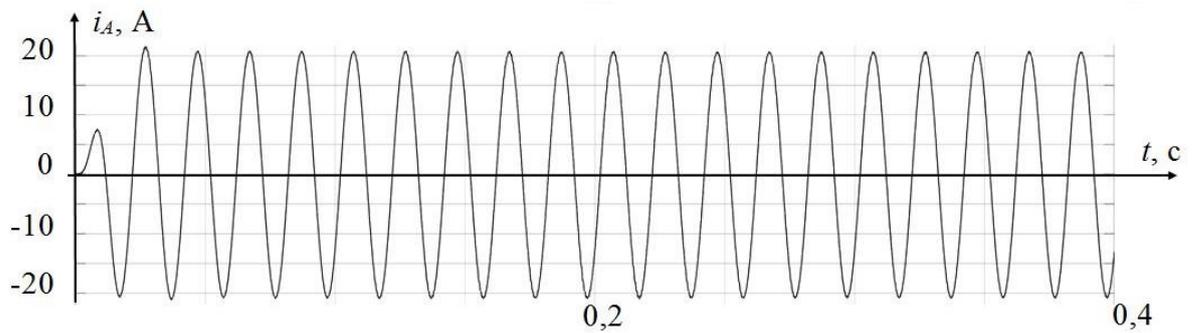


г

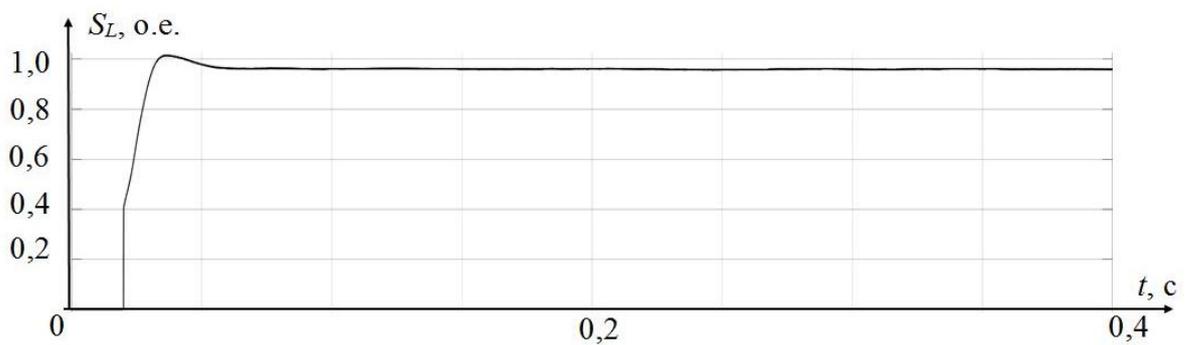
Рис. 2.13. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии с номинальной мощностью нагрузки и уменьшении мощности солнечного излучения: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки; в – мощность солнечного излучения



а



б



в

Рис. 2.14. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя энергии ветра с номинальной мощностью нагрузки: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в - полная мощность нагрузки

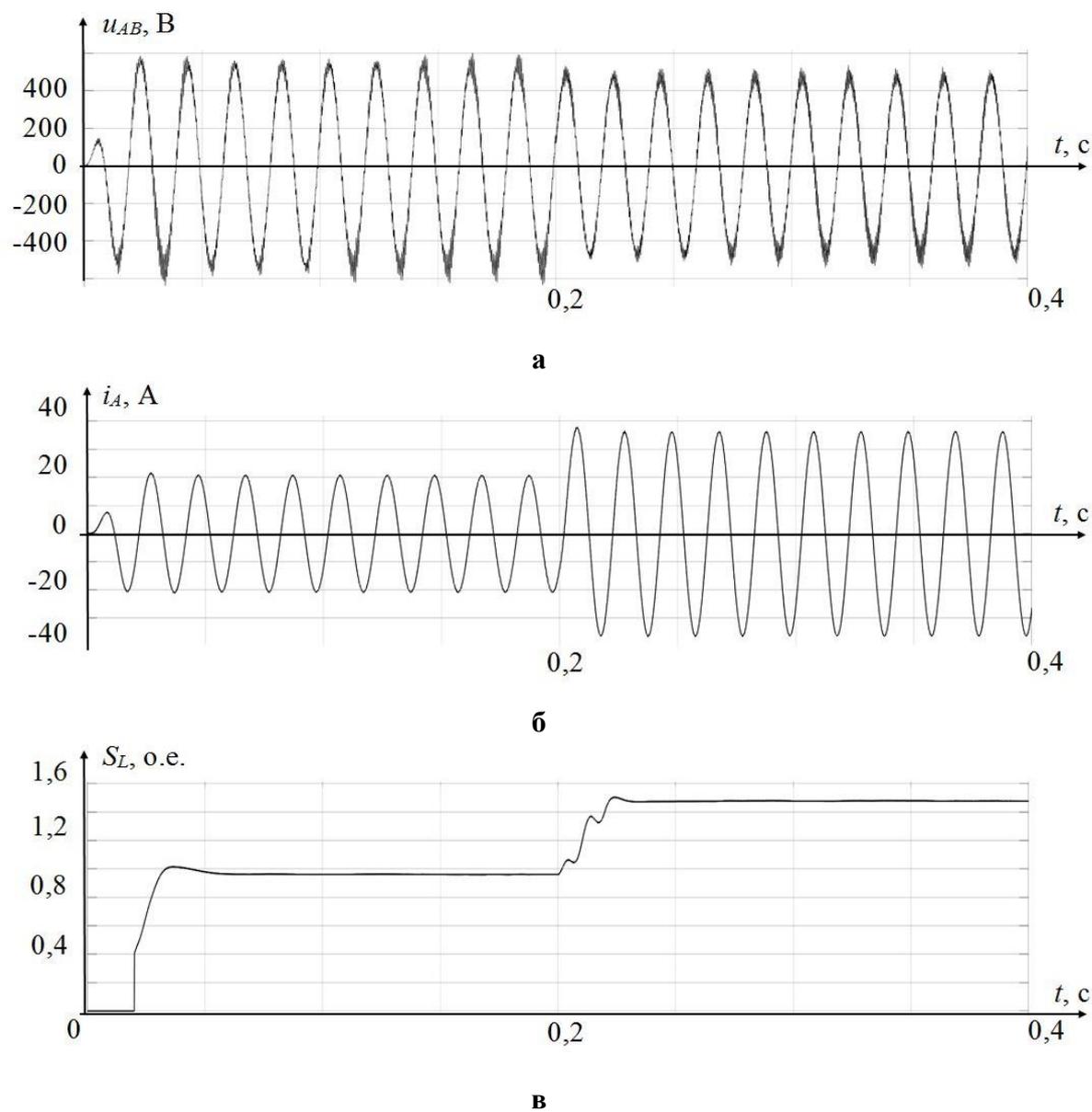


Рис. 2.15. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя энергии ветра с превышением номинальной мощности нагрузки: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки

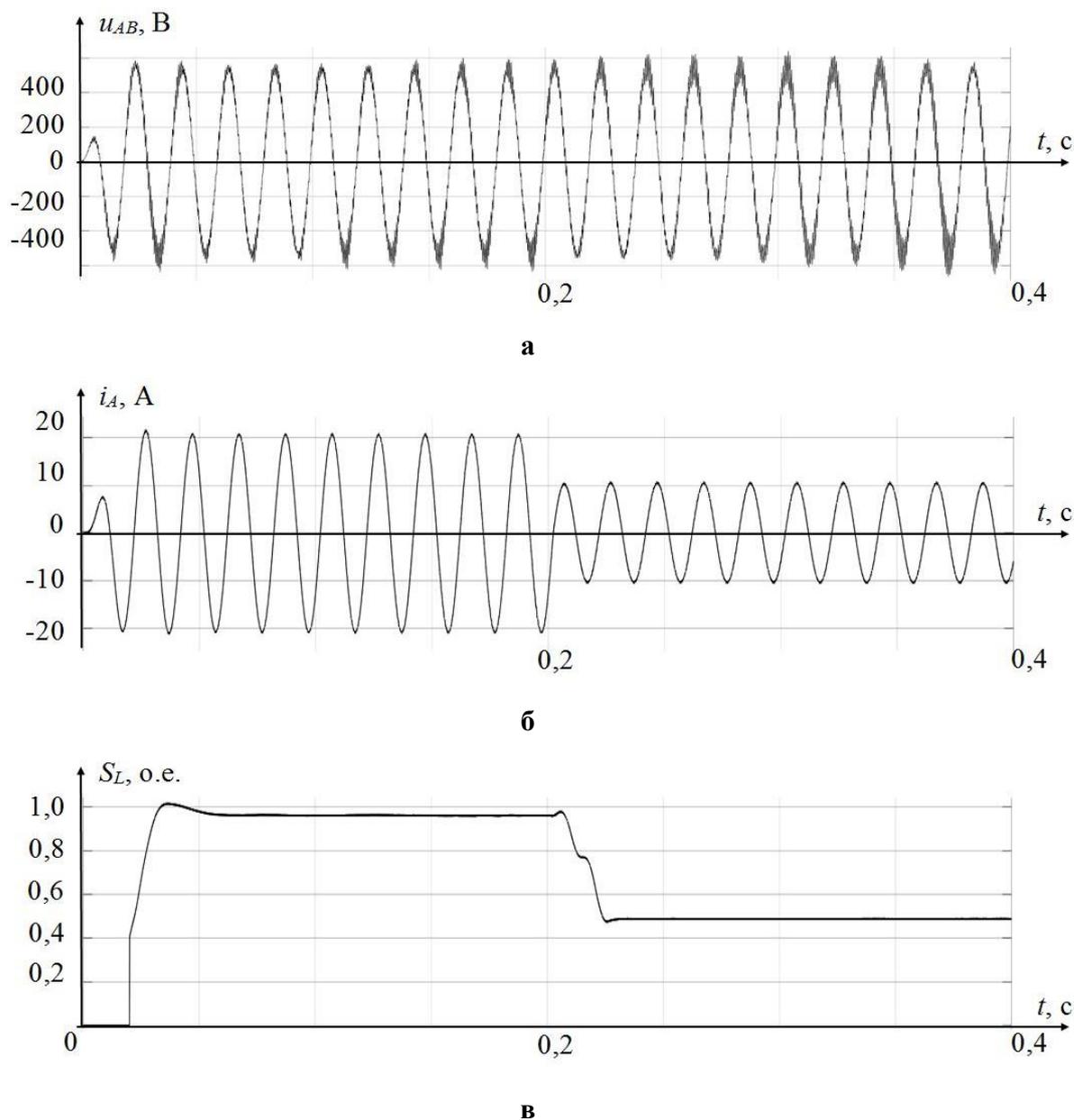
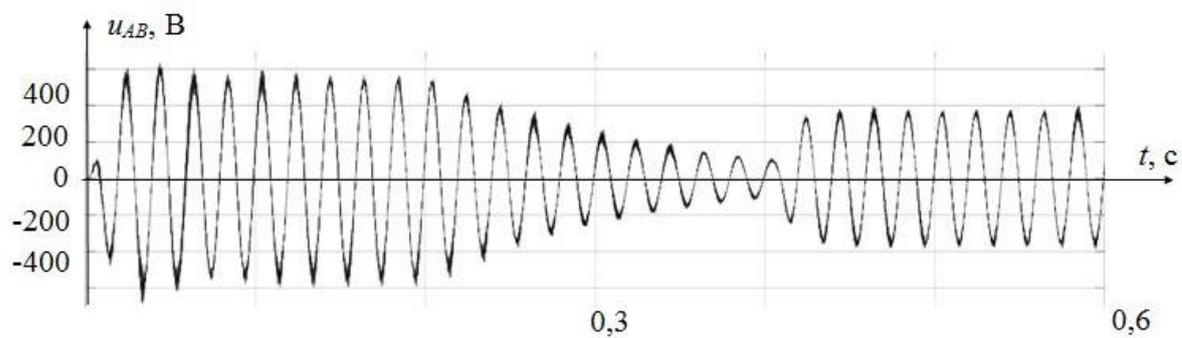


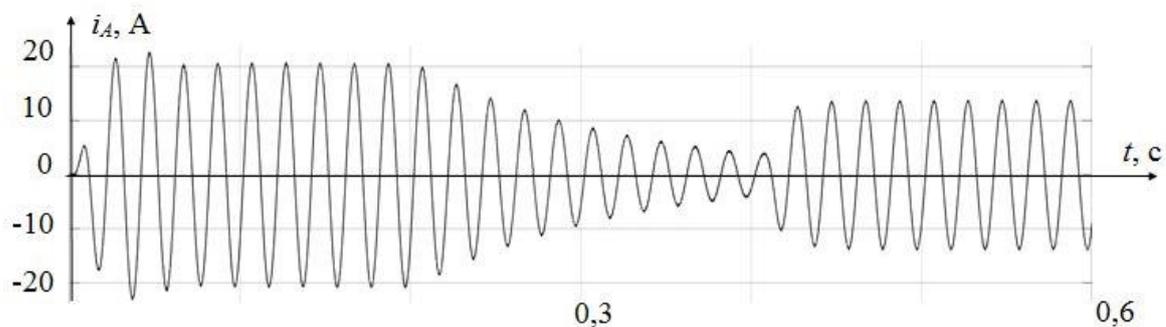
Рис. 2.16. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя энергии ветра при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки

На рис. 2.17 представлены диаграммы работы преобразователя энергии ветра с номинальной мощностью электрической нагрузки 10 кВА при уменьшении скорости ветра с 12 м/с до 3 м/с в момент времени 0,2 с и увеличении скорости ветра с 3 м/с до 9 м/с в момент времени 0,4 с. Для большей наглядности графиков при малом времени моделирования

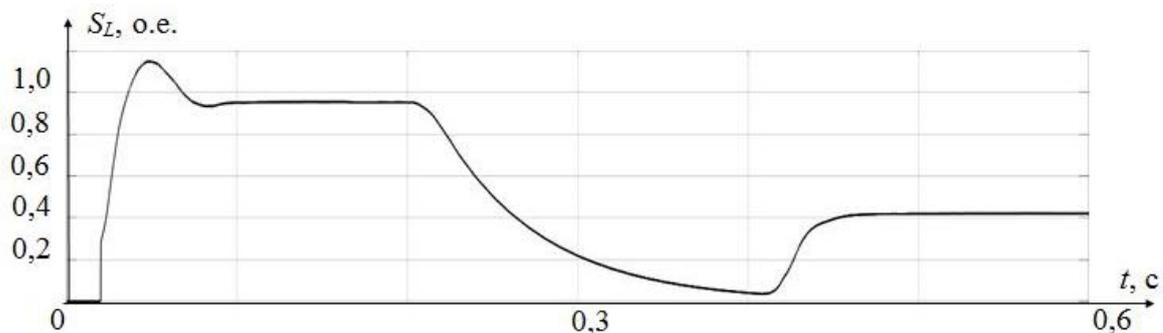
емкость звена постоянного тока ПЧ была уменьшена до 500 мкФ.



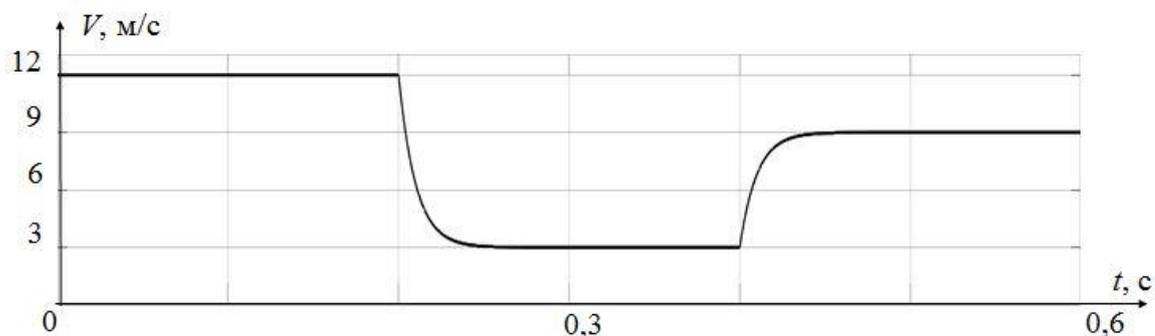
а



б



в



г

Рис. 2.17. Диаграммы нагрузки при работе преобразователя энергии ветра с номинальной мощностью нагрузки при изменении скорости ветра: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в - полная мощность нагрузки; г - скорость ветра

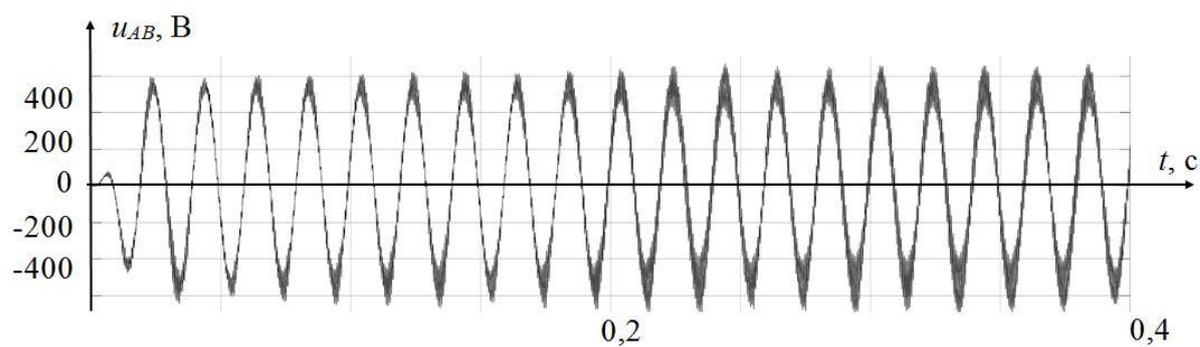
2.2.3 Моделирование работы дизель-генераторной установки

На рис. 2.18 представлены диаграммы работы дизель-генераторной установки с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА, $\cos\varphi$ 0,9. Для большей наглядности графиков при малом времени моделирования механические постоянные времени модели были уменьшены. Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, мощности нагрузки в относительных единицах. Действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 380 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,7 А.

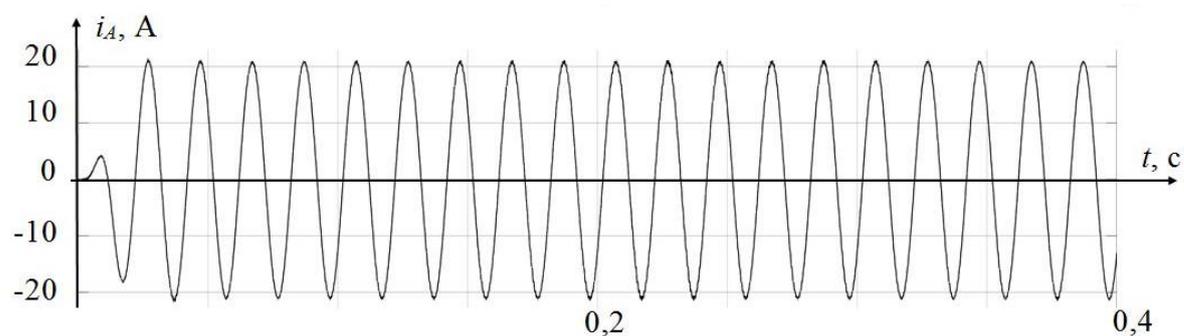
На рис. 2.19 представлены диаграммы работы дизель-генераторной установки при превышении пределов нормальной эксплуатации. Приводятся диаграммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А, а также мощности, выделяемой на нагрузке в относительных единицах. После подключения второго блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды действующее значение первой гармоники линейного напряжения равно 334 В, частота 50 Гц. Действующее значение первой гармоники тока равно 25,8 А.

На рис. 2.20 представлены диаграммы работы дизель-генераторной установки при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности в момент времени 0,2 с.

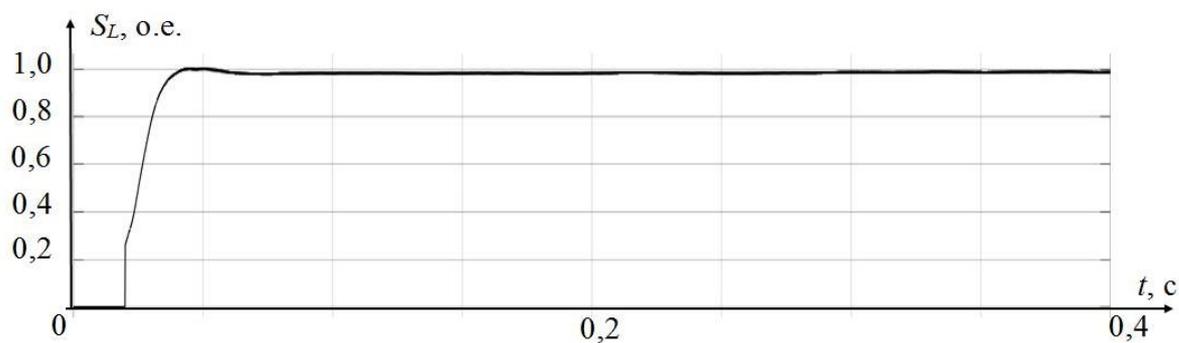
На рис. 2.21 представлены диаграммы работы дизель-генераторной установки с номинальной мощностью электрической нагрузки 10 кВА при уменьшении скорости вращения вала дизельного двигателя до величины 0,5 от номинальной в момент времени 0,2 с, и последующем увеличении скорости вращения вала до номинальной величины в момент времени 0,4 с. Для большей наглядности графиков при малом времени моделирования емкость звена постоянного тока ПЧ была уменьшена до 500 мкФ.



а

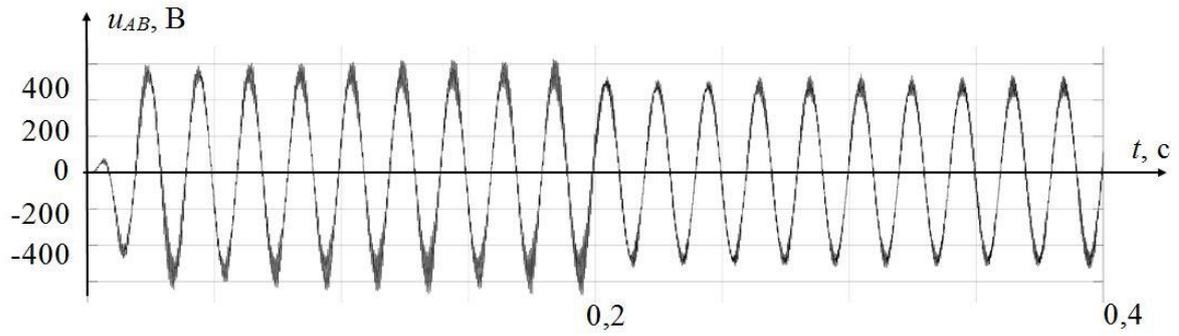


б

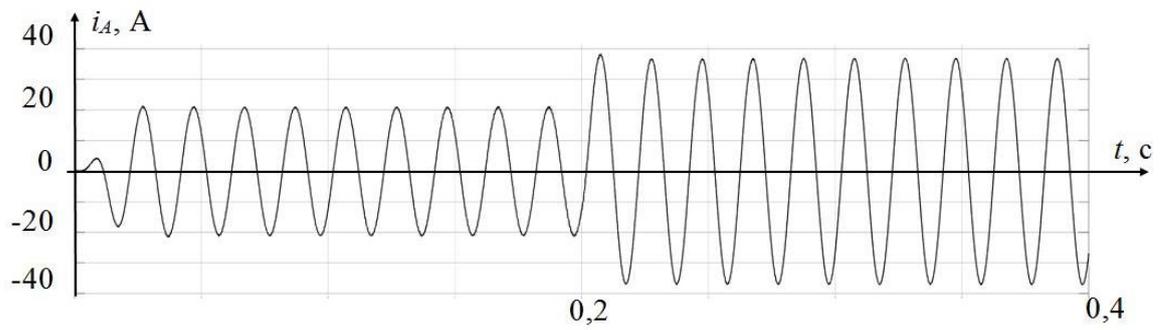


в

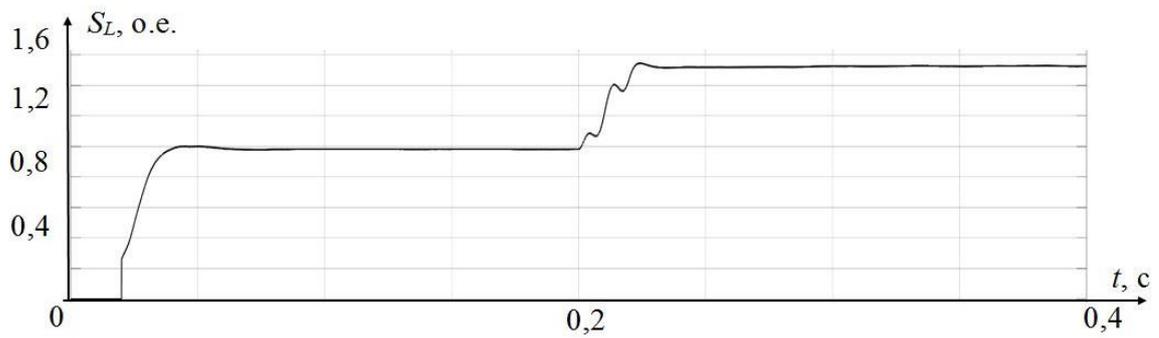
Рис. 2.18. Диаграммы нагрузки при работе дизель-генераторной установки с номинальной мощностью нагрузки: **а** - линейное напряжение нагрузки; **б** - ток фазы нагрузки; **в** - полная мощность нагрузки



а

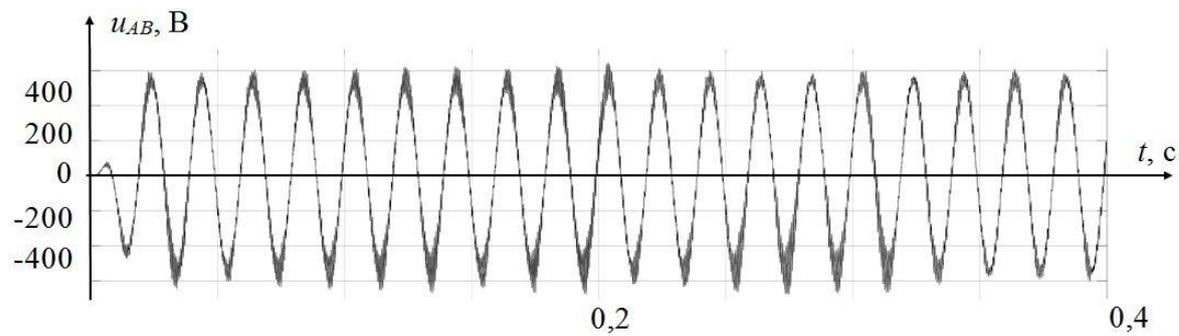


б

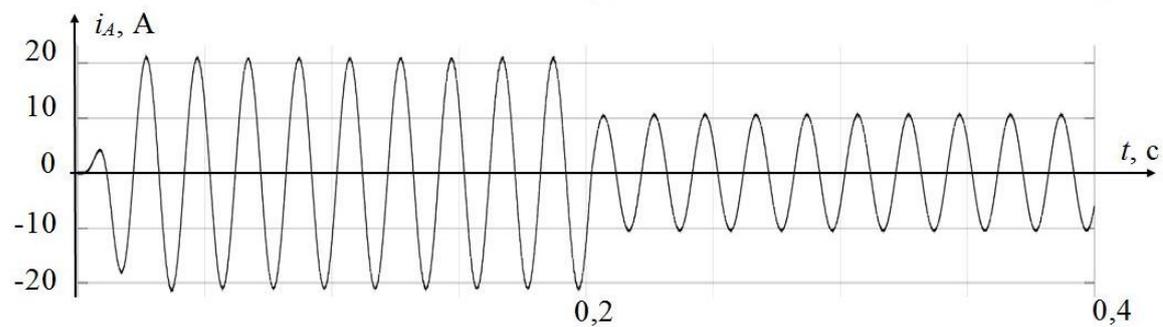


в

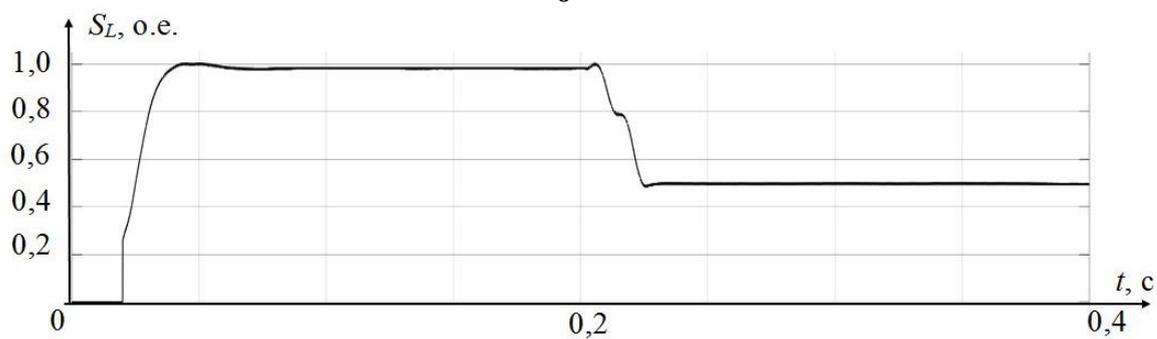
Рис. 2.19. Диаграммы нагрузки при работе дизель-генераторной установки с превышением номинальной мощности нагрузки: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в - полная мощность нагрузки



а

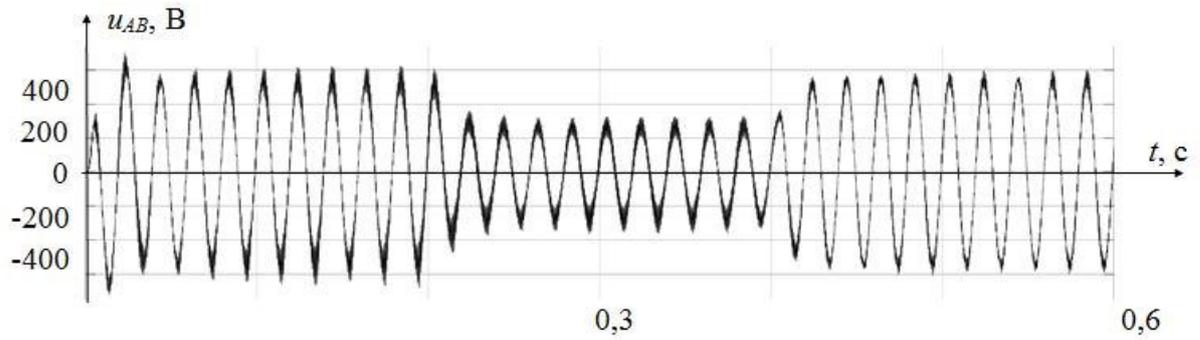


б

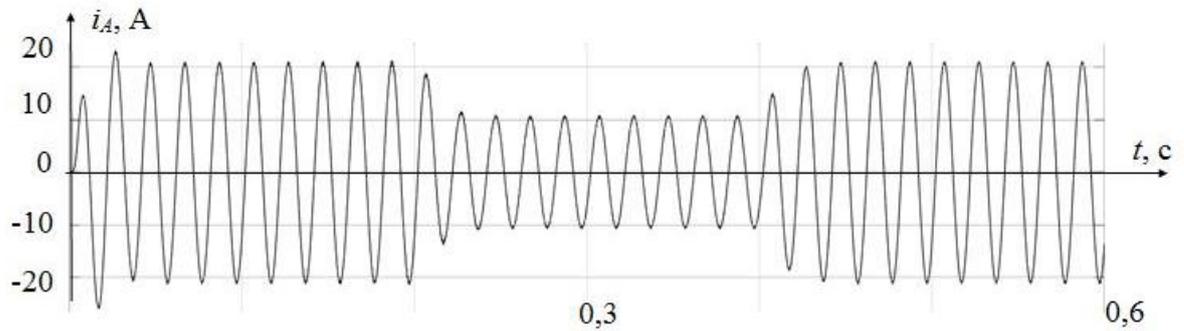


в

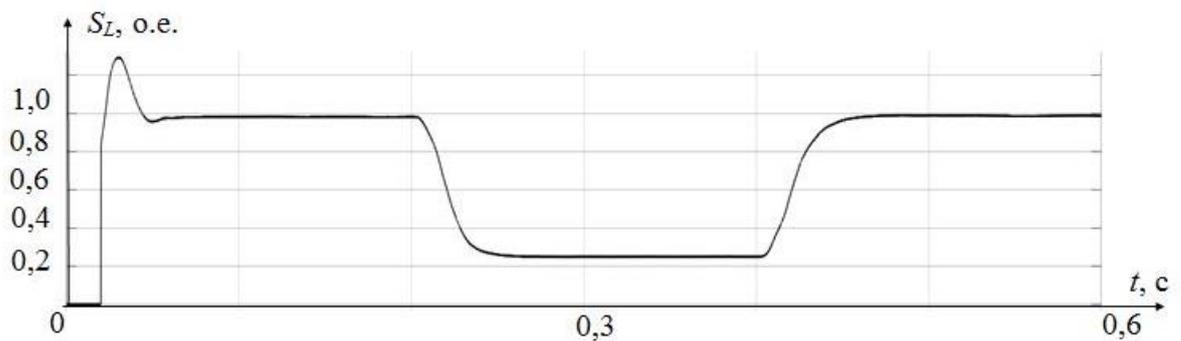
Рис. 2.20. Диаграммы нагрузки при работе дизель-генераторной установки при разгрузке со 100% до 50% номинальной мощности: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки



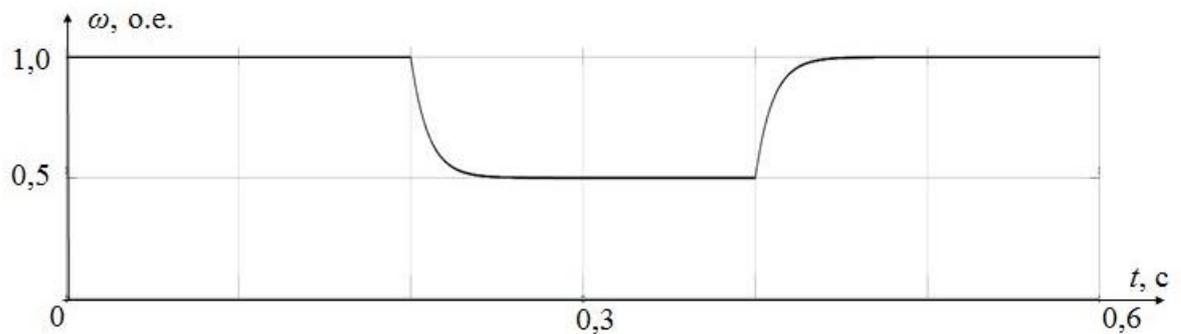
а



б



в

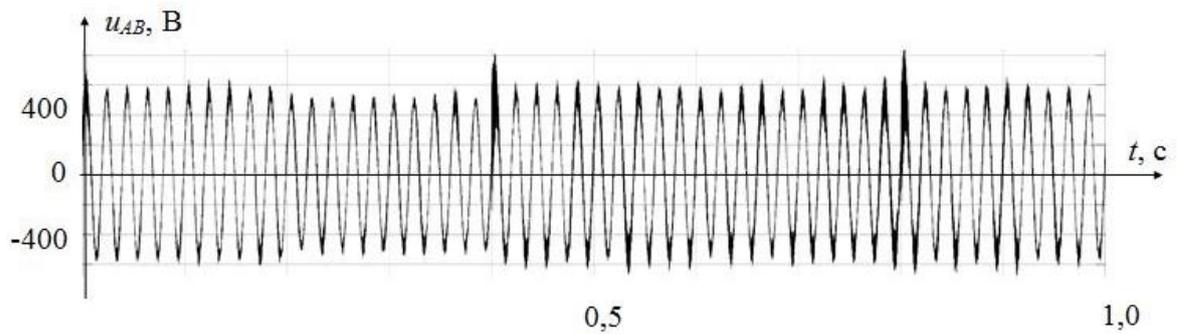


г

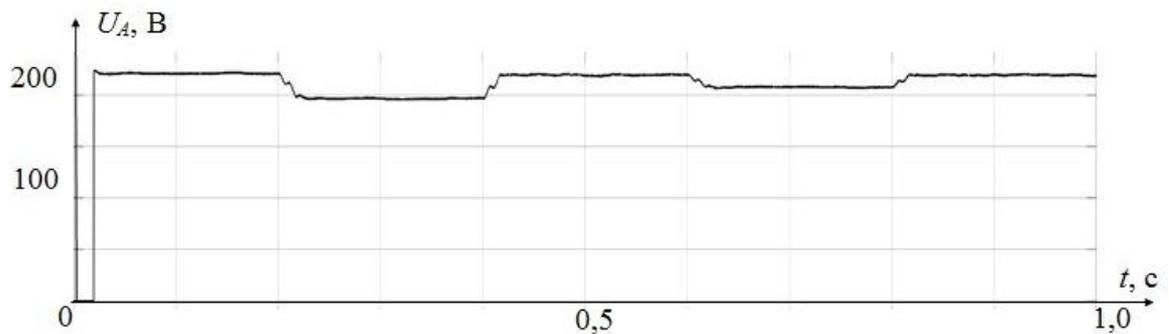
Рис. 2.21. Диаграммы нагрузки при работе дизель-генераторной установки с номинальной мощностью нагрузки и изменением скорости вращения вала двигателя: а - линейное напряжение нагрузки; б - ток фазы нагрузки; в – полная мощность нагрузки; г – скорость вращения вала двигателя

2.2.4 Моделирование совместной работы каналов преобразования энергии

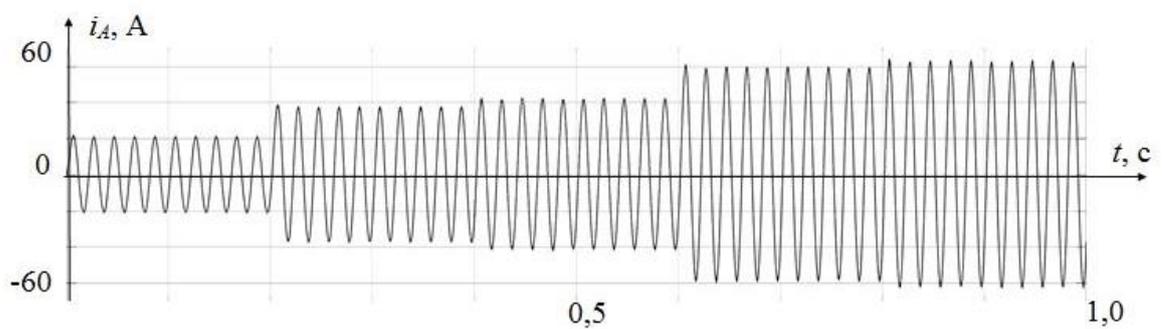
На рис. 2.22 приводятся диаграммы работы модели при совместной работе преобразователей энергии. Первоначально питание нагрузки с номинальной электрической мощностью 10 кВА осуществляется только от преобразователя солнечной энергии. В момент времени 0,2 с осуществляется подключение второго блока нагрузки с номинальной электрической мощностью 10 кВА, при этом действующее значение линейного напряжения нагрузки уменьшается до 338 В. Для восстановления величины напряжения в момент времени 0,4 с в работу вводится преобразователь энергии ветра. В момент времени 0,6 с осуществляется подключение третьего блока нагрузки с номинальной электрической мощностью 10 кВА, что вызывает уменьшение действующего значения линейного напряжения нагрузки до 358 В. В момент времени 0,8 с в работу вводится дизель-генераторная установка, благодаря чему величина напряжения нагрузки восстанавливается до номинальной.



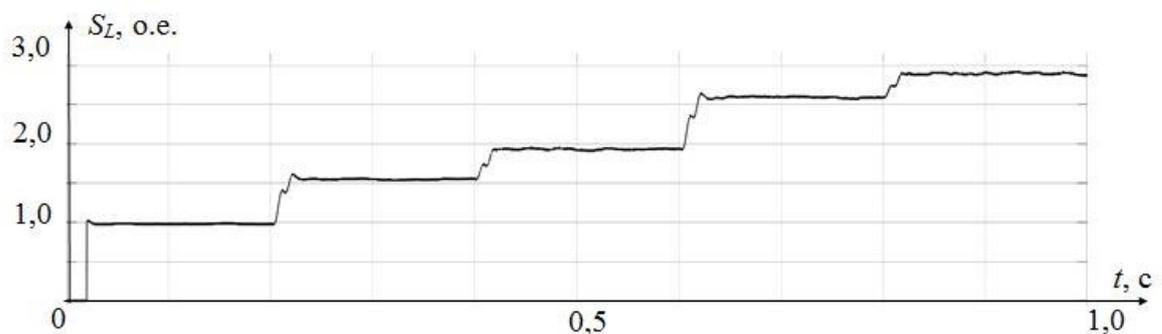
а



б



в



г

Рис. 2.22. Диаграммы нагрузки при одновременной работе преобразователей энергии: а - линейное напряжение нагрузки; б – действующее значение напряжения фазы нагрузки; в - ток фазы нагрузки; г – полная мощность нагрузки

Выводы по второй главе:

1. Разработана имитационная модель электростанции с совмещенной ветро-солнечно-дизельной генерацией и объединением каналов преобразования энергии шиной переменного тока, служащая источником данных для разработки и тестирования систем мониторинга. Предлагаемая модель позволяет учитывать влияние физических величин, являющихся основными диагностическими признаками электротехнического оборудования, позволяет воспроизводить одновременную работу каналов преобразования энергии на общую нагрузку, а также дает возможность варьировать конфигурацию нагрузки для моделирования работы электростанции при питании потребителей с различающимися категориями надежности электроснабжения.

2. Проведено моделирование установившегося режима работы электростанции, а также моделирование ступенчатого увеличения электрической мощности нагрузки до величины 150% от номинальной. При работе имитационной модели в номинальном режиме действующее значение линейного напряжения нагрузки составило 378-381 В, частота 50 Гц. При работе имитационной модели с увеличением величины нагрузки до 150% от номинальной действующее значение линейного напряжения нагрузки составило 332 В. Было проведено моделирование работы станции при изменении мощности солнечного излучения, скорости ветра, частоты вращения вала дизельного двигателя. Также было проведено моделирование одновременной работы трех каналов преобразования энергии на общую нагрузку. Разработанная имитационная модель демонстрирует корректную работу и может использоваться при разработке и испытании алгоритмов автоматизированной системы управления и систем мониторинга технического состояния, а также при разработке физической модели электростанции.

ГЛАВА 3. Оценка технического состояния оборудования

Единство терминологии является важным аспектом исследования, поэтому в начале данной главы является целесообразным привести определения основных используемых понятий.

Техническое диагностирование объекта представляет собой процесс определения его технического состояния, которое является совокупностью свойств объекта, подверженных изменению при производстве или эксплуатации и характеризующихся в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на данный объект [56].

В результате диагностирования выносится заключение о техническом состоянии объекта (при необходимости с указанием места возникновения дефекта, его вида и возможных причин), а также определяется исправность и работоспособность отдельных элементов или всего объекта в целом.

Исправность — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией [57]. Если хотя бы одно из требований нормативно-технической документации на объект не выполняется, то объект считается неисправным.

Работоспособное состояние — состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции. Работоспособное состояние может быть определено, например, как состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям, установленным в документации на этот объект [58]. Следует отметить, что неисправный объект может быть работоспособным.

Неисправность и неработоспособность могут быть вызваны появлением каких-либо дефектов в объекте. Поиск дефекта осуществляется с

помощью различных средств технического диагностирования путем проведения того или иного рода экспериментов над объектом. Некоторый минимальный (не подлежащий расчленению в данных конкретных условиях) эксперимент над объектом диагностирования, характеризующийся определенным рабочим или тестовым воздействием, поступающим или подаваемым на объект, а также составом признаков (параметров), образующих ответ объекта на соответствующее воздействие, представляет собой элементарную проверку. Конкретные значения признаков (параметров), получаемые при диагностировании, являются результатами элементарных проверок или значениями ответных реакций объекта. Совокупность элементарных проверок, последовательность (или последовательности) их реализации и правила анализа результатов реализуемых элементарных проверок представляют собой алгоритм диагностирования [59].

3.1 Алгоритмы диагностирования комбинированной электростанции

Диагностирование электротехнического устройства включает изучение объекта диагностирования, построение диагностической модели, а также построение алгоритмов диагностирования. Для этого необходимо произвести выделение элементов устройства и связей между ними, анализ возможных их технических состояний, определение параметров, характеризующих техническое состояние устройства, пределов и технической возможности их контроля, определить степень детализации возможных мест, видов и причин возникновения дефектов [59].

Стремление к теоретическому обобщению процесса диагностирования электротехнических устройств в условиях ограниченности информации об их техническом состоянии способствует широкому использованию формального описания (в аналитической, векторной, табличной, или

других формах), то есть различных моделей диагностирования. Модели объектов диагностирования строятся на основании принципиальных, структурных, функциональных или логических схем исправных объектов. Принципиальные электрические схемы являются основными и наиболее полно отражающими принцип работы объекта и взаимосвязь его составных элементов. Однако построение математических моделей объектов по их принципиальной схеме часто оказывается весьма громоздким из-за большого числа элементов схемы и сложности их функциональных взаимосвязей между собой. В этом случае определение текущих значений диагностических признаков и технических состояний всех элементов может потребовать проведения такого количества измерений и вычислений, которое не позволит производить диагностирование объекта в реальном времени. Дополнительно, многие элементы объекта, в том числе, обладающие сравнительно высокой надежностью, могут не представлять интереса для диагностирования (резисторы, дроссели). Поэтому объект диагностирования целесообразно представлять в виде структурных или функциональных схем. При этом могут быть выделены не только основные функциональные элементы объекта и взаимосвязи между ними, но и отображены конструктивные особенности объекта, позволяющие решать вопросы практической реализации его диагностирования.

Один и тот же объект диагностирования может быть представлен различными (сложными или более простыми) функциональными связями. При этом учитываются такие аспекты, как глубина поиска дефекта, характеризующая степень детализации места, причин и вида дефекта, удобство и возможность измерения величин диагностических признаков, конструктивные соображения и т. п. Функциональная модель объекта диагностирования относится к наиболее распространенным моделям, охватывающим большое количество реальных объектов. При построении

этой модели объект диагностирования подразделяют на некоторое число взаимосвязанных элементов, которые могут находиться по крайней мере в двух различных технических состояниях - исправном и неисправном - и реагировать в исправном состоянии на воздействия со стороны других элементов.

Зачастую нет необходимости строго следить за выполнением функциональных зависимостей между входными и выходными сигналами объекта, достаточно лишь сделать заключение о техническом состоянии объекта, основываясь на результатах оценки его диагностических признаков, в данном случае целесообразным является использование логической модели диагностирования.

Для получения логической модели объекта каждый его функциональный элемент заменяется логическим блоком, имеющим существенные для данного элемента входы и выходы. При этом если значение входного или выходного сигнала находится в пределах нормы, установленной для данного объекта диагностирования, данный сигнал обозначается единицей, в противном случае – нулем. Построение логической модели производится непосредственно по функциональной или принципиальной схемам объекта диагностирования, или по схемам и таблицам взаимосвязей диагностических признаков объекта. В частном случае, когда функциональные элементы представлены элементами с одним выходным сигналом, логическая модель может совпадать с функциональной моделью объекта диагностирования. При представлении объекта диагностирования в виде логической модели могут возникнуть практические сложности, связанные с тем, что точные функциональные зависимости между сигналами объекта могут быть неизвестны или весьма сложны. В данном случае строгие формальные связи между элементами можно заменить причинно-следственными связями, отражающими факты взаимодействия элементов в той или иной форме. При этом модель

объекта диагностирования удобно представить в виде графа, вершинами которого являются элементы объекта, а дугами - причинно-следственные связи между соответствующими элементами. Направление дуги соответствует перемещению от причины к следствию. Также следует отметить, что при разбиении объекта диагностирования на N функциональных (или логических) элементов и двух их возможных состояниях (исправен, неисправен), общее число возможных состояний объекта составляет 2^N . Определение и учет такого большого количества состояний весьма затруднительно даже для сравнительно простых объектов диагностирования. Поэтому на практике зачастую предполагают, что в объекте диагностирования возможен дефект лишь одного функционального элемента. При данном допущении число возможных состояний объекта диагностирования значительно сокращается и становится равным N .

Для удобства и наглядности разработки алгоритмов диагностирования полезно использование таблиц функций неисправностей. Таблица отображает взаимосвязь неисправности одного из элементов объекта диагностирования и комбинации значений диагностических признаков, соответствующей данному дефекту. Таким образом, в столбцах таблицы функций неисправностей отображается множество всех возможных состояний объекта диагностирования, а в строках - множество элементарных проверок, позволяющих выявить дефект соответствующего элемента.

Алгоритм диагностирования представляет собой последовательность элементарных проверок, обеспечивающих поиск дефекта с заданной глубиной. Известно большое число различных методов реализации элементарных проверок, обеспечивающих требуемую глубину диагностирования непрерывных комбинационных объектов: методы последовательного функционального анализа, половинного разбиения,

время-вероятностные, с использованием информационных критериев и т. д. [59-63]. В рамках данной работы был применен метод половинного разбиения. Данный метод предлагает начинать диагностирование с такой проверки, которая позволила бы получить максимум информации и при положительном и при отрицательном результате оценки состояния первого выбранного элемента. То есть данная проверка разделяет логическую модель диагностирования на приблизительно равные по количеству элементов части. Каждая последующая проверка выбирается таким же образом, т. е. делит пополам остающиеся логические взаимосвязи после выполнения предыдущей проверки в зависимости от результатов ее исхода.

3.1.1 Разработка алгоритмов диагностирования

Для построения алгоритмов диагностирования комбинированной электростанции путем опроса экспертов по эксплуатации и ремонту электротехнического оборудования были составлены перечни диагностических признаков для устройств, входящих в состав генерирующего комплекса. Для синхронного генератора выбраны диагностические признаки: действующие значения линейных напряжений статора, действующие значения токов фаз статора, температура обмотки статора, температура подшипников, частота вращения вала, величина скорости вибрации корпуса. Для измерения величин данных признаков конструкция генератора должна включать в себя датчики температуры в обмотке статора и подшипниках [64], датчик скорости вибрации в корпусе генератора, датчик скорости вращения вала, к фазам статора генератора должны быть подключены датчики напряжения и тока.

Диагностические признаки фотоэлектрических преобразователей: ток фотоэлектрических преобразователей, напряжение фотоэлектрических преобразователей, температура фотоэлектрических преобразователей. Для измерения величин данных признаков в электрическую цепь

фотоэлектрических преобразователей должны быть включены датчик тока и датчик напряжения, в корпус должен быть встроен датчик температуры.

Диагностические признаки дизельного двигателя: температура подшипников, частота вращения вала, величина скорости вибрации корпуса, температура охлаждающей жидкости, температура масла. Для измерения величин данных признаков конструкция двигателя должна включать в себя датчик скорости вращения вала, датчик скорости вибрации корпуса, датчики температуры подшипников, масла и охлаждающей жидкости.

Диагностические признаки преобразователей напряжения: действующие значения входных и выходных линейных напряжений преобразователя, действующие значения входных и выходных токов фаз преобразователя, температура силовых полупроводниковых приборов преобразователя. Для измерения величин данных признаков к силовым входам и выходам преобразователя должны быть подключены датчики тока и напряжения, силовые полупроводниковые приборы должны иметь датчики температуры.

Диагностические признаки ветровой турбины: температура подшипников, частота вращения вала, величина скорости вибрации корпуса, скорость ветра, температура атмосферного воздуха. Для измерения величин данных признаков конструкция турбины должна включать в себя датчик скорости вращения вала, датчик скорости вибрации корпуса, также в системе должны присутствовать датчик температуры атмосферного воздуха и датчик скорости ветра.

Рассмотрим процесс построения алгоритмов диагностирования на примере синхронного генератора.

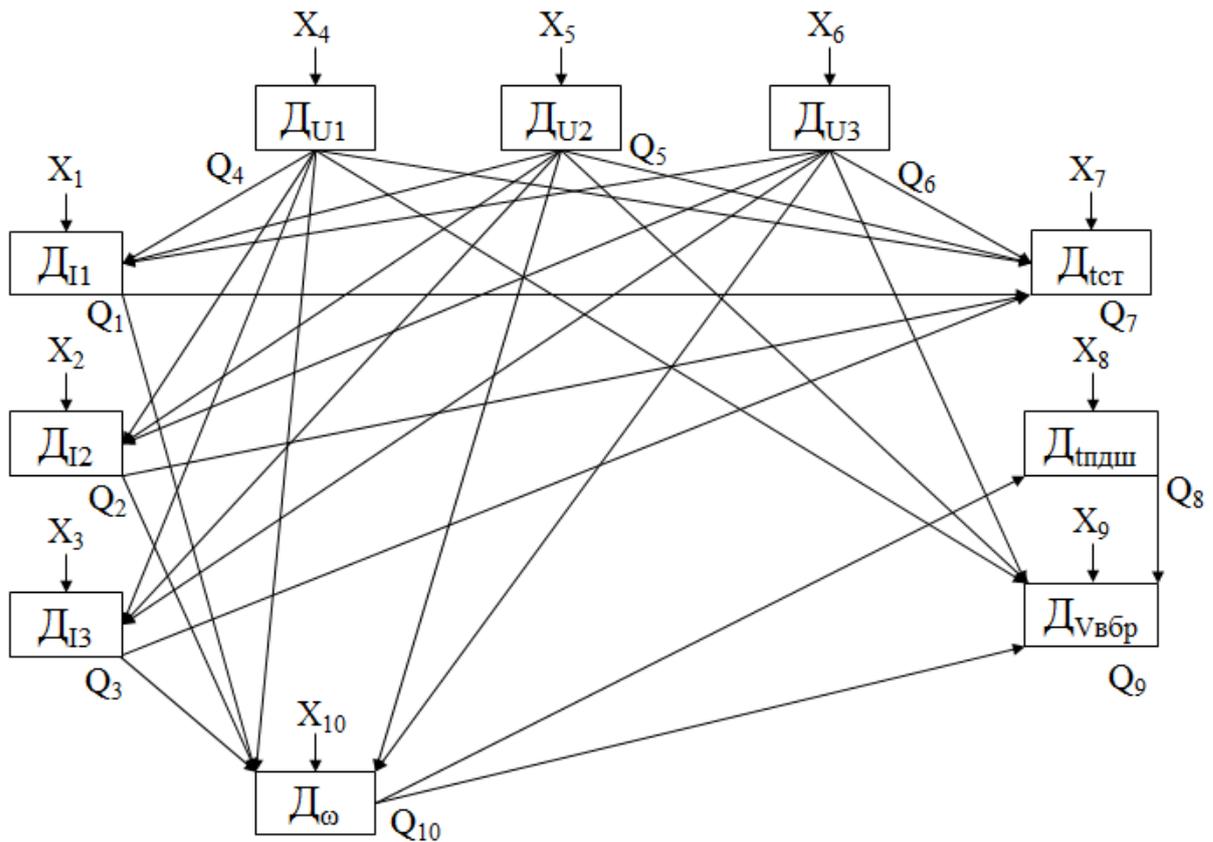
Для построения логической модели оборудования путем опроса экспертов была получена таблица взаимовлияния диагностических признаков, таб. 3.1.

Таблица 3.1 - Взаимовлияние диагностических признаков синхронного генератора

Параметры	Линейные напряжения статора	Токи фаз статора	Температура обмотки статора	Частота вращения вала	Температура подшипников	Скорость вибрации корпуса
Линейные напряжения статора	○	●	●	●	○	●
Токи фаз статора	●	○	●	●	○	○
Температура обмотки статора	●	●	○	○	○	○
Частота вращения вала	●	●	○	○	●	●
Температура подшипников	○	○	○	●	○	●
Скорость вибрации корпуса	●	○	○	●	●	○

Следует отметить, что перечни и схемы взаимовлияния диагностических признаков оборудования, рассмотренные в данной работе, являются эскизными, и подлежат уточнению в зависимости от особенностей конкретного объекта диагностирования.

На основе полученной таблицы можно построить логическую модель диагностирования синхронного генератора в виде графа, рис. 3.1. Входные сигналы диагностических признаков обозначаются дугами X_i , причинно-следственные взаимосвязи диагностических признаков обозначаются дугами Z_i . Вершинами графа являются датчики соответствующих диагностических признаков.



$D_{И1,2,3}$ – датчики тока фаз А, В, С; $D_{U1,2,3}$ – датчики линейных напряжений АВ, АС, ВС; D_{ω} – датчик частоты вращения вала; $D_{тст}$ – датчик температуры обмотки статора; $D_{тпдш}$ – датчик температуры подшипников; $D_{Ввбр}$ – датчик скорости вибрации корпуса;

Рис. 3.1. Логическая модель диагностирования синхронного генератора

Для построения таблицы функций неисправности необходимо записать логические уравнения для каждого Z_i в конъюнктивной форме:

$$Z_i = Q_i \wedge F_i, \quad (3.1)$$

где Z_i – значение выхода i -той вершины графа (датчика диагностического признака функционально-логической модели), Q_i – состояние i -той вершины графа, F_i – конъюнкция значений входов i -той вершины графа. Таким образом, выходной сигнал элемента считается исправным, если исправен сам элемент и все входные сигналы данного элемента находятся в норме.

Для графа рис. 3.1 получим следующую систему логических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Z_1 = Q_1 \wedge X_1 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \\
 Z_2 = Q_2 \wedge X_2 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \\
 Z_3 = Q_3 \wedge X_3 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \\
 Z_4 = Q_4 \wedge X_4 \\
 Z_5 = Q_5 \wedge X_5 \\
 Z_6 = Q_6 \wedge X_6 \\
 Z_7 = Q_7 \wedge X_7 \wedge Z_1 \wedge Z_2 \wedge Z_3 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \\
 Z_8 = Q_8 \wedge X_8 \wedge Z_{10} \\
 Z_9 = Q_9 \wedge X_9 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \wedge Z_8 \wedge Z_{10} \\
 Z_{10} = Q_{10} \wedge X_{10} \wedge Z_1 \wedge Z_2 \wedge Z_3 \wedge Z_4 \wedge Z_5 \wedge Z_6
 \end{array} \right. , \quad (3.2)$$

Рассмотрим построение таблицы функций неисправностей. Графы таблицы соответствуют элементам функционально-логической модели рассматриваемого объекта диагностики, строки – их выходным сигналам, при этом 1 означает, что величина сигнала соответствует норме, 0 – не соответствует норме. Для заполнения i -того столбца таблицы рассматривается неисправность i -того элемента модели, то есть Q_i принимается равным 0. Состояния остальных элементов, а также входные сигналы принимаются равными 1, то есть находятся в нормальном состоянии, после чего находится решение системы логических уравнений. В качестве примера найдем решение системы 2 для заполнения первого столбца таблицы функций неисправностей синхронного генератора. Считаем состояние первого элемента Q_1 равным 0, состояния прочих элементов и входные сигналы равными 1. Подставив данные в систему 2 получим, опустив промежуточные выкладки, что Z_1 равно 0, $Z_{4,5,6}$ равны 1, $Z_{2,3}$ равны 1, Z_7 равно 0, Z_{10} равно 0, Z_8 равно 0, Z_9 равно 0. Аналогично вычисляются значения таблицы для неисправностей остальных элементов, таб. 3.2.

Таблица 3.2 – Таблица функций неисправностей синхронного генератора

Сигнал	Элемент схемы									
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
Z1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Z2	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
Z3	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Z4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Z5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Z6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Z7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Z8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Z9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

При помощи полученной таблицы функций неисправностей составляется алгоритм диагностирования. Применяется метод половинного разбиения. Поиск неисправности начинается с элемента, проверка которого при любом ее исходе разделит логическую модель диагностирования на приблизительно равные по количеству элементов части. В данном случае был выбран элемент Q₁₀. Если выходной сигнал Z₁₀ находится в пределах нормы, то, как видно по таблице 2, элементы Q_{1,2,3,4,5,6,10} формируют сигналы, лежащие в пределах нормы, а элементы Q_{7,8,9} могут иметь неисправности. Далее проверяется элемент Q₇, если он находится в норме, то причиной неисправности могут являться элементы Q₈ или Q₉. Если же сигнал Z₁₀ находится не в норме, то необходима проверка элементов Q_{1,2,3,4,5,6}. Далее, если сигнал Z₁ находится в норме, то элементы Q_{4,5,6} исправны, и необходима проверка элементов Q_{2,3}. Если сигнал Z₁ не в норме, то необходима проверка элементов Q_{4,5,6}. Таким образом, формируется алгоритм диагностирования синхронного генератора, представленный на рис. 3.2.

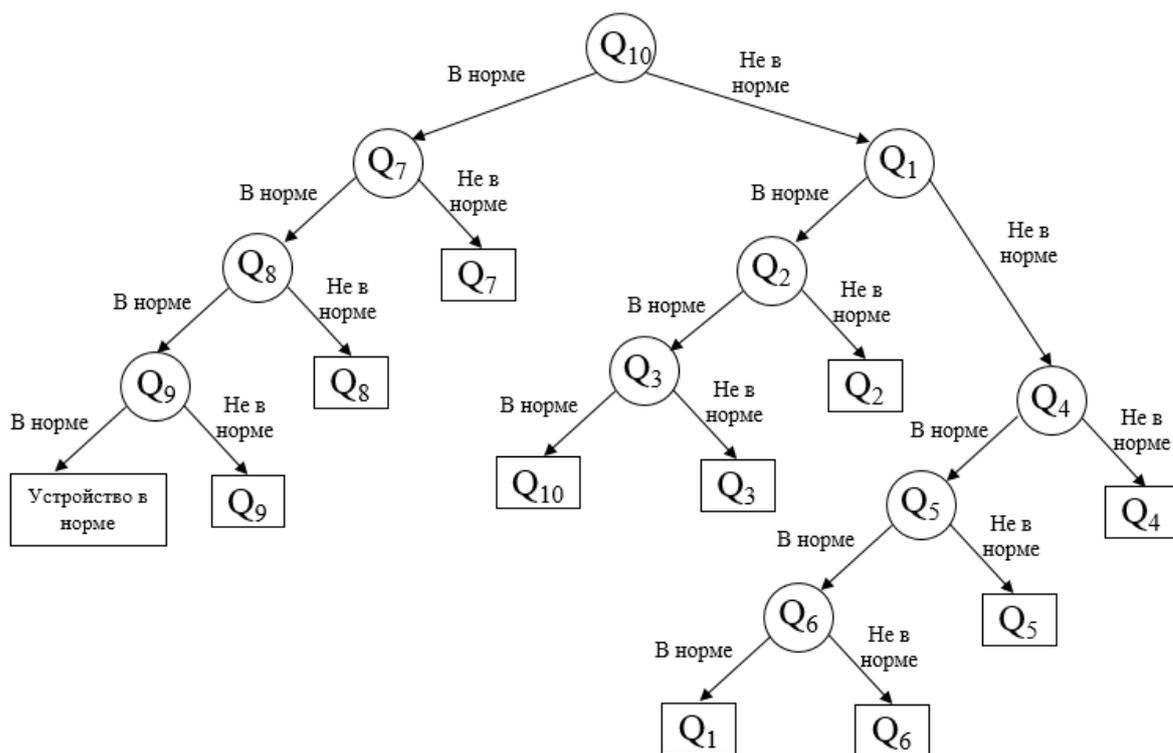
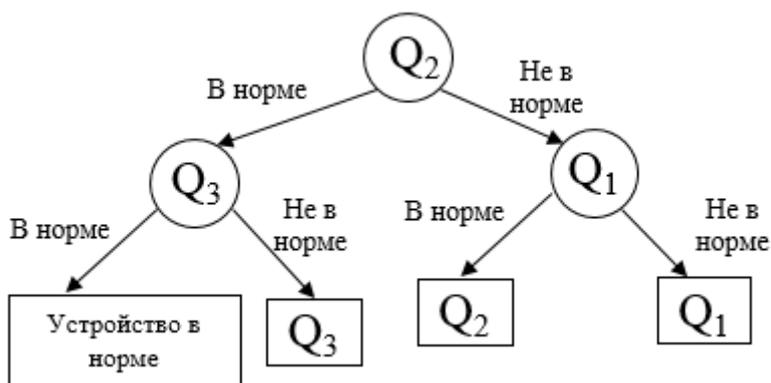


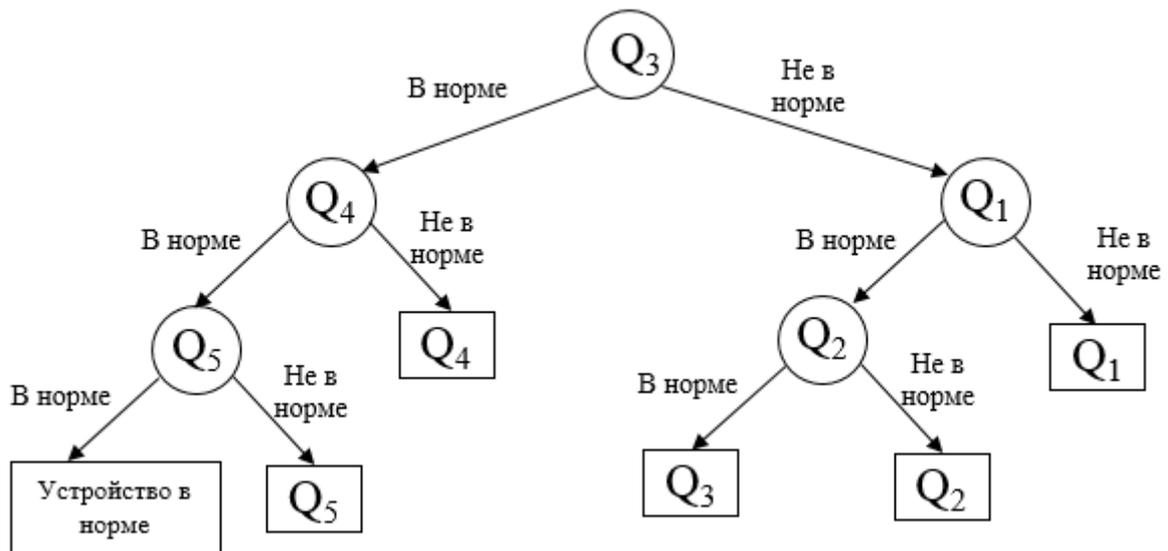
Рис. 3.2. Алгоритм диагностирования синхронного генератора

Аналогично формируются алгоритмы диагностирования других устройств, входящих в состав комплекса, рис. 3.3 - 3.6. Промежуточные выкладки приведены в Приложении А.



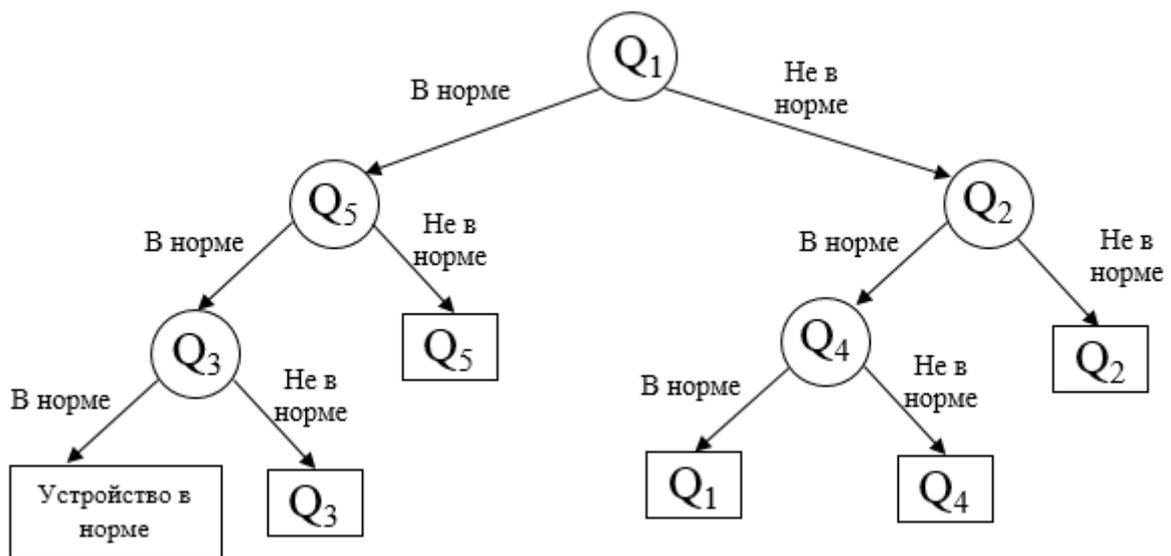
Q_1 – температура фотоэлектрических преобразователей; Q_2 – ток фотоэлектрических преобразователей; Q_3 – напряжение фотоэлектрических преобразователей

Рис. 3.3. Алгоритм диагностирования фотоэлектрических преобразователей



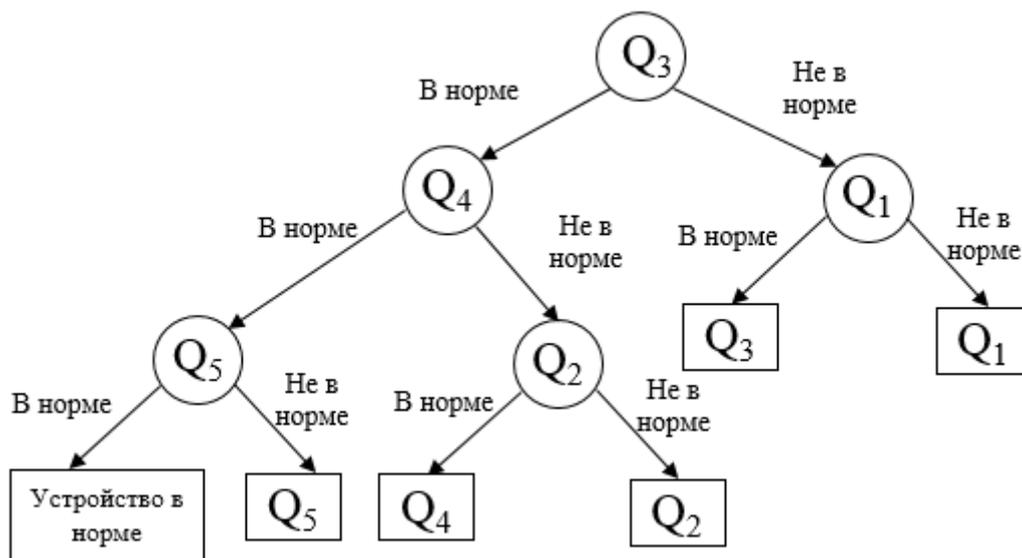
Q_1 – температура охлаждающей жидкости; Q_2 – температура масла; Q_3 – частота вращения вала; Q_4 – температура подшипников; Q_5 – скорость вибрации корпуса

Рис. 3.4. Алгоритм диагностирования дизельного двигателя



Q_1 – температура ключей преобразователя; Q_2 – действующие значения входных токов; Q_3 – действующие значения выходных токов; Q_4 – действующие значения входных напряжений; Q_5 – действующие значения входных напряжений

Рис. 3.5. Алгоритм диагностирования преобразователей напряжения



Q₁ – скорость ветра; **Q₂** – температура атмосферного воздуха; **Q₃** – частота вращения вала; **Q₄** – температура подшипников; **Q₅** – скорость вибрации корпуса
Рис. 3.6. Алгоритм диагностирования ветровой турбины

3.1.2 Разработка системы распознавания неполных последовательностей результатов проверок

Рассмотрим объединенный алгоритм диагностирования оборудования, входящего в состав преобразователя энергии ветра, рис. 3.7. Здесь элементы, относящиеся к ветровой турбине имеют индекс 1, относящиеся к синхронному генератору имеют индекс 2, относящиеся к преобразователю частоты – индекс 3.

Поиск неисправностей во всей подсистеме подразумевает проведение значительного количества проверок. Поэтому для уменьшения количества проверок предлагается новая модификация существующего способа, которая заключается в использовании нейросети для распознавания и классификации результатов последовательностей проверок с целью прогнозирования выходного элемента в последовательности проверок, таким образом определяя место возникновения неисправности без проведения полного объема проверок. Для этого последовательности проверок для выявления каждого неисправного элемента системы записываются в виде таблицы, таб. 3.3.

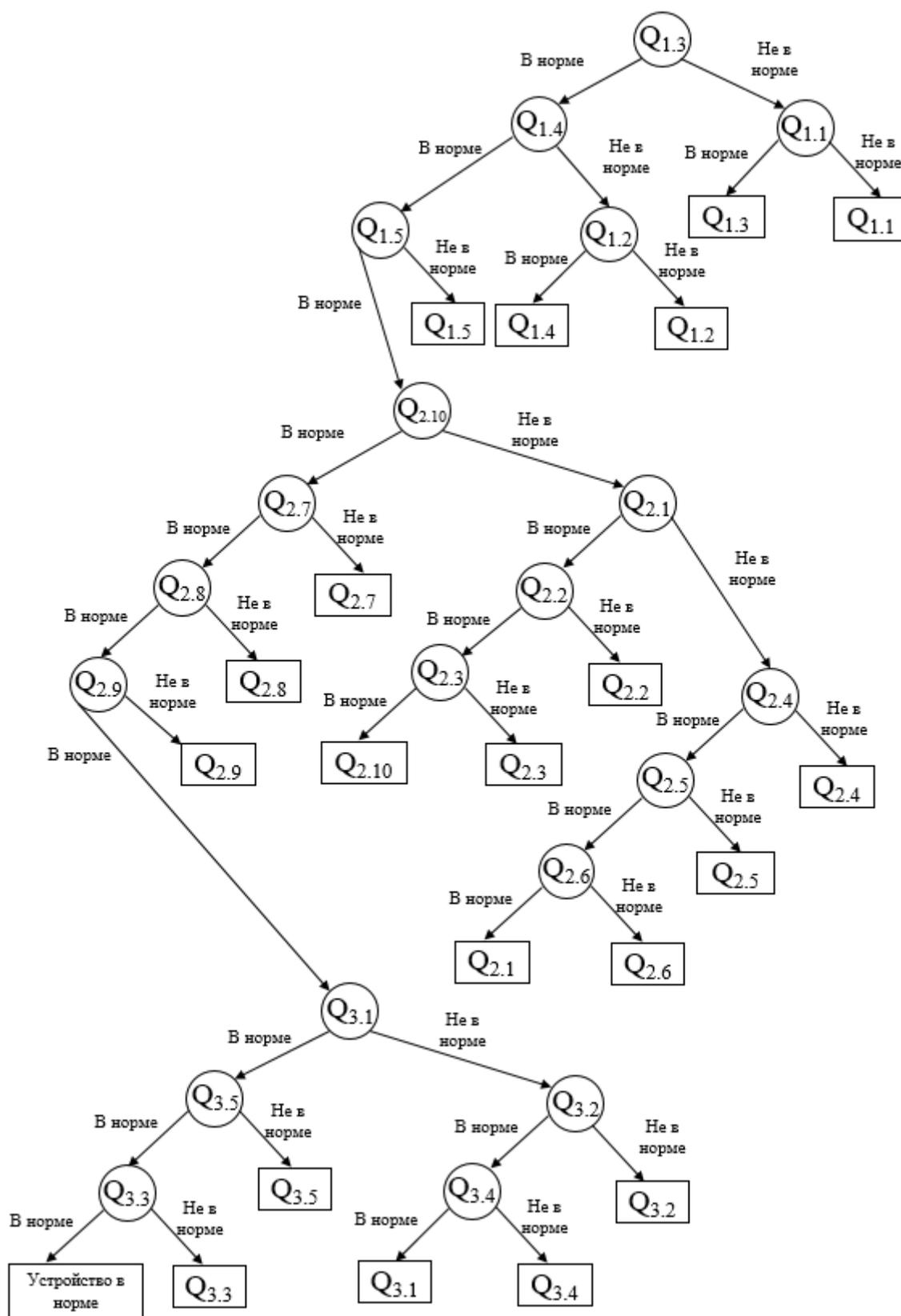


Рис. 3.7. Алгоритм диагностирования преобразователя энергии ветра

Таблица 3.3 – Последовательности проверок преобразователя энергии ветра

	Номер последовательности проверок																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Проверяемый элемент	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1	
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.3	-	
	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	-	1.4	-	-	-	
	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	-	-	-	-	-	
	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	-	2.2	2.2	2.2	2.4	2.4	2.4	2.4	-	-	-	-	-
	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	-	-	2.3	2.3	-	2.5	2.5	2.5	-	-	-	-	-	-
	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	0	-	-	-	2.10	-	-	2.6	2.6	-	-	-	-	-	-	-
	3.5	3.5	3.5	3.2	3.2	3.2	-	-	-	-	-	-	-	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.3	3.3	-	3.4	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	OK	-	-	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

На основе данного набора последовательностей проверок был подготовлен набор данных для обучения и проверки работоспособности нейронной сети, состоящий из 126 последовательностей элементов проверок, включая неполные последовательности. Пример последовательностей, использованных для обучения, а также пример верно распознанных последовательностей приводится в таб. 9 Приложения А. В результате была получена двухслойная нейронная сеть, структура которой приведена на рис. 3.8.

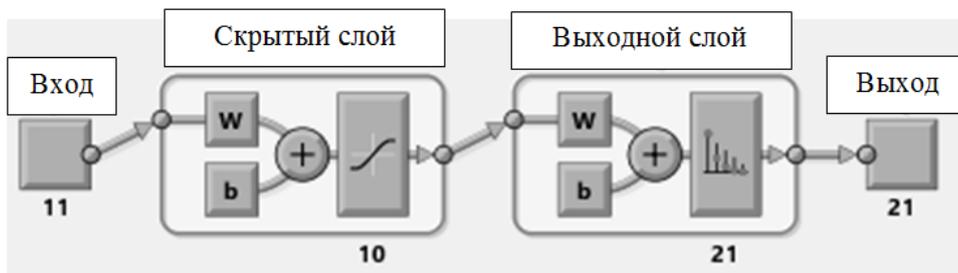


Рис. 3.8. Структура нейронной сети для классификации последовательностей проверок

Сеть имеет 10 нейронов в составе скрытого слоя и 21 нейрон в составе выходного слоя. Эффективность обучения и тестирования сети можно оценить по матрице ошибок, которая представлена на рис. 3.9.

соответствующего неисправности элемента Q 3.3 (рис. 3.7), полная последовательность результатов проверок состоит из 10 элементов. В результате работы нейронной сети были верно классифицированы пять неполных последовательностей результатов проверок, соответствующих последовательности № 2 (рис. 3.9, столбец 2, строка 2). Среди пяти верно классифицированных последовательностей одна являлась сокращенной на 3 элемента, две являлись сокращенными на 4 элемента, две являлись сокращенными на 5 элементов (таб. 9 Приложения А). Таким образом, среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности результатов проверок № 2 составило 4,2, или 42%. Аналогично среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов было вычислено для остальных типов последовательностей проверок. Промежуточные выкладки приведены в таб. 10 Приложения А. В результате среднее арифметическое значение процентной доли сокращенных элементов среди всех последовательностей проверок для рассмотренной выборки составило 29,3% [65].

Аналогичным образом были построены нейронные сети распознавания и классификации последовательностей проверок для преобразователя солнечной энергии и дизель-генераторной установки. На рис. 3.10 приводится алгоритм диагностирования преобразователя солнечной энергии. Элементы, относящиеся к фотоэлектрическим преобразователям имеют индекс 1, относящиеся к инвертору напряжения имеют индекс 2.

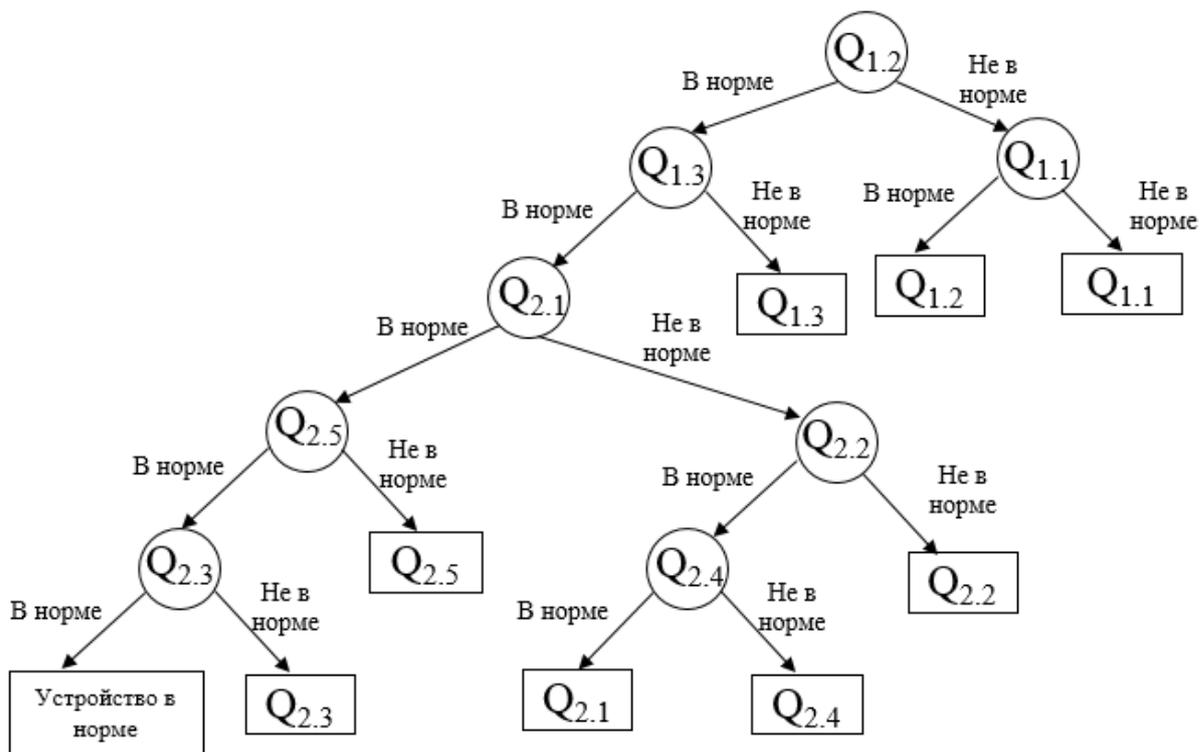


Рис. 3.10. Алгоритм диагностирования преобразователя солнечной энергии

В таб. 3.4 приводятся последовательности проверок для диагностирования преобразователя солнечной энергии.

Таблица 3.4 – Последовательности проверок преобразователя солнечной энергии

	Номер последовательности проверок								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Проверяемый элемент	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1
	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	-	1.2	-
	2.5	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	-	-	-
	2.3	2.3	-	2.4	2.4	-	-	-	-
	OK	-	-	2.1	-	-	-	-	-

На рис. 3.11 представлена матрица ошибок подготовленной нейронной сети для распознавания и классификации последовательностей проверок преобразователя солнечной энергии.

Строголизируемая последовательность	1	4 7.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
	2	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.9%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	85.7%
	3	1 1.9%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	85.7%
	4	1 1.9%	0 0.0%	0 0.0%	5 9.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	83.3%
	5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.9%	5 9.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	83.3%
	6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
	7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	100%
	8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	100%
	9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	100%
			66.7% 33.3%	100% 0.0%	100% 0.0%	83.3% 16.7%	83.3% 16.7%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
Целевая последовательность											

Рис. 3.11. Матрица ошибок нейронной сети для классификации проверок преобразователя солнечной энергии

Нейронная сеть верно распознала и классифицировала 92,6% неполных последовательностей проверок. Среднее арифметическое значение процентной доли сокращенных элементов среди последовательностей проверок для рассмотренной выборки составило 27,4% (таб. 11 Приложения А).

На рис. 3.12 приводится алгоритм диагностирования дизель-генераторной установки. Элементы, относящиеся к дизельному двигателю имеют индекс 1, относящиеся к синхронному генератору имеют индекс 2, относящиеся к преобразователю частоты - индекс 3.

В таб. 3.5 приводятся последовательности проверок для диагностирования дизель-генераторной установки.

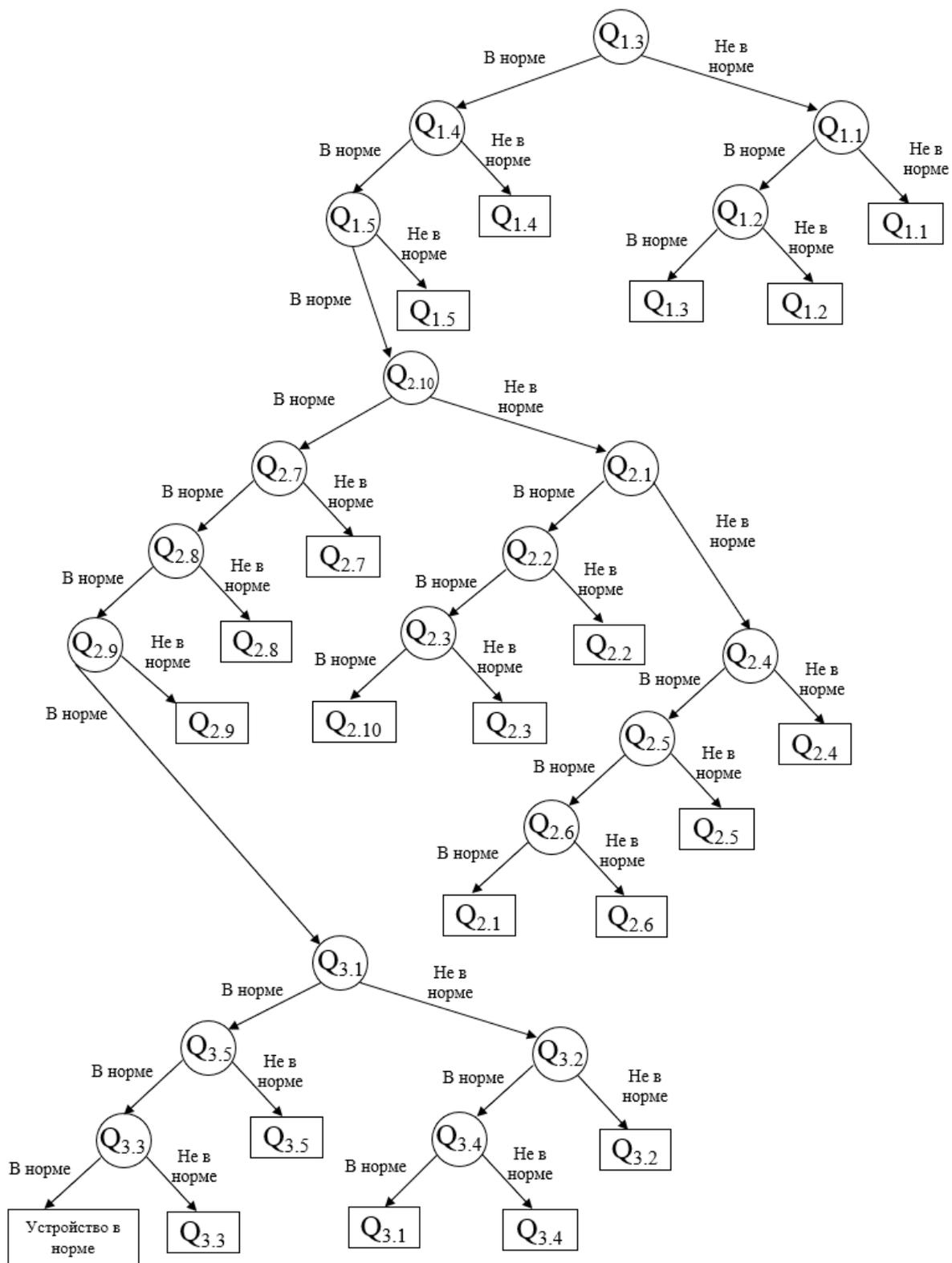


Рис. 3.12. Алгоритм диагностирования дизель-генераторной установки

Таблица 3.5 – Последовательности проверок дизель-генераторной установки

	Номер последовательности проверок																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Проверяемый элемент	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1	1.1	
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	1.2	1.2	-
	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	-	-	1.3-	-	-	
	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	-	-	-	-	-	
	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	-	2.2	2.2	2.2	2.4	2.4	2.4	2.4	-	-	-	-	-
	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	-	-	2.3	2.3	-	2.5	2.5	2.5	-	-	-	-	-	-
	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	-	-	-	2.10	-	-	2.6	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.5	3.5	3.5	3.2	3.2	3.2	-	-	-	-	-	-	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.3	3.3	-	3.4	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ОК	-	-	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

На рис. 3.13 представлена матрица ошибок подготовленной нейронной сети для распознавания и классификации последовательностей проверок дизель-генераторной установки.

Нейронная сеть верно распознала и классифицировала 81% неполных последовательностей проверок. Среднее арифметическое значение процентной доли сокращенных элементов среди последовательностей проверок для рассмотренной выборки составило 30,6% (таб. 12 Приложения А).

Таким образом подготовленные нейронные сети позволяют распознавать и классифицировать неполные последовательности проверок, что дает возможность прогнозировать место возникновения неисправности без выполнения полного объема проверок, уменьшая затраты ресурсов и времени.

Исходными данными для определения периодичности планового технического обслуживания является информация о надежности элементов (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы), предоставляемых производителем на основании результатов испытаний определенного количества образцов. Но поскольку условия эксплуатации и события, возникающие при работе каждого конкретного образца оборудования являются уникальными, каждая единица оборудования может выйти из строя раньше или позже срока, заявленного производителем. В связи с этим для предупреждения внезапных отказов, а также для уменьшения затрат на проведение планового технического обслуживания, происходит переход к техническому обслуживанию по состоянию, для чего необходимо осуществлять мониторинг технологических и физических параметров оборудования, а также использовать не только качественную оценку технического состояния оборудования, но и количественную, позволяющую отслеживать динамику его изменения, осуществлять ранжирование и прогнозирование. Разработки систем мониторинга ведут научно-производственные компании, такие, как Систэм Электрик, CMS Condition Monitoring Systems, Dynapar, Brüel & Kjør Vibro, Ifm efector Canada, Semiotic Labs. В научных работах предлагаются различные методы по диагностике и оценке технического состояния оборудования: методом реконструкционного моделирования [66], методом спектрального анализа [67 – 70], путем анализа внутренних параметров электротехнической системы и границы области ее работоспособности [71, 72] и некоторые другие [73 – 77]. Вместе с этим в законодательстве Российской Федерации закреплён метод количественной оценки путем вычисления индекса технического состояния оборудования [78]. Исследователями предлагаются различные видоизменения данного метода [79-83], направленные на увеличение достоверности оценки технического состояния путем корректировки

весовых коэффициентов и формул, по которым вычисляется индекс технического состояния оборудования. Однако данный метод характеризуется значительной линеаризацией свойств объекта оценки технического состояния и может привести к игнорированию некоторых эмерджентных свойств объекта, а также специфических комбинаций величин диагностических признаков, что негативно сказывается на корректности оценки технического состояния.

В данной работе предлагается новый способ, заключающийся в построении экспертной системы, вычисляющей количественную оценку технического состояния (КОТС) оборудования на основании величин диагностических признаков по установленному перечню логических правил, что позволяет при формировании оценки в полной мере учесть любые характерные состояния объекта оценки и комбинации величин диагностических признаков. Может быть сформирована шкала с указанием необходимых мероприятий на основе получаемых количественных оценок технического состояния, к примеру: КОТС 1-0,67 – техническое обслуживание не требуется, КОТС 0,66-0,34 – техническое обслуживание необходимо провести в запланированные сроки, КОТС 0,33-0 необходимо незамедлительное техническое обслуживание. Для обеспечения робастности системы применяется аппарат нечеткой логики, демонстрирующий положительные результаты в системах управления, искусственного интеллекта, а также мониторинга технического состояния электротехнического оборудования [84 - 90].

Известны работы, посвященные использованию нечеткой логики для диагностики судового оборудования [91 - 96], однако новый способ, предлагаемый в данной работе, позволяет учитывать в том числе и изменения состояния оборудования, имеющие необратимый характер.

Среди двух основных типов нечетких логических систем – система Мамдани-Заде [97 - 103] и система Такаги-Сугено-Канга [104, 105] – была

выбрана система Мамдани-Заде, поскольку она позволяет формировать интуитивно-понятные наборы логических правил и лучше подходит для создания систем, работа которых строится на основе экспертных знаний людей.

Системы количественной оценки технического состояния были построены для следующих устройств, входящих в состав генерирующего комплекса: фотоэлектрические преобразователи [106], синхронный генератор [107], ветровая турбина [108], дизельный двигатель, преобразователи напряжения [109]. Для построения систем использован пакет Matlab с расширением Fuzzy Logic Toolbox [110, 111].

Структурная схема предлагаемой системы количественной оценки технического состояния представлена на рис.3.14.

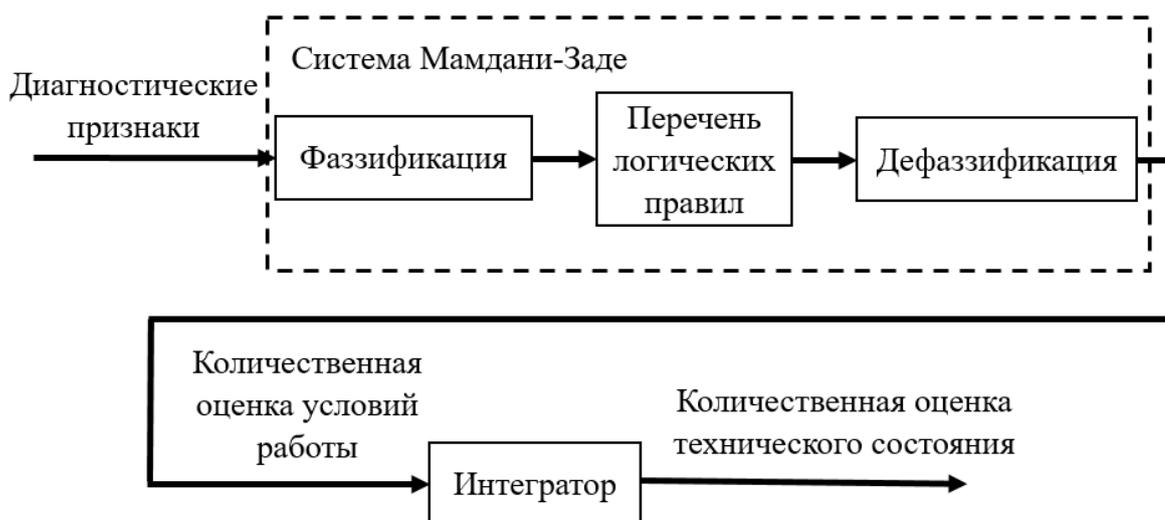


Рис. 3.14. Структурная схема системы количественной оценки технического состояния

Для примера рассмотрим принцип работы системы оценки условий работы синхронного генератора. Системы оценки технического состояния фотоэлектрических преобразователей, ветровой турбины, дизель-генератора, преобразователей напряжения имеют аналогичный принцип действия.

В качестве диагностических признаков синхронного генератора путем опроса экспертов по эксплуатации и ремонту электротехнического оборудования были выбраны температура обмоток статора («Winding temperature»), действующие значения токов фаз статора («Current»), действующие значения линейных напряжений статора («Voltage»). Поскольку данная система является демонстрационной и не имеет привязки к конкретному образцу оборудования, перечень диагностических признаков, вид функций принадлежности и набор логических правил подлежат уточнению. Физические величины выражаются в относительных единицах. Для величин каждого из диагностических признаков используются термины «Низкий» («Low»), «Высокий» («High»), «Нормальный» («Normal»).

Основываясь на величинах диагностических признаков, система нечеткого вывода формирует количественную оценку условий работы оборудования (КОУР, Operation Condition, OC) в соответствии с заданными перечнями логических правил. Для проверки работоспособности системы был использован следующий тестовый перечень логических правил:

1. If (Voltage is Normal) and (Current is Normal) and (Winding_temperature is Normal) then (Operation_condition is Good)
2. If (Voltage is High) and (Current is Normal) and (Winding_temperature is Normal) then (Operation_condition is Normal)
3. If (Voltage is Low) and (Current is Normal) and (Winding_temperature is Normal) then (Operation_condition is Normal)
4. If (Voltage is High) and (Current is High) and (Winding_temperature is not Normal) then (Operation_condition is Low)
5. If (Voltage is Low) and (Current is High) then (Operation_condition is Low).

6. If (Winding_temperature is not High) then (Operation_condition is Normal).

Количественная оценка условий работы вычисляется на основе величин линейных напряжений AB , AC , BC , и фазных токов A , B , C . За итоговый результат оценки принимается минимальное из полученных значений оценок.

На рис. 3.15-3.17 представлены поверхности нечеткого вывода системы, отражающие взаимосвязь входных и выходных переменных системы.

На основании полученной количественной оценки условий работы вычисляется количественная оценка технического состояния (КОТС, Technical Condition, TC). Для этого используется выражение 3.4:

$$TC(p) = 1 - \frac{1-k \cdot OC(p)}{Tp}, \quad (3.4)$$

где $TC(p)$ – количественная оценка технического состояния, $OC(p)$ – количественная оценка условий работы, T – постоянная времени интегрирования, k – настроечный коэффициент, p – оператор Лапласа.

Для получения корректных результатов оценки постоянная времени интегрирования и настроечный коэффициент должны определяться экспертным путем с учетом экспериментальных исследований конкретного объекта диагностики. В рамках данной работы применяются тестовые значения.

Рассмотрим результаты работы системы количественной оценки технического состояния синхронного генератора, входящего в состав ветровой турбины, в режиме нормальной эксплуатации, а также при работе ветровой турбины с превышением номинальной мощности нагрузки.

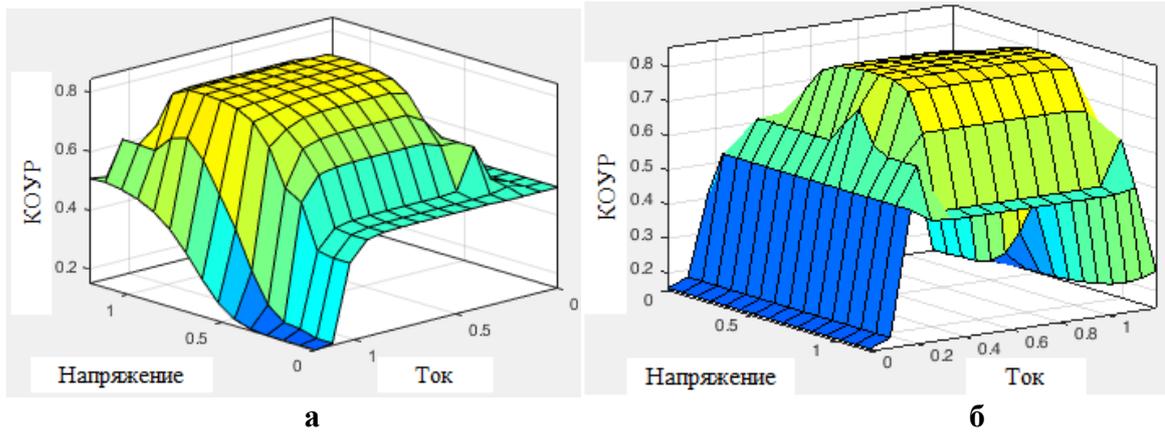


Рис. 3.15. Зависимость количественной оценки условий работы синхронного генератора от величин напряжений статора и токов статора: а – при температуре обмоток, равной 0,6 от номинальной величины; б – при температуре обмоток, равной номинальной величине;

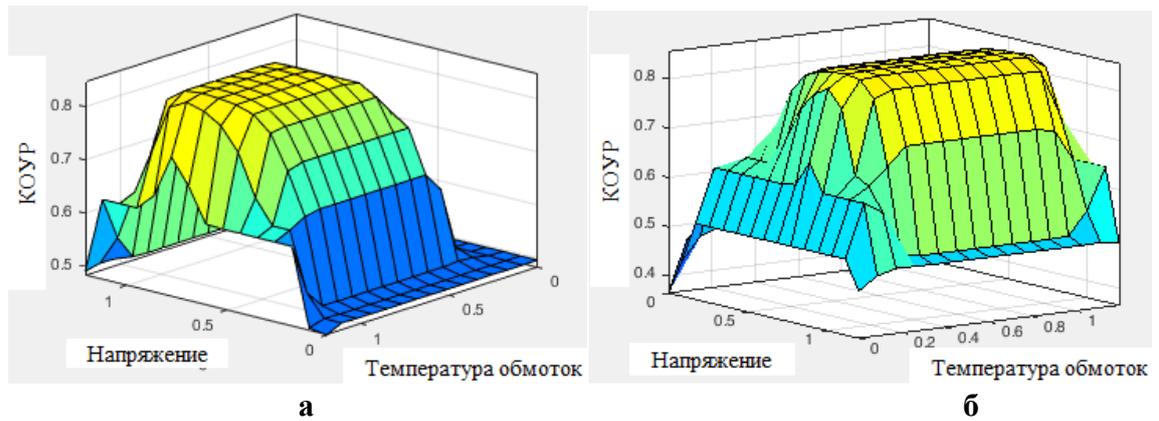


Рис. 3.16. Зависимость количественной оценки условий работы синхронного генератора от напряжения статора и температуры обмоток статора: а – при токе фазы, равном 0,6 от номинальной величины; б – при токе фазы, равном номинальной величине;

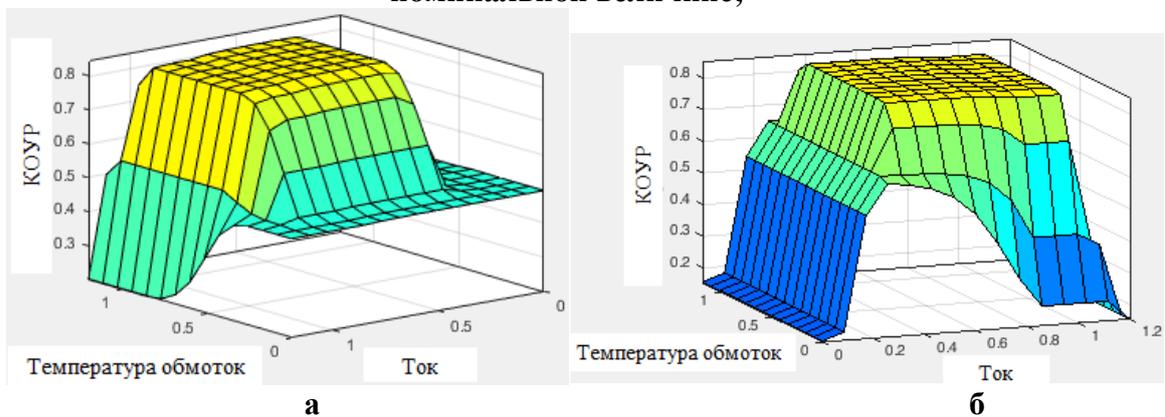
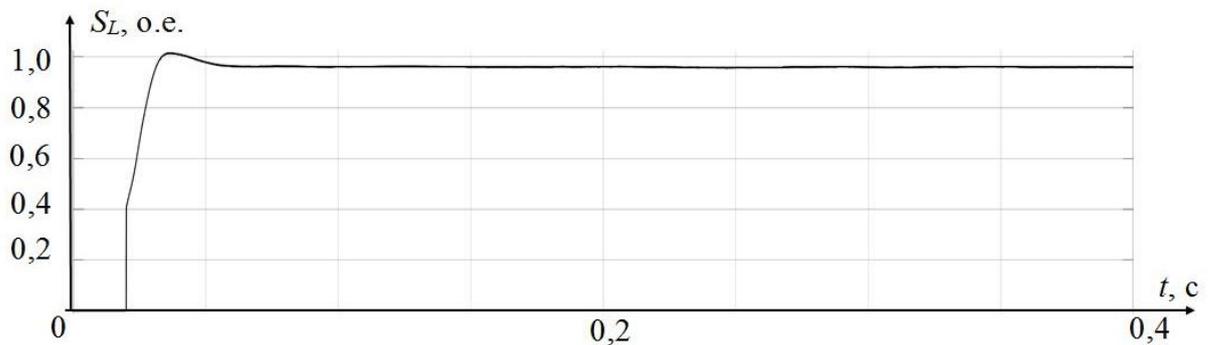
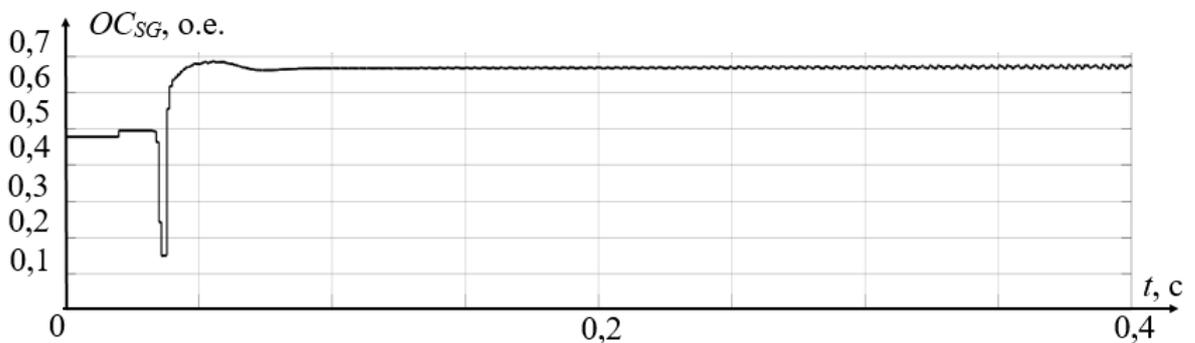


Рис. 3.17. Зависимость количественной оценки условий работы синхронного генератора от тока статора и температуры обмоток статора: а – при линейном напряжении, равном 0,6 от номинальной величины; б – при линейном напряжении, равном номинальной величине;

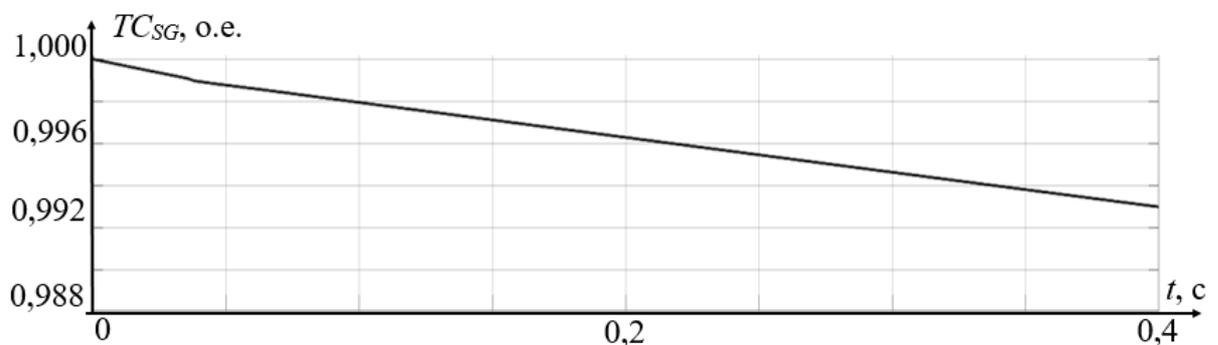
На рис. 3.18 представлены графики изменения количественных оценок условий работы и технического состояния для синхронного генератора, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при номинальной величине электрической нагрузки. Для большей наглядности графиков тестовый коэффициент изменения технического состояния в системе оценки был увеличен, поскольку моделирование выполняется на малом временном интервале.



а



б



в

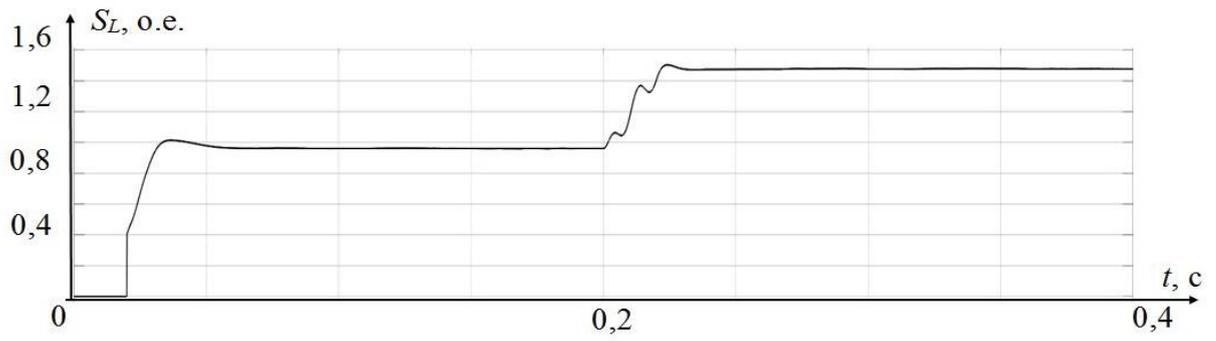
Рис. 3.18. КОТС синхронного генератора при работе преобразователя энергии ветра с номинальной мощностью нагрузки: а - полная мощность нагрузки; б – КОУР синхронного генератора; в – КОТС синхронного генератора

Как видно из графиков, после завершения переходных процессов в начале работы модели, система входит в нормальный режим работы, диагностические признаки находятся в номинальных пределах, вместе с этим количественная оценка условий работы принимает неизменное значение, а количественная оценка технического состояния синхронного генератора равномерно убывает.

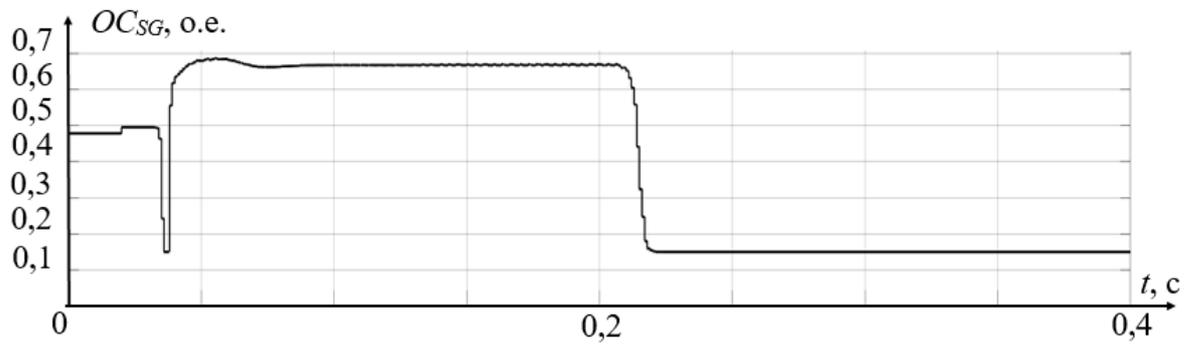
Рассмотрим изменение оценок условий работы и технического состояния оборудования при подключении дополнительного блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды, рис. 3.19.

В момент времени 0,2 секунды мощность нагрузки выходит за номинальные границы, в соответствии с этим количественная оценка условий работы уменьшается. При этом количественная оценка технического состояния на графике рис. 3.19-в уменьшается интенсивнее, чем на графике рис. 3.18-в, что обусловлено выходом диагностических признаков оборудования за пределы нормального режима.

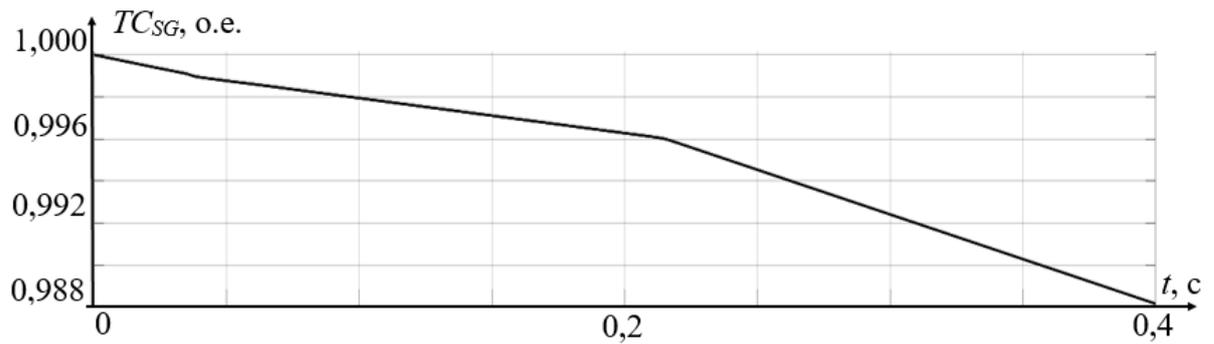
На рис. 3.20 представлены графики количественных оценок условий работы и технического состояния оборудования при подключении дополнительного блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды, с условным улучшением условий охлаждения генератора в момент времени 0,3 секунды, позволяющим поддерживать температуру обмоток в номинальных границах при увеличенной нагрузке. В качестве допущения скорость протекания тепловых процессов в данном случае была принята сопоставимой со скоростью протекания электромагнитных процессов, что позволит более наглядно оценить реакцию системы количественной оценки технического состояния как на изменение электромагнитных величин, так и температуры.



а

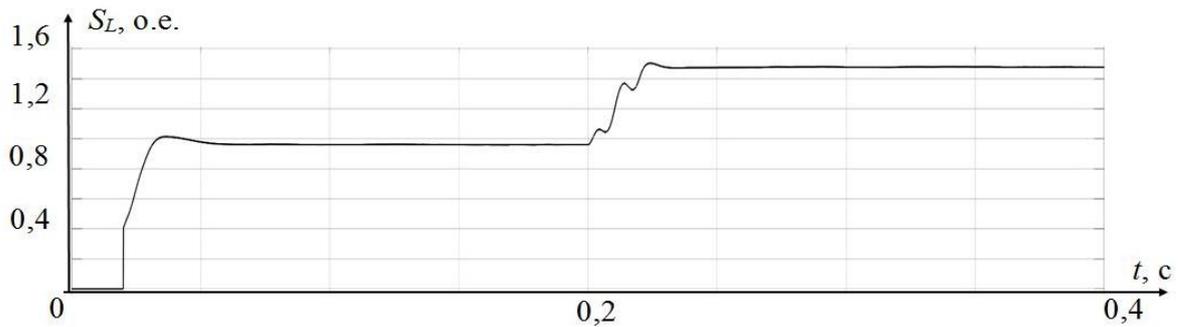


б

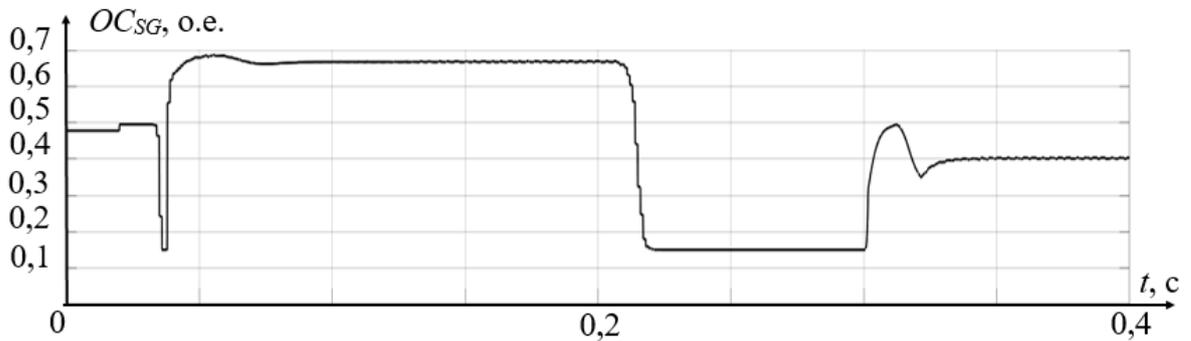


в

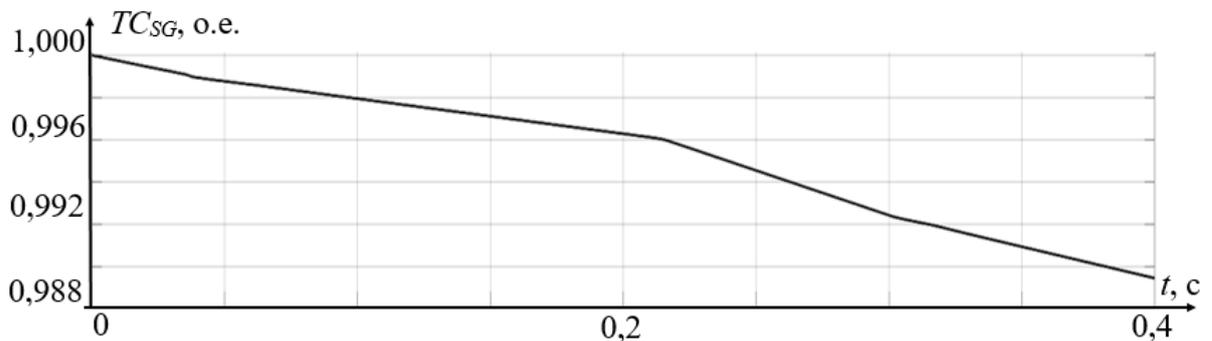
Рис. 3.19. КОТС синхронного генератора при работе преобразователя энергии ветра с превышением номинальной мощности нагрузки: а - полная мощность нагрузки; б – КОУР синхронного генератора; в – КОТС синхронного генератора



а



б



в

Рис. 3.20. КОТС синхронного генератора при работе преобразователя энергии ветра с превышением номинальной мощности нагрузки и обеспечением дополнительного охлаждения: а - полная мощность нагрузки; б – КОУР синхронного генератора; в – КОТС синхронного генератора

Как видно из графиков, после подключения дополнительного блока нагрузки в момент времени 0,2 секунды количественная оценка условий работы уменьшается до величины 0,15, но при условной нормализации температуры обмоток генератора в момент времени 0,3 секунды количественная оценка условий работы повышается до величины 0,4. В связи с этим интенсивность снижения количественной оценки технического состояния на отрезке времени 0,3 – 0,4 секунды становится

меньше, чем на отрезке времени 0,2 – 0,3 секунды.

Функционирование системы оценки технического состояния оборудования соответствует ожидаемому. Системы количественной оценки технического состояния фотоэлектрических преобразователей, ветровой турбины, дизель-генератора, преобразователей частоты и преобразователя напряжения имеют аналогичный принцип работы. В качестве диагностических признаков для формирования КОТС фотоэлектрических преобразователей были задействованы: ток фотоэлектрических преобразователей, напряжение фотоэлектрических преобразователей, температура фотоэлектрических преобразователей. Для формирования КОТС дизельного двигателя - температура подшипников, частота вращения вала, температура охлаждающей жидкости. Для формирования КОТС преобразователей напряжения - действующие значения выходных линейных напряжений преобразователя, действующие значения выходных токов фаз преобразователя, температура силовых полупроводниковых приборов преобразователя. Для формирования КОТС ветровой турбины - температура подшипников, частота вращения вала, скорость ветра.

Выводы по третьей главе:

1. Путем опроса экспертов по эксплуатации и ремонту электротехнического оборудования сформирован перечень диагностических признаков электротехнического оборудования, входящего в состав комбинированной электростанции, отражающий взаимозависимости диагностических признаков различной физической природы. Для синхронного генератора выделено 6 диагностических признаков, для дизельного двигателя – 5, для фотоэлектрических преобразователей – 3, для преобразователей напряжения – 5, для ветровой турбины – 5.

2. Разработаны функционально-логические модели

диагностирования оборудования комбинированной электростанции, таблицы функций неисправностей, а также синтезированы алгоритмы диагностирования, позволяющие осуществлять поиск единичных неисправностей – к примеру, перегрев силовых ключей преобразователя частоты из-за ухудшения условий охлаждения, отсутствие выходного напряжения дизель-генераторной установки из-за неисправности и остановки вала дизельного двигателя и т. п. (для преобразователя энергии ветра возможна проверка 19 элементов, для преобразователя солнечной энергии – 8, для дизель-генераторной установки - 20). Предложенная модификация алгоритмов диагностирования с использованием нейронной сети дает возможность прогнозировать место возникновения неисправности без проведения полного объема проверок. В рассмотренных тестовых наборах проверок точность прогнозирования неисправного элемента составила 84,1% для преобразователя энергии ветра, 92,6% для преобразователя солнечной энергии, 81% для дизель-генераторной установки. Среднее арифметическое значение процентной доли сокращенных элементов среди последовательностей проверок для рассмотренных выборок составило 29,3% для преобразователя энергии ветра, 27,4% для преобразователя солнечной энергии, 30,4% для дизель-генераторной установки.

3. Разработаны системы количественной оценки технического состояния оборудования комбинированной электростанции с использованием аппарата нечеткой логики. Системы формируют оценку технического состояния фотоэлектрических преобразователей, синхронных генераторов, ветровой турбины, дизельного двигателя, преобразователей напряжения на основе величин диагностических признаков, руководствуясь перечнями экспертных правил. На основе получаемых количественных оценок технического состояния может быть сформирована шкала с указанием необходимых мероприятий, к примеру:

1-0,67 – техническое обслуживание не требуется, 0,66-0,34 – техническое обслуживание необходимо провести в запланированные сроки, 0,33-0 необходимо незамедлительное техническое обслуживание. По сравнению с существующим методом оценки технического состояния путем вычисления индекса состояния, предлагаемый способ позволяет при формировании оценки в полной мере учесть любые характерные состояния объекта оценки и специфические комбинации величин диагностических признаков.

ГЛАВА 4. Прогнозирование количественной оценки технического состояния оборудования

Разработанная система количественной оценки технического состояния была дополнена блоками прогнозирования на основе адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) и сети с долгой кратковременной памятью (Long Short Term Memory network, LSTM), рис. 4.1. Использование двух блоков прогнозирования, основанных на различных принципах, позволяет получить вариативный прогноз, что уменьшает вероятность принятия оператором неверных управленческих решений в случае возникновения ошибочных результатов прогнозирования, по сравнению с использованием лишь одного принципа.



Рис. 4.1. Структурная схема системы количественной оценки технического состояния с блоками прогнозирования

4.1 Прогнозирование оценки технического состояния при помощи ANFIS

Адаптивная нейро-нечеткая система вывода (или адаптивная система нечеткого вывода на основе нейронной сети) представляет собой

разновидность искусственной нейронной сети, основанной на системе нечеткого вывода Такаги-Сугено-Канга. Нечеткие нейронные сети (гибридные сети) объединяют в себе преимущества систем нечеткого вывода и нейронных сетей [112]. В последние годы гибридные сети широко применяются для обработки слабо структурированных данных при решении задач анализа, классификации и прогнозирования в различных сферах деятельности, включая системы управления [113, 114] и техническую диагностику электрооборудования [115].

Нечеткая нейронная сеть является многослойной нейронной сетью со структурой, не имеющей обратных связей, в которой используются нефаззифицированные сигналы, веса и функции активации нейронов, а операция суммирования реализуется с использованием фиксированной Т-нормы или некоей другой непрерывной операции. Значения, которые принимают входные и выходные сигналы, а также веса гибридной нейронной сети являются вещественными числами из отрезка от 0 до 1.

Принцип, лежащий в основе создания гибридных сетей, заключается в построении системы нечеткого вывода, параметры функций принадлежности которой формируются нейронной сетью, прошедшей обучение на основе выбранного набора данных при помощи известных процедур обучения нейронных сетей.

Система ANFIS представляет собой набор нечетких правил «ЕСЛИ-ТО», которые благодаря нейронной сети имеют возможность обучения для аппроксимации нелинейных функций. Таким образом, ANFIS является универсальным аппроксиматором. Для формирования параметров системы нечеткого вывода могут использоваться не только нейронные сети, но и средства машинного обучения, к примеру, генетические алгоритмы.

В архитектуре ANFIS можно выделить пять слоев. Первый слой состоит из радиально-базисных нейронов и формирует функции принадлежности входных переменных. Второй слой состоит из операторов логического

умножения, формирующих конъюнкции сигналов, поступающих из первого слоя. Третий слой вычисляет веса логических правил, на основе которых формируется выходная переменная системы. Четвертый слой формирует выходную переменную системы, пятый слой выполняет ее дефаззификацию. Обобщенная структура сети архитектуры ANFIS с количеством входов $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-p}$ равным p , выходом Z_t , представлена на рис. 4.2. Набор логических правил количеством m имеет вид:

$$\text{ЕСЛИ } Z_{t-k} \text{ ЕСТЬ } A_{k,j} \text{ ТО } Z_t^{(j)} = \theta_{j0} + \sum_{k=1}^p \theta_{j0} Z_{t-k} \theta_{j,k}, \quad (3.1)$$

где $j = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, p$; $\theta_{j,k}, \theta_{j0}$ – линейные параметры сети, $A_{k,j}$ – нелинейный параметр сети; значения параметров определяются в результате обучения сети.

Значение выходной величины определяется выражениями:

$$Z_t = \bar{w}_1 Z_t^{(1)} + \bar{w}_2 Z_t^{(2)} + \dots + \bar{w}_m Z_t^{(m)}, \quad (3.2)$$

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^m w_j}, \quad (3.3)$$

где $j = 1, 2, \dots, m$; w_j – вес логического правила, определяется в результате обучения сети [116].

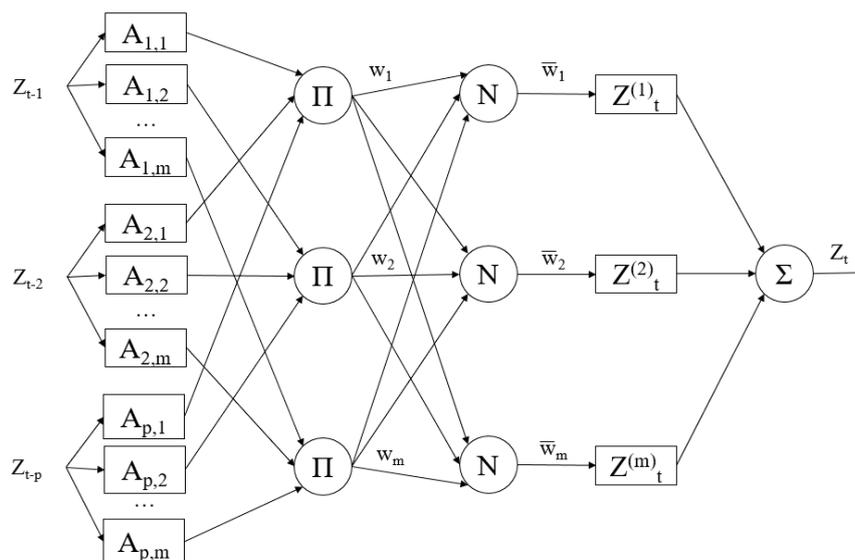


Рис. 4.2. Структурная схема нейро-нечеткой сети

Сеть архитектуры ANFIS обучается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (back propagation). Этот алгоритм представляет собой итеративный градиентный алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения значений выхода от желаемых значений (минимизации ошибки) в многослойных нейронных сетях.

Прогнозирование временных рядов с помощью ANFIS может осуществляться следующим способом. Некоторое количество значений временного ряда до момента времени t используются для того, чтобы предсказать значение временного ряда в некий момент $t+P$. Таким образом, D выбранных точек временного ряда, отобранных через каждые Δ единиц времени, используются для вычисления спрогнозированного значения временного ряда в момент времени $t+P$. В рассматриваемом случае количество точек, используемых для выработки прогноза, было принято равным 4, временной интервал между ними был принят равным 5 секундам, горизонт прогнозирования был принят равным 60 секундам. Для каждого момента времени t входные обучающие данные представляют собой вектор из четырех столбцов следующего вида:

$$w(t)=[x(t - 15), x(t - 10), x(t - 5), x(t)], \quad (3.4)$$

где w – вектор обучающих данных нейро-нечеткой сети, x – значение временного ряда в определенный момент времени.

Выходные данные соответствуют прогнозируемому значению временного ряда:

$$s(t)=[x(t + 60)], \quad (3.5)$$

где w – вектор выходных данных нейро-нечеткой сети, x – значение временного ряда в определенный момент времени.

Для обучения нейро-нечеткой сети был выбран набор данных, рис. 4.3, из 3500 точек с различным характером изменения оценки технического состояния, первые 1800 были использованы для первоначального

обучения, следующие 1700 – для проверки результатов обучения (верификации).

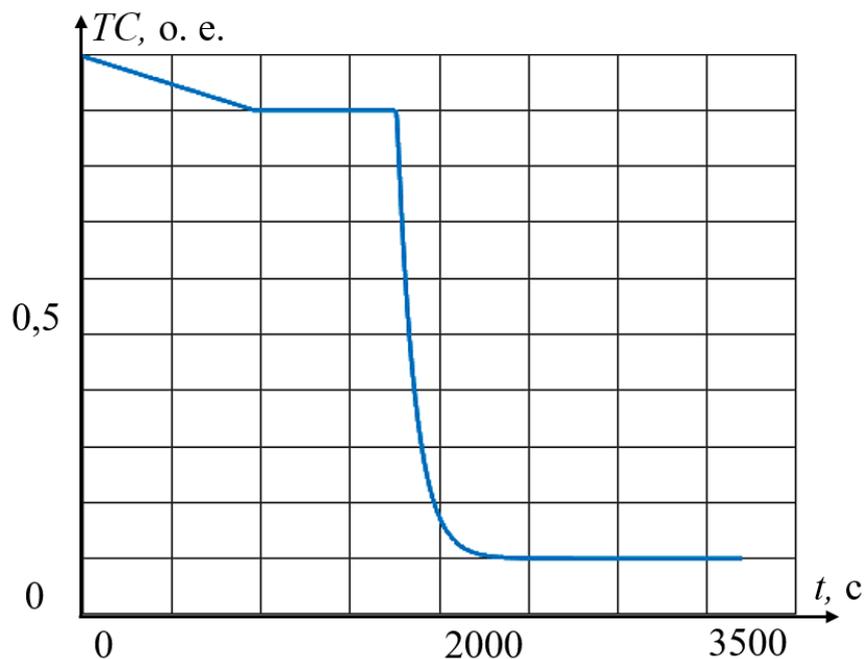


Рис. 4.3. Данные для обучения нейро-нечеткой сети

Из выбранных точек были сформированы массивы данных, содержащие четырехмерный вектор обучающих данных и одномерный вектор выходных данных. При помощи команды `genfis` в среде Matlab создается нейро-нечеткая система Сугено. Структура полученной системы приведена на рис. 4.4.

Система имеет 16 нечетких правил с общим числом параметров, равным 104 (24 нелинейных параметра и 80 линейных параметров). Для получения высокой способности системы к обобщению важно, чтобы количество точек обучающих данных было в несколько раз больше, чем количество оцениваемых параметров. В этом случае соотношение между обучающими данными и параметрами составляет примерно 18 ($1800/104$), что является хорошим балансом между количеством подгоночных параметров системы и количеством точек обучающей выборки.

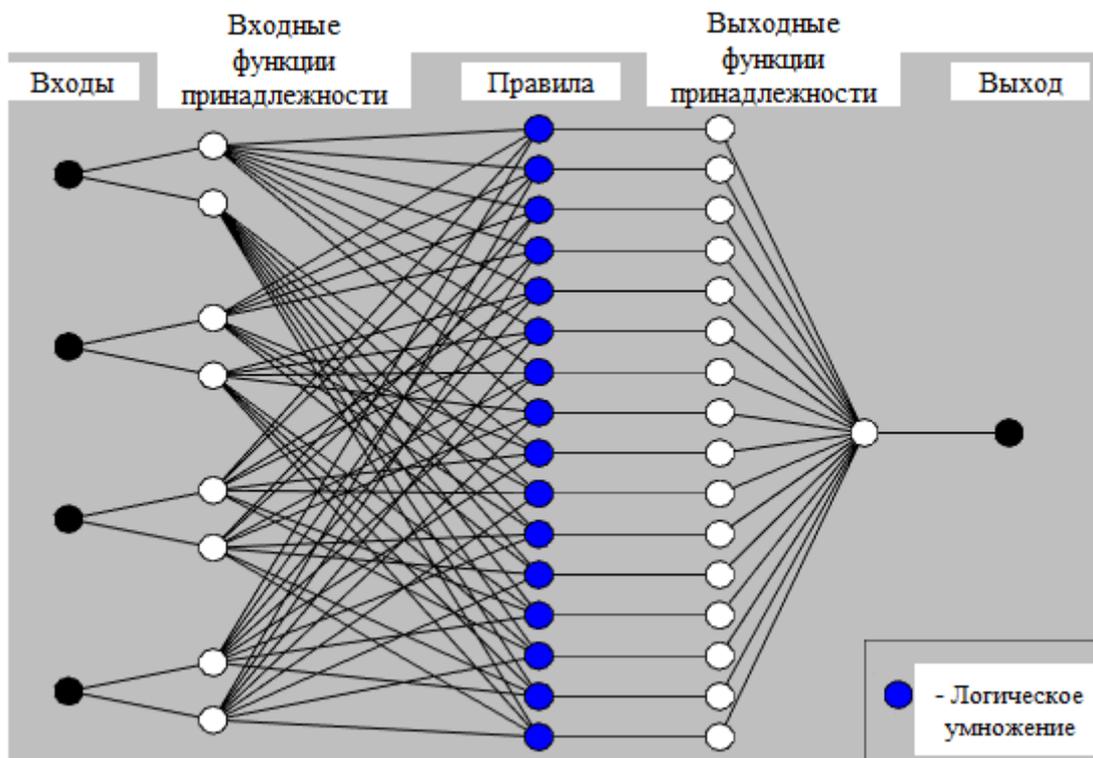
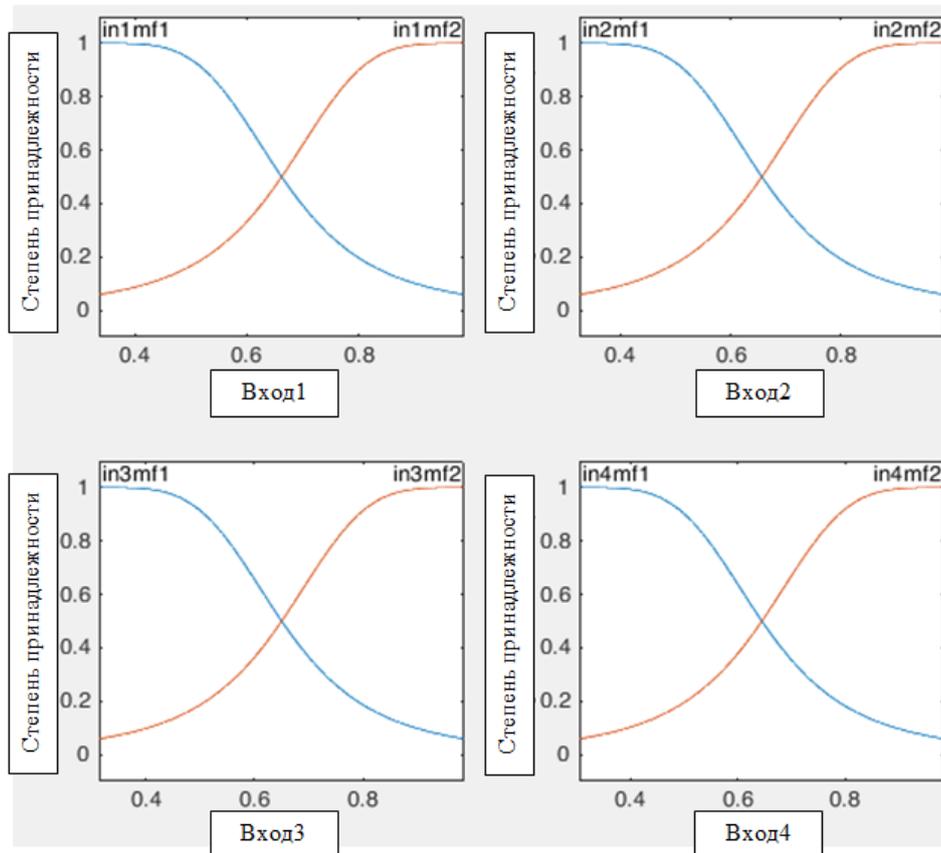
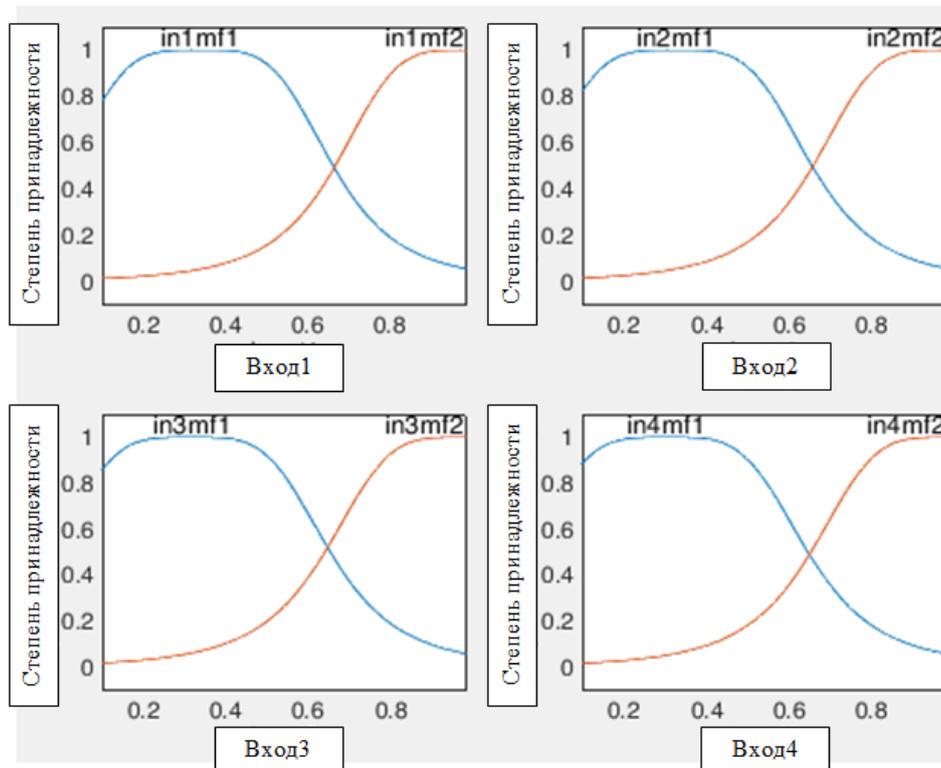


Рис. 4.4. Структурная схема нейро-нечеткой сети в рабочей области программы

Система прошла 10 эпох обучения, была выбрана конфигурация, полученная на второй эпохе обучения, обеспечивающая наименьшую величину среднеквадратической ошибки для данных валидации, таким образом, полученная система обеспечивает наилучшее обобщение за пределами обучающих данных. На рис. 4.5 приводятся изображения функций принадлежности для четырех входов системы до прохождения обучения и после прохождения обучения.



а



б

Рис. 4.5. Функции принадлежности входов ANFIS: а – до прохождения обучения; б – после прохождения обучения;

На рис. 4.6 представлены поверхности нечеткого вывода системы, отображающие взаимосвязь входных и выходного сигналов системы.

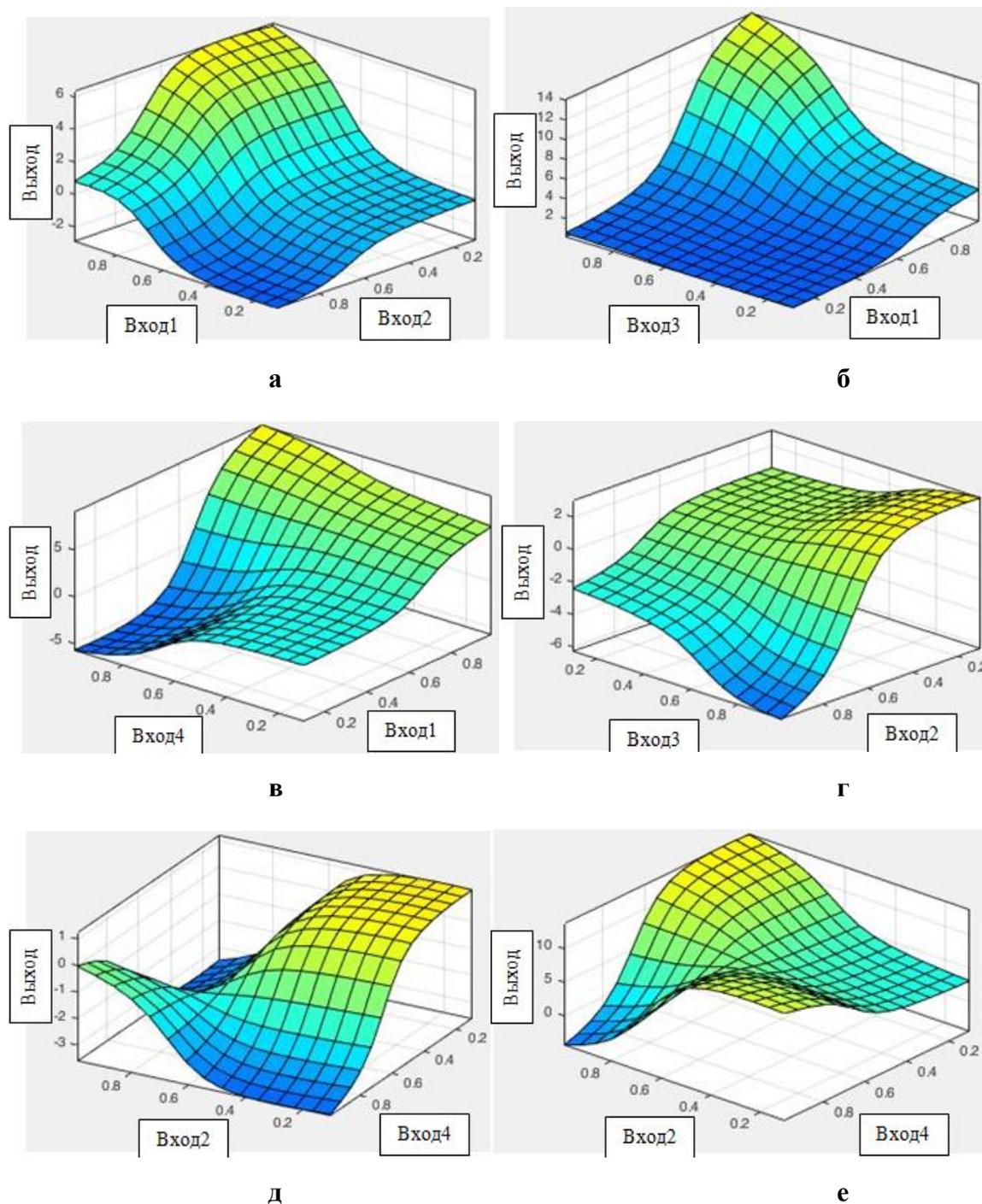


Рис. 4.6. Поверхности нечеткого вывода ANFIS: а – входы 1 и 2; б – входы 1 и 3; в – входы 1 и 4; г – входы 2 и 3; д – входы 2 и 4; е – входы 3 и 4;

На рис. 4.7 приведены значения ошибок обучения и верификации E , о. е. для каждой из эпох обучения.

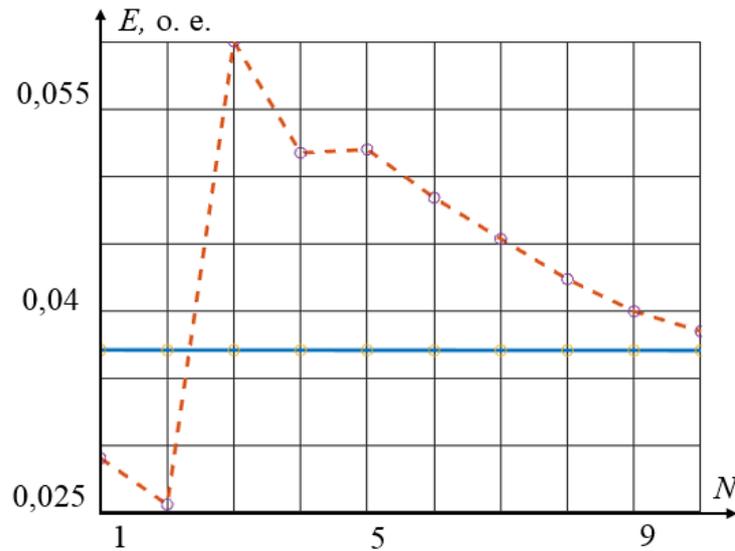


Рис. 4.7. Величины ошибки обучения (сплошная линия) и верификации (штриховая линия) ANFIS

Как видно по рис. 4.7, ошибка верификации уменьшается до эпохи 2 и достигает максимума на эпохе 3. Это является признаком т. н. перетренированности нейро-нечеткой сети, то есть явления, когда система хорошо интерпретирует примеры из обучающей выборки, однако с данными, не участвовавшими в обучении (из тестовой выборки), работает неудовлетворительно. Это связано с тем, что в процессе обучения могли быть обнаружены некоторые случайные закономерности в обучающей выборке, не характерные для генеральной совокупности данных. Существуют основания полагать, что увеличение количества эпох обучения позволит достичь меньшей величины ошибки, чем для второй эпохи, однако увеличение количества эпох обучения до 100 не позволило добиться величины ошибки меньше 0,03. Дальнейшее увеличение количества эпох обучения в рамках данной работы является нецелесообразным, поэтому полученный результат признан удовлетворительным и повторное обучение с увеличением количества эпох не проводилось.

На рис. 4.8 приводится сравнение исходного графика изменения оценки технического состояния и графика, построенного при помощи системы

прогнозирования, также приводится график ошибки прогнозирования. Как видно из рис. 4.8, в точке излома исходного графика оценки технического состояния в момент времени 1750 с наблюдается скачкообразное увеличение ошибки прогнозирования из-за слишком резкого изменения прогнозируемой величины, однако по общему виду графиков можно заключить, что система прогнозирования воспроизводит исходный график оценки технического состояния без значительных отклонений. По данному принципу были построены системы прогнозирования оценки технического состояния комбинированной электростанции: фотоэлектрических преобразователей, синхронных генераторов, ветровой турбины, дизельного двигателя, преобразователей напряжения. Существует потенциал увеличения точности прогнозирования путем подгонки временных интервалов входных данных, изменения набора данных для обучения, изменения параметров функций принадлежности входов системы, а также увеличения количества эпох обучения, однако в рамках данной работы полученная точность прогнозирования является удовлетворительной.

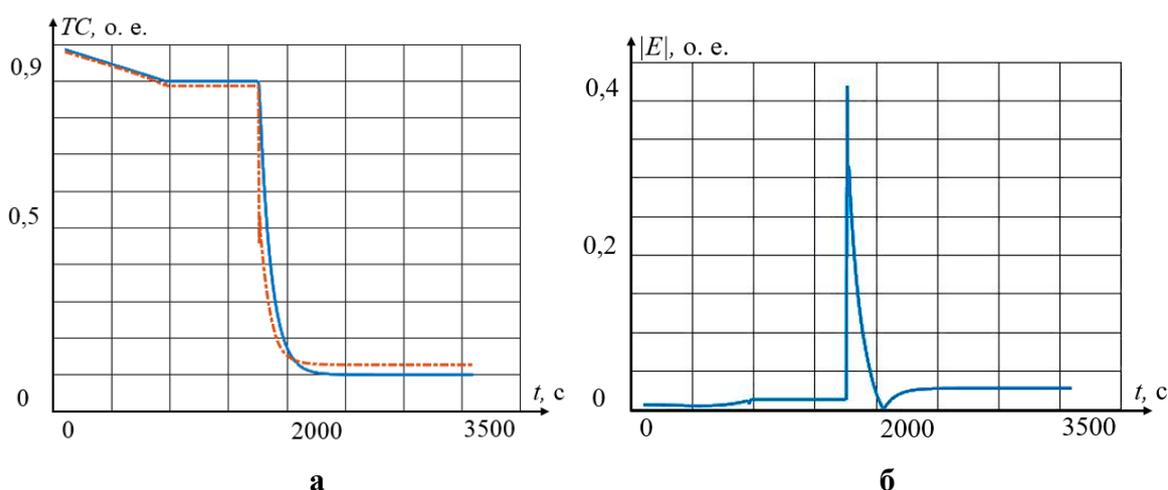


Рис. 4.8. Результаты тестового прогнозирования количественной оценки технического состояния: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования;

Рассмотрим работу систем прогнозирования оценки технического состояния оборудования, входящего в состав канала преобразования энергии ветра, на основе графиков оценок технического состояния длительностью один час, полученных в результате моделирования работы оборудования с ступенчатым увеличением электрической мощности нагрузки до 150% от номинальной величины в момент времени 2000 с.

На рис. 4.9, 4.10, 4.12 представлены графики исходных и спрогнозированных количественных оценок технического состояния оборудования, входящего в состав канала преобразования энергии ветра, а также графики ошибок прогнозирования.

Графики прогнозов оценок технического состояния и ошибок прогнозирования для оборудования, входящего в состав дизель-генераторной установки и канала преобразования солнечной энергии [117, 118] приводятся в приложении Б. Максимальные величины ошибок прогнозирования оценок технического состояния составили: для ветровой турбины 0,003847, для синхронного генератора в канале преобразования энергии ветра 0,02022, для преобразователя частоты в канале преобразования энергии ветра 0,01387, для дизельного двигателя 0,01719, для синхронного генератора в составе дизель-генераторной установки 0,01353, для преобразователя частоты в составе дизель-генераторной установки 0,0138, для фотоэлектрических преобразователей 0,01689, для инвертора напряжения 0,01684.

Рассмотрим работу системы при прогнозировании количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом проводимых технических обслуживаний. Для этого при поддержке экспертов организации, эксплуатирующей ветроустановку с синхронным генератором сходной мощности (7,5 кВА), расположенную на газокompрессорной станции, был сформирован график изменения количественной оценки технического состояния синхронного генератора

длительностью 10800 часов. Начальная величина количественной оценки технического состояния устройства была принята равной единице, после каждого технического обслуживания величина КОТС принимается равной 0,8.

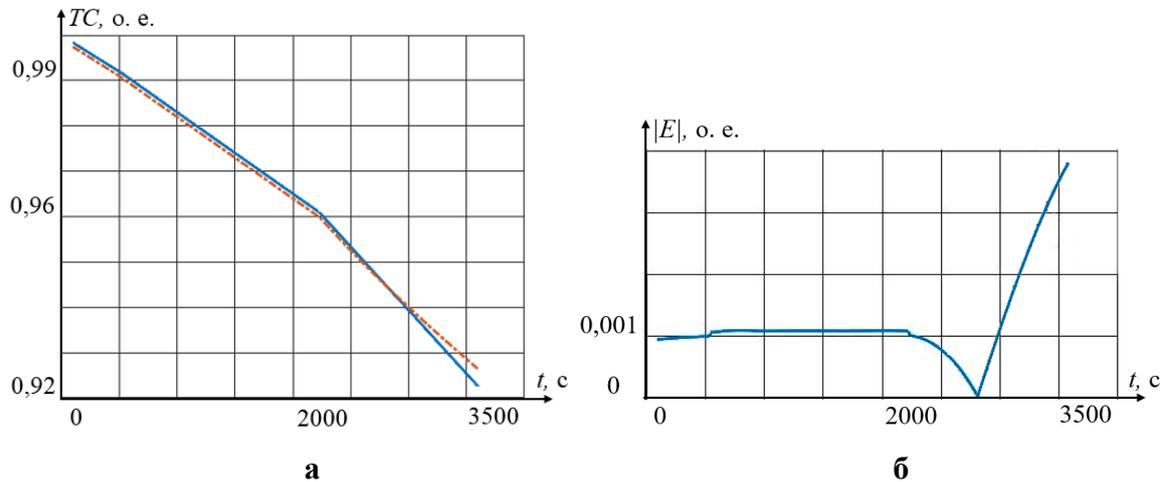


Рис. 4.9. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния ветровой турбины: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

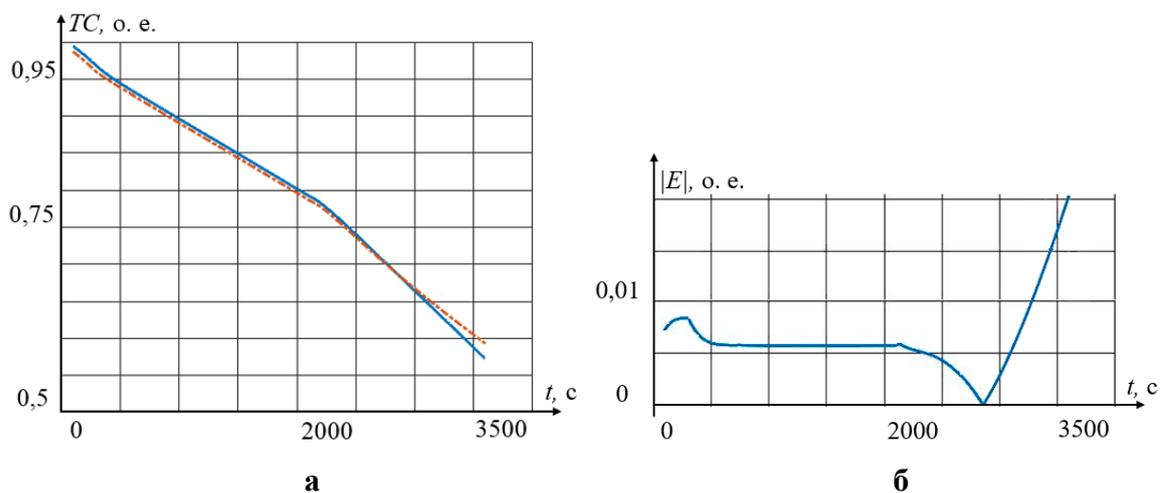


Рис. 4.10. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

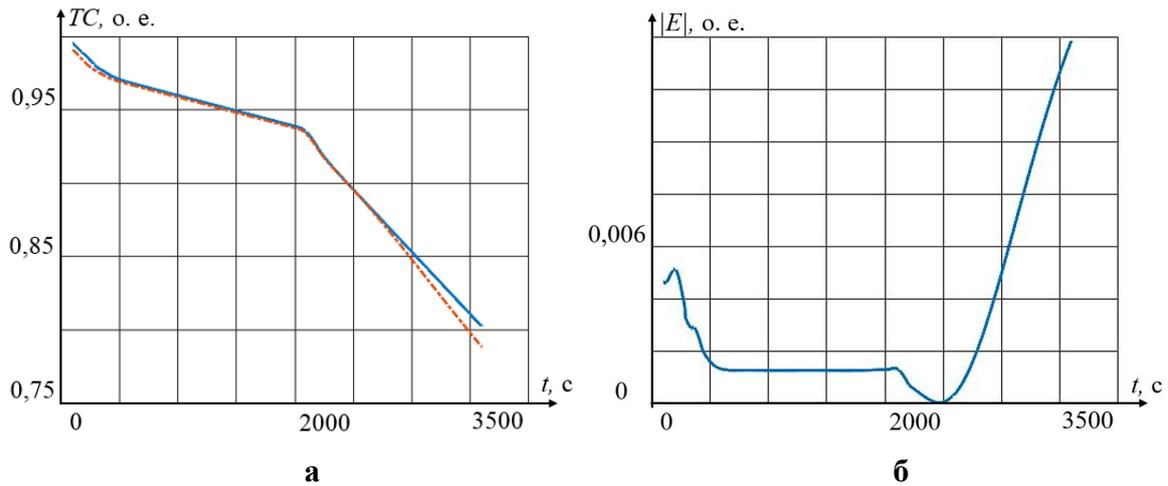


Рис. 4.11. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния преобразователя частоты: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

На рис. 4.12 представлены графики исходной и спрогнозированной количественных оценок технического состояния синхронного генератора, а также график ошибки прогнозирования. Величина горизонта прогнозирования была принята равной 60 часам.

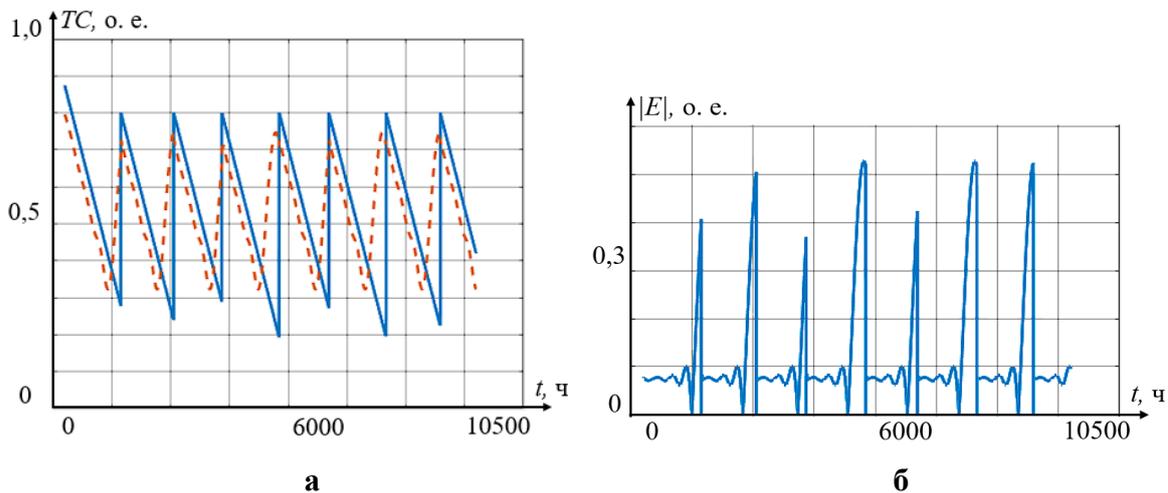


Рис. 4.12. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом технических обслуживаний: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния синхронного генератора; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора

Можно заключить, что общий вид исходного и спрогнозированного графиков соответствуют, но в моменты проведения технического обслуживания, при которых происходит излом графика количественной оценки технического состояния, величина ошибки прогнозирования является сравнительно большой – максимальная величина ошибки прогнозирования составила 0,521 (52,1%). Однако на гладких участках графика прогноз является достаточно точным – для них величина ошибки прогнозирования не превысила 0,1. Величина среднеквадратической ошибки прогнозирования равна 0,111.

4.2 Прогнозирование оценки технического состояния при помощи LSTM

Сеть с долгой кратковременной памятью является особым видом рекуррентной нейронной сети, впервые представленной в работе З. Хохрайтера и Ю. Шмидхубера [119].

Сети LSTM хорошо подходят для классификации, обработки и прогнозирования на основе данных временных рядов, поскольку между важными событиями во временном ряду могут быть задержки неизвестной продолжительности. Сети LSTM были разработаны для решения проблемы исчезающего градиента, с которой можно столкнуться при обучении традиционных рекуррентных нейронных сетей. Относительная нечувствительность к длине промежутка является преимуществом LSTM перед рекуррентными нейронными сетями, скрытыми марковскими моделями и другими методами обучения последовательностям во многих приложениях. Известны работы [120-123], в которых сети LSTM используются для прогнозирования графиков энергопотребления, а также технического состояния электродвигателей, однако для прогнозирования количественной оценки технического состояния оборудования комбинированной электростанции с совмещенной ветро-солнечно-

дизельной генерацией данный аппарат ранее не применялся.

Традиционная сеть с долгой кратковременной памятью описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 f_t &= \sigma_g(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f), \\
 i_t &= \sigma_g(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i), \\
 o_t &= \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o), \\
 c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c), \\
 h_t &= o_t \circ \sigma_c(c_t), \\
 c_t &= 0, h_0 = 0,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

где x_t – входной вектор сети, h_t – выходной вектор сети, c_t – вектор состояний, W , U – матрицы весов, формируемые при обучении сети, b – вектор смещения, формируемый при обучении, f_t – вектор вентиля забывания, i_t – вектор входного вентиля, o_t – вектор выходного вентиля, σ_t – сигмоидальная функция активации, σ_i , σ_h – функции активации на основе гиперболического тангенса, t – номер итерации, \circ – произведение Адамара.

Для обучения сетей с долгой кратковременной памятью могут использоваться итеративные градиентные алгоритмы, к примеру, метод обратного распространения ошибки. Также обучение может осуществляться при помощи сочетания эволюционного алгоритма для весов скрытых слоев и метода опорных векторов для весов выходного слоя. Для обучения с подкреплением могут применяться поиск в пространстве состояний, эволюционная стратегия, генетические алгоритмы [124].

Для построения сети с долгой кратковременной памятью в среде Matlab используется инструмент Deep Network Designer. Структура сети приводится на рис. 4.13.

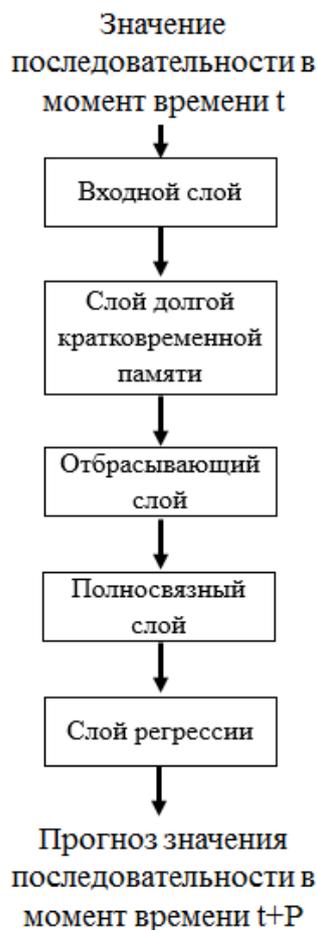


Рис. 4.13. Структурная схема сети с долгой кратковременной памятью

Структура включает в себя следующие элементы: входной слой, преобразующий входные данные в последовательность для обработки нейронной сетью, слой долгой кратковременной памяти, необходимый для анализа долгосрочных зависимостей в последовательности данных, исключаяющий слой, необходимый для исключения переобученности сети, полносвязный слой, перемножающий выходные сигналы предыдущего слоя и матрицы весов, и суммирующий с вектором смещения, а также слой регрессии, вычисляющий функцию потерь для оценки точности и качества работы системы.

Обучение осуществляется при помощи оптимизационного алгоритма «adaptive moment estimation algorithm» (ADAM). Для обучения нейронной сети был выбран набор данных из 3700 точек с различным характером

изменения оценки технического состояния, аналогичный набору, использованному для обучения системы ANFIS. Первые 3330 точек данного набора были использованы для первоначального обучения, следующие 370 – для проверки результатов обучения (верификации). Для обучения системы было проведено 100 эпох обучения. Опытным путем было определено, что увеличение количества эпох обучения в разумных пределах в данном случае не приводит к увеличению точности работы системы. Также было установлено, что возможно уменьшение количества эпох обучения до 30 без значительного уменьшения точности работы системы, однако уменьшение времени обучения также является незначительным, поэтому сокращение количества эпох было сочтено нецелесообразным. На рис. 4.14 представлены величины среднеквадратической ошибки обучения E , о. е. и потерь обучения L , о. е. в зависимости от количества эпох обучения.

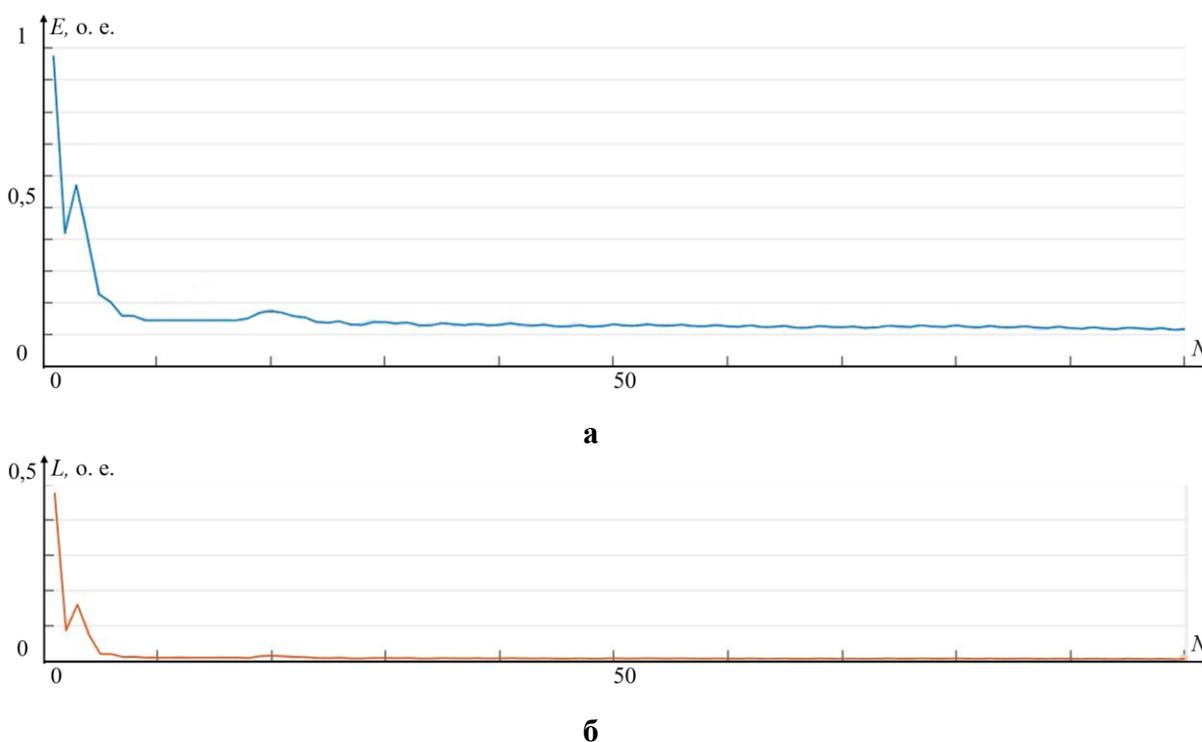


Рис. 4.14. Результаты обучения сети LSTM: а – среднеквадратическая ошибка обучения; б – потери обучения;

На рис. 4.15 приводится сравнение исходного графика изменения

оценки технического состояния, использованного для обучения, и графика, построенного при прогнозировании, также приводится график ошибки прогнозирования. По виду графиков рис. 4.15 можно заключить, что система прогнозирования воспроизводит исходный график оценки технического состояния без значительных искажений. Возможность построения более точной системы путем увеличения количества эпох обучения была практически полностью исчерпана, однако изменение алгоритмов обучения и набора обучающих данных потенциально может увеличить точность прогнозирования. В рамках данной работы достигнутая точность прогнозирования была принята достаточной, и дальнейшие действия по ее увеличению не предпринимались. При сопоставлении графиков рис. 4.15 и рис. 4.8 можно отметить, что в точке излома исходного графика оценки технического состояния в момент времени 1750 с и на участке резкого спада от 1750 с до 2000 с система LSTM обеспечивает десятикратно меньшую величину ошибки, чем система ANFIS. Однако на более пологих участках графика точность систем LSTM и ANFIS является сопоставимой.

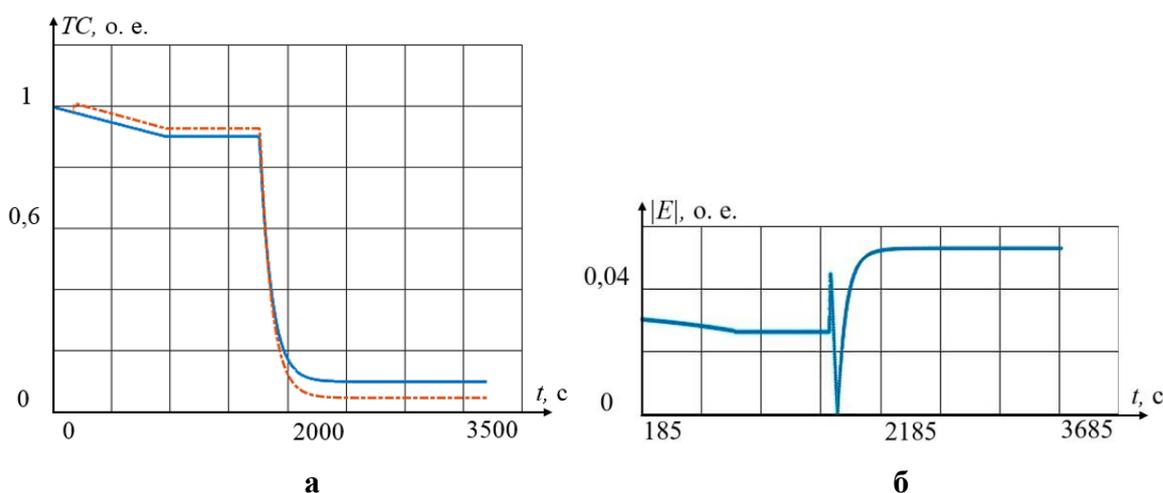


Рис. 4.15. Результаты тестового прогнозирования количественной оценки технического состояния: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования;

Системы прогнозирования оценки технического состояния, основанные на данном принципе, были построены для оборудования, входящего в состав комбинированной электростанции: фотоэлектрических преобразователей [125], синхронных генераторов, ветровой турбины, дизельного двигателя, преобразователей напряжения. В качестве примера рассмотрим работу систем прогнозирования оценки технического состояния оборудования, входящего в состав канала преобразования энергии ветра, на основе графиков оценок технического состояния длительностью один час, полученных в результате моделирования работы оборудования с ступенчатым увеличением электрической мощности нагрузки до 150% от номинальной величины в момент времени 2000 с. Величина горизонта прогнозирования принята равной 60 с. На рис. 4.16, 4.17, 4.18 представлены графики эталонной и спрогнозированной оценок технического состояния ветровой турбины, синхронного генератора и преобразователя частоты, также приводятся графики ошибок прогнозирования. Смещение графиков ошибки прогнозирования объясняется тем, что первые 185 точек используются для инициализации нейронной сети, и на данном интервале прогнозирование не осуществляется.

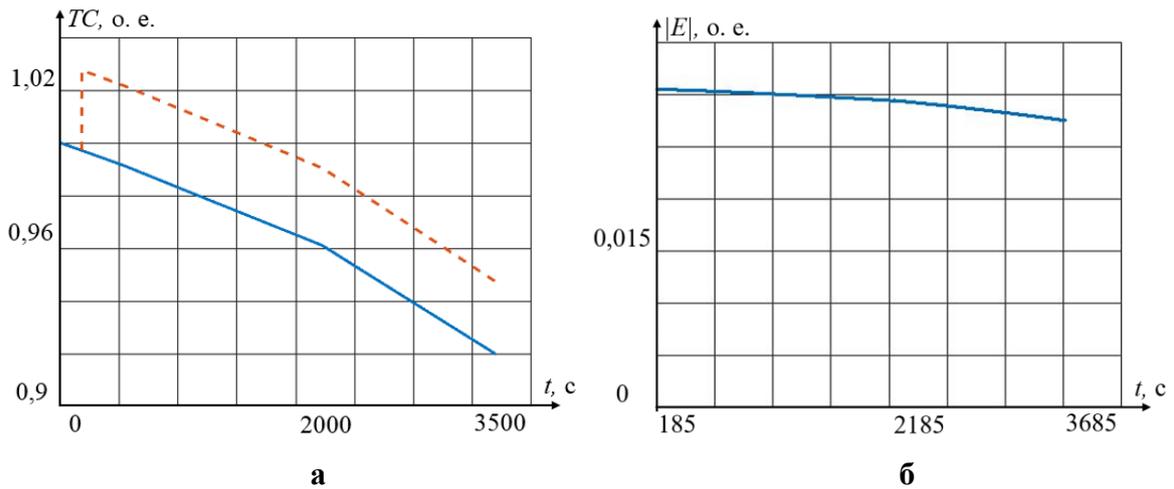


Рис. 4.16. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния ветровой турбины: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

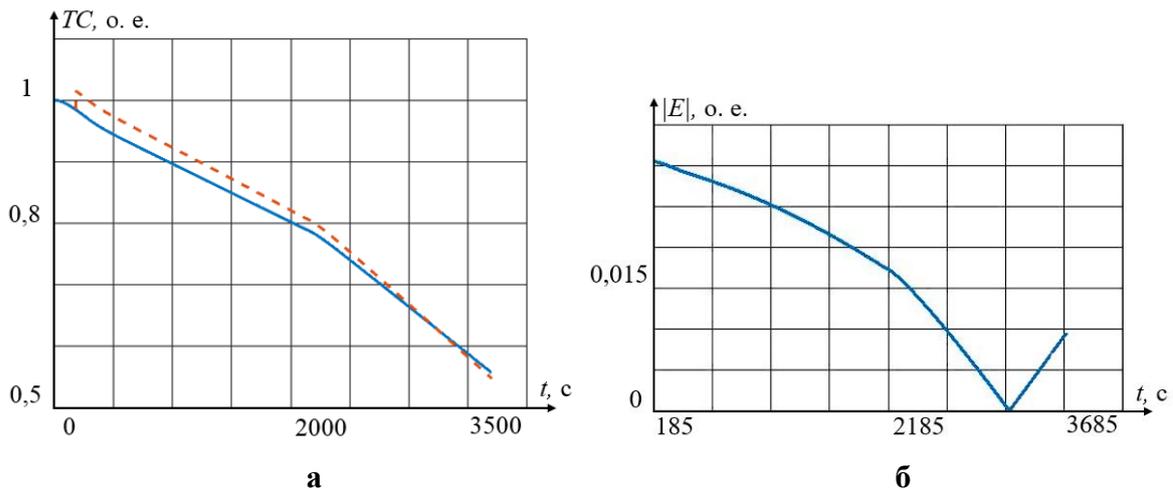


Рис. 4.17. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

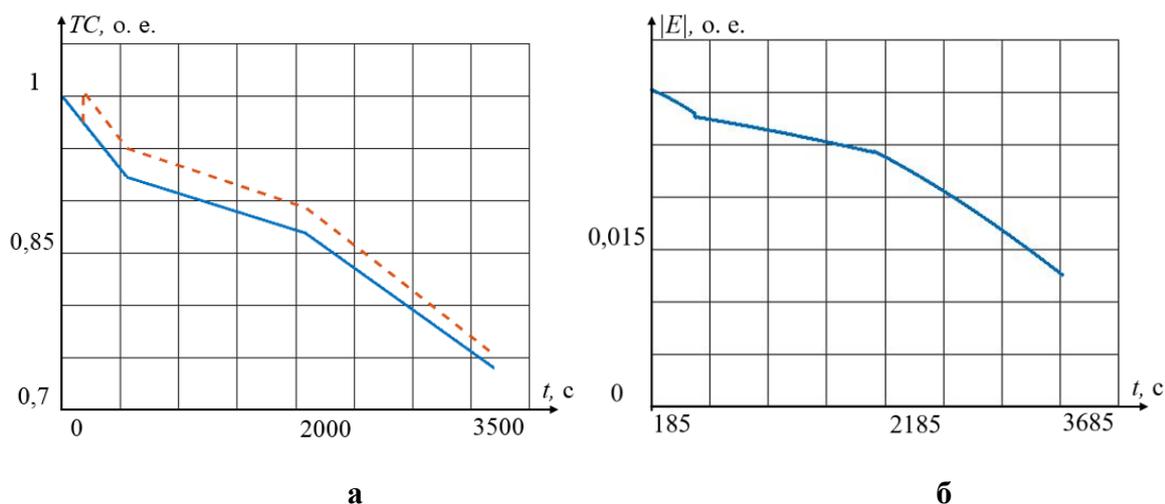


Рис. 4.18. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния преобразователя частоты: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

Графики прогнозов оценок технического состояния и ошибок прогнозирования для оборудования, входящего в состав дизель-генераторной установки и канала преобразования солнечной энергии приводятся в приложении В. Максимальные величины ошибок прогнозирования оценок технического состояния составили: для ветровой турбины 0,0304, для синхронного генератора в канале преобразования энергии ветра 0,03, для преобразователя частоты в канале преобразования энергии ветра 0,0305, для дизельного двигателя 0,0298, для синхронного генератора в составе дизель-генераторной установки 0,0294, для преобразователя частоты в составе дизель-генераторной установки 0,0305, для фотоэлектрических преобразователей 0,0303, для инвертора напряжения 0,0304.

Рассмотрим работу системы при прогнозировании количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом проводимых технических обслуживаний при помощи графика, аналогичного использованному для системы прогнозирования на основе ANFIS в разделе 4.1. На рис. 4.19 представлены графики исходной и

спрогнозированной количественных оценок технического состояния синхронного генератора, а также график ошибки прогнозирования. Величина горизонта прогнозирования была принята равной 60 часам. Величина среднеквадратической ошибки прогнозирования равна 0,115, величина максимальной ошибки прогнозирования равна 0,527.

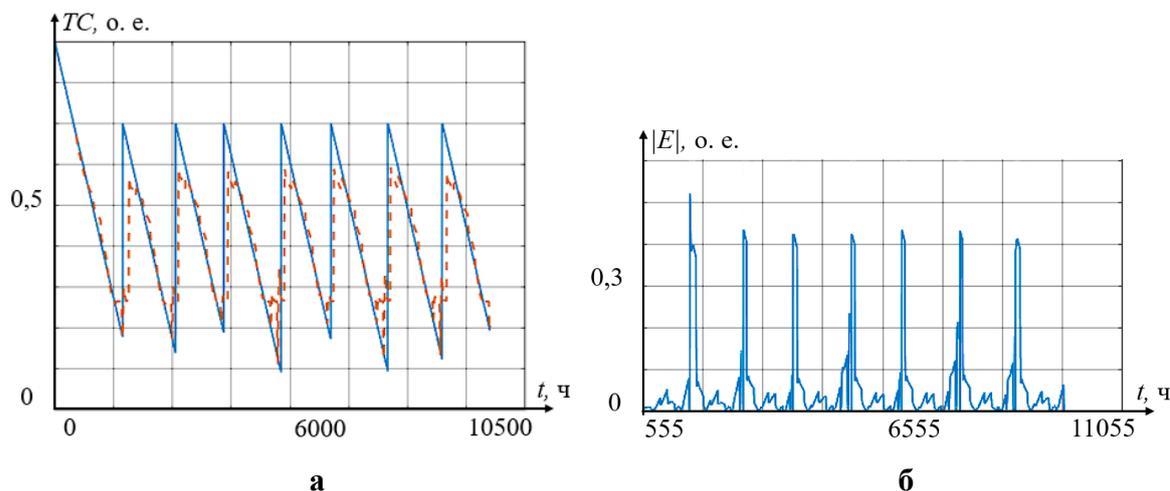


Рис. 4.19. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом технических обслуживаний: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния синхронного генератора; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора

Сравним результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом технических обслуживаний системами на основе LSTM и ANFIS, рис. 4.20. В данном примере системы продемонстрировали сходные величины среднеквадратической и максимальной ошибок прогнозирования (ANFIS: среднеквадратическая ошибка прогнозирования равна 0,111, максимальная ошибка прогнозирования равна 0,521; LSTM: среднеквадратическая ошибка прогнозирования равна 0,115, максимальная ошибка прогнозирования равна 0,527). При этом видно, что системы более точно воспроизводят различные участки исходного графика, поэтому использование обеих систем одновременно позволяет

сформировать вариативный прогноз, уменьшающий вероятность принятия неверных управленческих решений при формировании одной из систем ошибочного прогноза.

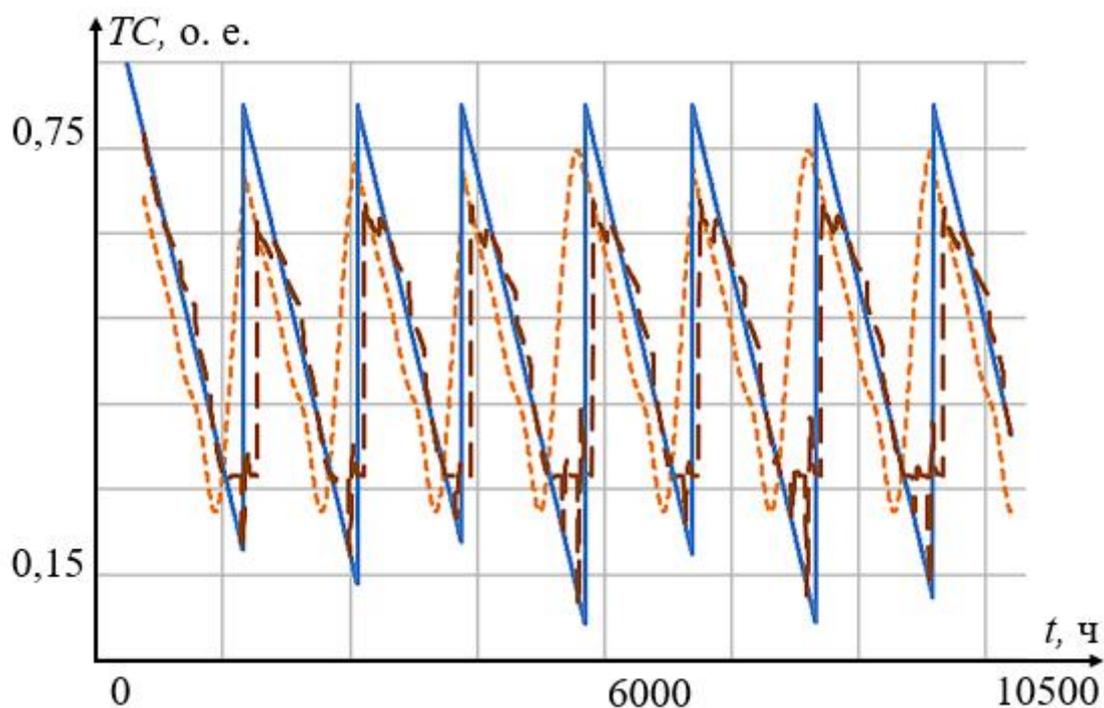


Рис. 4.20. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора с учетом технических обслуживаний: график исходной KOTC (сплошная линия), график KOTC, спрогнозированный системой на основе LSTM (штриховая линия), график KOTC, спрогнозированный системой на основе ANFIS (пунктирная линия)

Выводы по четвертой главе:

1. В работе предложен способ выработки вариативного прогноза количественной оценки технического состояния оборудования, входящего в состав комбинированной электростанции (фотоэлектрических преобразователей, синхронных генераторов, ветровой турбины, дизельного двигателя, преобразователей напряжения) с использованием аппарата нейро-нечетких сетей и сетей глубокого обучения для.
2. Построена имитационная модель системы прогнозирования в среде Matlab, позволяющая осуществлять прогнозирование оценки

технического состояния оборудования на основе данных имитационного моделирования, а также экспериментальных данных, полученных при работе реальных образцов оборудования.

3. Построенная система прогнозирования продемонстрировала адекватную работу на заданном горизонте прогнозирования. Полученные среднеквадратические величины ошибок прогнозирования в различных условиях не превысили 0,111 (11,1%) для блока прогнозирования на основе ANFIS, и 0,115 (11,5%) для блока прогнозирования на основе LSTM. При наличии значительных изломов на графике прогнозируемой величины максимальные величины ошибок прогнозирования составили 0,521 (52,1%) для блока прогнозирования на основе ANFIS, и 0,527 (52,7%) для блока прогнозирования на основе LSTM.

4. Блоки прогнозирования на основе LSTM и ANFIS демонстрируют изменяющуюся точность при прогнозировании процессов с различной динамикой протекания, поэтому совместное использование данных блоков, построенных с применением различных принципов, позволяет сформировать вариативный прогноз и компенсировать недостатки нейронных сетей каждого типа, что уменьшает вероятность принятия оператором неверных управленческих решений в случае возникновения ошибочных результатов прогноза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана имитационная модель комбинированной электростанции, позволяющая учитывать влияние физических величин, являющихся основными диагностическими признаками электротехнического оборудования, для формирования исходных данных для разработки и тестирования систем мониторинга. При работе имитационной модели в номинальном режиме действующее значение линейного напряжения нагрузки составило 378 - 381 В, частота 50 Гц. При работе имитационной модели с увеличением величины нагрузки до 150% от номинальной было зафиксировано уменьшение действующего значения линейного напряжения нагрузки до 332 В. Разработанная модель может быть использована при проектировании объектов возобновляемой энергетики, проектировании и проверке алгоритмов автоматизированной системы управления и мониторинга технического состояния оборудования.

2. Разработаны алгоритмы диагностирования оборудования электротехнического комплекса на основе теории графов, отличающиеся от известных уменьшением числа проверок, необходимых для поиска неисправного элемента, без уменьшения требуемой глубины диагностирования, благодаря распознаванию и классификации неполных последовательностей результатов проверок при помощи нейронной сети, позволяющие осуществлять поиск единичных неисправностей объекта диагностирования. В рассмотренных тестовых наборах проверок точность прогнозирования неисправного элемента составила 84,1% для преобразователя энергии ветра, 92,6% для преобразователя солнечной энергии, 81% для дизель-генераторной установки. Среднее арифметическое значение процентной доли сокращенных элементов среди

рассмотренных наборов последовательностей проверок составило 29,3% для преобразователя энергии ветра, 27,4% для преобразователя солнечной энергии, 30,4% для дизель-генераторной установки. Следует отметить, что предлагаемый способ сокращения количества проверок не может обеспечить абсолютную точность, поэтому его применение рекомендуется в качестве вспомогательного способа для формирования предварительного заключения, и/или в тех случаях, когда заключение требуется сформировать в минимальный срок, при этом допускается компромисс между точностью и временем диагностирования.

3. Разработаны системы количественной оценки технического состояния оборудования комбинированной электростанции с использованием аппарата нечеткой логики, отличающиеся от известных систем способностью к учету необратимых процессов ухудшения технического состояния оборудования, позволяющие проводить ранжирование и прогнозирование технического состояния оборудования, а также оптимизировать периодичность технического обслуживания и ремонта. На основе получаемых количественных оценок технического состояния может быть сформирована шкала с указанием необходимых мероприятий, к примеру: 1-0,67 – техническое обслуживание не требуется, 0,66-0,34 – техническое обслуживание необходимо провести в запланированные сроки, 0,33-0 необходимо незамедлительное техническое обслуживание. Разработаны системы прогнозирования количественной оценки технического состояния оборудования с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы вывода и сетей с долгой кратковременной памятью, позволяющие уменьшить вероятность внезапного выхода оборудования из строя и принять меры по минимизации возможных негативных последствий, а также снизить вероятность неверных управленческих решений в случае возникновения ошибочных результатов прогнозирования. В рассмотренных случаях

величины среднеквадратических ошибок прогнозирования не превысили 0,111 (11,1%) для блока прогнозирования на основе ANFIS, и 0,115 (11,5%) для блока прогнозирования на основе LSTM.

4. В рамках продолжения данной работы планируется разработка физической модели комбинированной электростанции для проверки работоспособности систем диагностики и количественной оценки технического состояния при работе с реальными образцами оборудования.

Список принятых сокращений

- ВТ – ветровая турбина
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания.
- ДД – дизельный двигатель
- ДПЧ – двухзвенный преобразователь частоты со звеном постоянного тока.
- КПД – коэффициент полезного действия.
- КОТС – количественная оценка технического состояния.
- КОУР – количественная оценка условий работы.
- МПЧ – матричный преобразователь частоты.
- НПЧ – преобразователь частоты с непосредственной связью.
- ПН – преобразователь напряжения
- ПЧ – преобразователь частоты
- СГ – синхронный генератор.
- ФЭП, PV – фотоэлектрический преобразователь
- АС/АС – переменный ток / переменный ток.
- АС/DC – переменный ток / постоянный ток.
- ANFIS – адаптивная нейро-нечеткая система вывода
- DC/DC – постоянный ток / постоянный ток.
- LSTM – долгая краткосрочная память

Список использованных источников

1. Волчков, Ю. Д. Электроснабжение удаленных от центров питания потребителей / Ю. Д. Волчков, В. Ю. Босердт // Агротехника и энергообеспечение. - 2018. - №1 (18). – с. 20-25.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24.03.2022 № 594-р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203240017/>.
3. Постановление Правительства РФ от 29 августа 2020 г. N 1298 «О вопросах стимулирования использования возобновляемых источников энергии, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/74587394/>.
4. Renewable energy directive - European Union. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.
5. RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Aug/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2021.pdf.
6. Renewable capacity highlights 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BEC5AA A2050B011ECE255B3BC7
7. Lumb, M. GaSb-Based Solar Cells for Full Solar Spectrum Energy Harvesting / M. Lumb et al. // Advanced Energy Materials. – 2017. - №7. - 10.1002/aenm.201700345.

8. Sunny superpower: solar cells close in on 50% efficiency. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physicsworld.com/a/sunny-superpower-solar-cells-close-in-on-50-efficiency/>.

9. Woods Hole Oceanographic Institution - Solar Radiation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://whoi.edu/>

10. Глобальный атлас ветров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalwindatlas.info/>

11. Попель, О.С. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.

12. Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России» (ГИС ВИЭР). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisre.ru/>.

13. Единая энергетическая система России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ups2022/>

14. Россия увеличит долю возобновляемых источников энергии в 10 раз. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/11787295>.

15. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников – Томск: Изд-во Томского Политехнического университета, 2015. – 128 с.

16. Левин, М. И. Автоматизация дизель–генераторных установок. – М.– Л.: Машгиз, 1963. – 517 с.

17. Левин, М. И. Автоматизация судовых дизельных установок. – Л.: Судостроение, 1969. - 327 с.

18. Хватов, О. С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения:

монография / О. С. Хватов, А. Б. Дарьенков, И. С. Самоявчев, И. С. Поляков. - Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016 . - 172 с.

19. Хватов, О.С. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник Ивановского государственного технического университета. - 2010. -№ 2. - с. 53-56.

20. Дарьенков, А.Б. Экспериментальное исследование электростанции на основе ДВС переменной частоты вращения / IX межд. конф. по автоматизированному электроприводу, Пермь. - 2016. - С. 29-33.

21. Hamilton, J. The potential of variable speed diesel application in increasing renewable energy source penetration / J. Hamilton, M. Negnevitsky, X. Wang // Energy Procedia. – 2019. - №160. – pp. 558-565.

22. Van Maerhem, T. Variable speed genset with full rated power converter using readily available industrial products / T. Van Maerhem et al. // 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta. – 2014. – pp. 1-7.

23. Wang, D. H. Modeling of stand-alone variable speed diesel generator using doubly-fed induction generator / D. H. Wang, C. V. Nayar, C. Wang // The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei. – 2010. – pp. 1-6.

24. Хватов, О.С. Дизель-генераторная установка переменной частоты вращения / О.С. Хватов, И. А. Тарпанов, А. Б. Дарьенков. // Научные проблемы водного транспорта. – 2014. - №38. - с. 205-212.

25. Khan, S. I. Some Improved Forced Commutated Cycloconverters Structure / S. I. Khan, P. D. Ziogas, M. H. Rashid // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1985. - No 5. - pp. 1242-1253.

26. Khan, S. I. Forced Commutated Cycloconverters for High-Frequency Link Applications / S. I. Khan, P. D. Ziogas, M. H. Rashid // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1987. - No 4. - pp. 661-672.

27. Casadei, G. Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms / G. Casadei et al. // Proceedings of IEEEPE' 93. - 1993. - № 7. - pp. 170-175.

28. Дарьенков, А. Б. Сравнительное имитационное моделирование работы матричного преобразователя частоты со скалярным и пространственно-векторным алгоритмами управления / А. Б. Дарьенков, Е. А. Чернов, Д. М. Кочеганов, Т. Х. Абузьяров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.– 2018. - №4(123). – с. 89-98.

29. Дарьенков, А. Б. Экспериментальное исследование макета матричного преобразователя частоты / А. Б. Дарьенков, О. С. Хватов, Д. А. Корнев, И. А. Варыгин, И. Ф. Трапезников // Актуальные проблемы электроэнергетики: XXXI рег. науч.-техн. конф., Н.Новгород. - 2012. – С. 44-49.

30. Кочеганов, Д. М. Имитационная модель комбинированной электростанции на основе матричного преобразователя частоты. / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков, А. Б. Дарьенков, А. С. Стеклов // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020. Санкт-Петербург. - 2021. - С. 87-94.

31. Кочеганов, Д. М. Имитационное моделирование дизельного генератора в составе ветро-солнечно-дизельной электростанции с матричным преобразователем частоты / Д. М. Кочеганов, Т. Х. Абузьяров // Будущее технической науки: тез.докл. XVI Междунар. Молодеж. Научно-техн.конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – С. 148-149.

32. Кочеганов, Д. М. Сравнительное имитационное моделирование дизельных генерирующих установок переменной частоты вращения с матричным преобразователем частоты и преобразователем частоты со звеном постоянного тока / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков, Т. Х.

Абузьяров // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-техн. конф. –2019. - с. 91-92.

33. Дарьенков, А.Б. Имитационная модель матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, Д.А. Корнев, О.С. Хватов // Будущее технической науки: X межд. молодежной науч.-техн. конф., Н. Новгород. - 2011. – С.89.

34. Дарьенков, А.Б., Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала на базе матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, Н.М. Вукерт // Будущее технической науки: IX межд. молодежная науч.- техн. конф., Н. Новгород. - 2010. – С.60-61.

35. Дмитриев, С. М. Управление генерирующим комплексом модульной электростанции с использованием возобновляемых энергоресурсов / С. М. Дмитриев, А. Б. Дарьенков, А. С. Плехов // Труды X международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Материалы докладов конференции. - 2018. - с. 145-150.

36. Байков, А.И. Имитационное моделирование ветро-дизельной электростанции / А. И. Байков, А. Б. Дарьенков, Е. Н. Соснина // Электротехника. - 2018. - №3. - с. 26-33.

37. Дарьенков, А.Б. Автономная ветро-дизель-энергетическая установка / А.Б. Дарьенков, А.В. Серебряков, А.Б. Васенин // Будущее технической науки: IX межд. молодежная науч.-техн. конф., Н. Новгород. - 2010. – С.63- 64.

38. Uğurlu, A. A case study of PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system / A. Uğurlu, C. Gokcol // Journal of Energy Systems. – 2017. -№1(4). – pp. 138-147. - DOI: 10.30521/jes.348335.

39. Linn, S. Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System with Battery Storage for Rural Electrification. / S. Linn, A. Ze Ya // International Journal of Scientific Engineering and Technology Research. – 2014. - №3. – pp. 2172-2176.

40. Грибков, С. В. Ветро-солнечно-дизельные комплексы электроснабжения малых мощностей как основа развития ВИЭ в России // Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». Под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля. – 2016. – С. 124-128.

41. Buonmano, A. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment/ A. Buonmano et al.// Energy. – 2018. - №155. – pp. 174-189.

42. Дарьенков, А. Б. Имитационная модель гибридного генераторного комплекса с дифференцированием нагрузки / А. Б. Дарьенков, А. В. Серебряков, Д. М. Кочеганов // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. - 2019. - С. 102-106.

43. Кочеганов, Д. М. Структура энергоэффективной ветро-дизель энергетической установки переменной скорости вращения / Д. М. Кочеганов, А. С. Стеклов, А. В. Серебряков // Интеллектуальная электротехника. - 2019. - № 2. - С. 42-52.

44. Кочеганов, Д. М. Дифференцирование нагрузки в автономных генераторных комплексах на основе альтернативных источников энергии / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // Интеллектуальная электротехника. - 2018. - №4. - С. 63 – 71.

45. Kochegarov, D. M. Combined electric power plant simulation model / D.M. Kochegarov, A. V. Serebryakov, A. B. Dar'yenkov, A. S. Steklov // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. - 2020. - № 4. - pp. 70-76.

46. Дарьенков, А. Б. Физическая модель электротехнического комплекса гибридной электроустановки / А. Б. Дарьенков, Е. В. Бычков, Д. А. Комраков, Т. Х. Абузяров, Д. М. Кочеганов // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. - 2017. - С. 39-42.

47. Martinez, N. Computer Model for a Wind–Diesel Hybrid System with Compressed Air Energy Storage / N. Martinez. et al. // Energies. – 2019. - №12. - 3542. 10.3390/en12183542.

48. Lodin, O. Modeling and Simulation of Wind Solar Hybrid System using Matlab/Simulink. / O. Lodin et al. // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engeneering. - 2019. -№ 8. - pp. 218-224. - 10.35940/ijitee.I1034.0789S19.

49. Islam, Md. A. Power management strategy for solar stand-alone hybrid energy system. / Md. A. Islam et al. // International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering. - 2014. - № 8. – pp. 831-835.

50. Shaqour, A. Power control and simulation of a building integrated stand-alone hybrid PV-wind-battery system in Kasuga City, Japan / A. Shaqour et al. //Energy Reports. - 2020. - № 6 - pp. 1528-1544.

51. Дарьенков, А. Б. Применение математического моделирования для анализа функционирования ветроканала автономной гибридной электростанции / А.Б. Дарьенков, Д. М. Кочеганов, А. И. Байков, Т. Х. Абузьяров // Актуальные проблемы электроэнергетики: III Всероссийская науч.-техн. конф., г. Н.Новгород. - 2017. – С. 43-48.

52. Implement PV array modules. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>

53. Wind Turbine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/windturbine.html>

54. Synchronous Machine PU Standard. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/synchronousmachinepustandard.html>

55. Generic internal combustion engine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/genericengine.html>
56. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
57. Клюев, В. В. Технические средства диагностирования: Справочник. // М.: Машиностроение, 1989. – с. 672.
58. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.
59. Осипов, О. И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов./ О. И. Осипов, Ю. С. Усынин // М.: Энергоатомиздат, 1991. – с. 160.
60. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики : (Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза). // М.: Энергия, 1981. – с. 320.
61. Мозгалевский, А. В. Техническая диагностика (Непрерывные объекты). // М.: Высшая школа, 1975. – с. 207.
62. Кудрицкий, В. Д. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры. // М.: Советское радио, 1977. – с. 256.
63. Глазунов, Л. П. Проектирование технических систем диагностирования. // Л.: Энергоатомиздат, 1983. – с. 168.
64. Матюшечкин, Н. А. Волоконно-оптический датчик температуры для систем тепловой защиты электрооборудования / Н. А. Матюшечкин, Ю. Г. Белов, А. А. Болонина, Д. М. Кочеганов, Т. Х. Абузьяров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.– 2018. - №1(120). – с. 122-129.
65. Кочеганов, Д. М. Модифицированный алгоритм диагностирования оборудования ветроэнергетической установки / Д. М. Кочеганов, А. С. Стеклов, А. В. Серебряков // Известия вузов. Электромеханика. - 2023. - № 66(4). - С. 173-181. - doi.org/10.17213/0136-3360-2023-4-173-181.
66. Yang, C. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model / C. Yang, J. Liu, Y. Zeng, G. Xie // Renewable Energy. - 2019. - № 133. pp. 433-441. - doi: 10.1016/j.renene.2018.10.062.

67. Gangsar, P. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review / P. Gangsar, R. Tiwari // *Mechanical Systems and Signal Processing*. - 2020. - № 144. - doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.

68. Купцов, В. В. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы / В. В. Купцов, А. С. Горзунов, А. С. Сарваров, (2009). // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2009. – №34 (167). – с. 60-67.

69. Петушков, М. Ю. Нахождение неисправностей синхронных двигателей с постоянными магнитами по линейному току / М. Ю. Петушков, С. С. Холодилов // *Интеллектуальная Электротехника*. – 2020. – № 4 (12). – с. 52-60.

70. Сарваров, А.С. Токовая диагностика как метод контроля технического состояния асинхронных двигателей / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.В. Купцов // *Инновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях*, Март 23-26. – 2010. – с. 82-86.

71. Саушев, А. В. Метод оценки состояния электротехнических систем на стадии эксплуатации / А. В. Саушев // *Материалы XI Международной науч.-практ. конференции. «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий»*. – М.: НИУ ВШЭ. – 2014. – с. 489 – 491.

72. Саушев, А. В. Оценка состояния электротехнических систем на основе информации о границе области работоспособности. / А. В. Саушев // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. – 2016. – № 1. – с. 66-69.

73. Choudhary, A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review / A. Choudhary et al. // Archives of Computational Methods in Engineering. - 2019. - № 26. - pp. 1221–1238. - doi: 10.1007/s11831-018-9286-z.

74. Байдюк, М. А. Оценка технического состояния и надежности электрических машин/ М. А. Байдюк, Г. В. Комарова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2019. - № 3. - с. 78-84.

75. Левин, В. М. Экспресс-оценка состояния силовых трансформаторов для обеспечения эксплуатационной надежности / В. М. Левин, Н. Н. Керимкулов // Системы. Методы. Технологии. - 2016. - № 4(32). - с. 101-109. - doi: 10.18324/2077-5415-2016-4-101-109.

76. Shi, M. Condition Monitoring of PWM Converter Based on Multiple Support Vector Machine Algorithm / M. Shi et al. // 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). - 2019. - pp. 264-268. - doi: 10.1109/PEDG.2019.8807567.

77. Храмшин, В. Р. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В. Р. Храмшин, К. Э. Одинцов, А. Р. Губайдуллин, О. И. Карандаева, Ю. Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2014. - № 14 (2). – с. 68-79.

78. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26 июля 2017 года № 676 Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003>

79. Назарычев, А.Н. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей / А. Н.

Назарычев, Э. В. Новомлинский, Д. А. Андреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы Международного научного семинара им. Ю.Н.Руденко. - 2016. - с. 171-179.

80. Назарычев, А.Н., Андреев, Д.А. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. - 2019. - Том 1. - Выпуск 70. - с. 316-326.

81. Оклея, П.И. Методика оценки интегрального технического состояния оборудования тепловых электростанций // Transport business in Russia. - 2015. - № 6. - с. 72-76.

82. Давиденко, И.В. Индекс технического состояния: улучшение методики расчета на основе опыта работы ЭДИС «Альбатрос» // XXIII Международная научно-техническая и практическая конференция «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики». - 2016.

83. Попов, Г.В. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации / Г.В. Попов, Е.Б. Игнатъев // «Вестник ИГЭУ». 2014. № 4. С. 1-8.

84. Серебряков, А. В. Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дисс. канд. техн. наук 05.09.03 ИГЭУ/ А. В. Серебряков. – Иваново, 2013. – 173 с.

85. Саушев, А. В. Области работоспособности электротехнических систем. // СПб.: Политехника, 2013. - 412 с.

86. Стеклов, А. С. Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования / А. С. Стеклов, В. Г. Титов, А. В. Серебряков // Научный альманах. - 2015. - № 10-3 (12). - С. 247–250.

87. Серебряков, А. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов / А. В. Серебряков, А. С. Стеклов, В. Г. Титов // Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева. - 2018. - 174 с.

88. Серебряков, А. В. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок / А. В. Серебряков, О. В. Крюков, А. Б. Васенин // IX МНТК ПАЭП-12, (секц. 5 “Диагностика электромеханики”). - 2012. – С.549-552.

89. Стеклов, А. С. Новый способ диагностирования технического состояния судовых электроэнергетических установок / А. С. Стеклов, В. Г. Титов, А. В. Серебряков // Материалы IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS' 2016). С. 491-495.

90. Серебряков, А. В. Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей. / А. В. Серебряков, А. С. Стеклов, В. Г. Титов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2017. - № 2. - С. 82 - 88.

91. Стеклов, А.С. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А. С. Стеклов, В. Г. Титов, А. В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. - 2016. - № 1. - С. 97-104.

92. Стеклов, А.С. Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора / А. С. Стеклов, В. Г. Титов, А. В. Серебряков //Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2016. - № 1. - С. 60-64.

93. Стеклов, А.С. Нейронечеткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических

установок. // Электротехнические системы и комплексы. - 2016. - № 3 (32).
- С. 39-43.

94. Стеклов, А.С. Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем. / А. С. Стеклов, В. Г. Титов, А. В. Серебряков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2016. - № 5. - С. 21-26.

95. Стеклов, А.С. Разработка модели экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния судовых электроэнергетических систем. / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. - 2016. - № 2. - С. 24-27.

96. Стеклов, А.С. Нечёткий подход к контролю работоспособности судовых преобразователей частоты. / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов, В. В. Кондратьев // Актуальные проблемы электроэнергетики сборник научно-технических статей. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. - 2016. - С. 27-32.

97. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets // *Information and Control*. – 1965. - №3. – pp. 338–353.

98. Заде, Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л. А. Заде. – М.: Знание, 1974. – 64 с.

99. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. I // *Information Sciences* 8. - 1975. – № 3. - pp. 199–249. - doi/10.1016/0020-0255(75)90036-5

100. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. II // *Information Sciences* 8. - 1975. – № 4 (1975): pp. 301–357. - doi/10.1016/0020-0255(75)90046-8

101. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. III // *Information Sciences* 9. - 1975. – № 1 (1975): pp. 43–80. - doi /10.1016/0020-0255(75)90017-1

102. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М: Мир, 1976. – 165 с.
103. Mamdani, E.H. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller / E.H. Mamdani, S. Assilian. // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1975. - № 1. - pp. 1–13. - [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
104. Sugeno, M. *Industrial Applications of Fuzzy Control*. // North-Holland. – 1985. – p. 269.
105. Sugeno, M. Fuzzy decision-making problems // *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*. – 1975. - №6. – pp. 709-714.
106. Кочеганов, Д. М. Применение нечеткой логики для оценки качества функционирования фотоэлектрических панелей / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // *Фёдоровские чтения - 2019*. Под общей редакцией Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. - 2019. - С. 300-304.
107. Кочеганов, Д. М. Применение аппарата нечеткой логики для оценки качества функционирования синхронного генератора / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019)*. сборник трудов. - 2019. - С. 186-189.
108. Кочеганов, Д. М. Система мониторинга технического состояния ветроэнергетической установки / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // *Актуальные проблемы электроэнергетики. материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции, посвящается 100-летию плана ГОЭЛРО*. - 2020. - С. 90-94.
109. Кочеганов, Д. М. Система оценки качества функционирования преобразователя частоты с использованием нечеткой логики / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // *Интеллектуальная электротехника*. - 2019. - № 4. - С. 27-34.

110. Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://person.dibris.unige.it/masulli-francesco/lectures/ML-CI/lectures/MATLAB%20fuzzy%20toolbox.pdf>.
111. Fuzzy Logic Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy>.
112. Jang, J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1993. - № 3. - pp. 665-685. - doi: 10.1109/21.256541.
113. Синюков, А.В. Нечеткие технологии в системах управления подъемно-транспортными механизмами / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова, Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, В.Н. Мещеряков, S. Valtchev // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2023. – № 25(1). – с. 105-117. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117>.
114. Благодаров, Д. А., Костин, А. А., Сафонов, Ю. М., & Тарасов, А. С. (2013). Интеллектуальные методы управления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / Д. А. Благодаров, А. А. Костин, Ю. М. Сафонов, А. С. Тарасов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 6. – с. 70-73.
115. Serebryakov, A. Neural Network Model to Diagnose Stand-alone Electric Power System / A. Serebryakov, A. Steklov, D. Kocheganov, // *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. – 2021. - pp. 1091-1093. - doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632229.
116. Tarno, T. Modelling of Cayenne Production Data in Central Java Using ANFIS /T. Tarno, S. Suparti, D. Ispriyanti // *Model Assisted Statistics and Applications*. – 2018. - № 13(1). - pp 45-52.
117. Kocheganov, D. Wind-Solar Electric Power System Simulation Model with Equipment Condition Assessment System / D. Kocheganov, A.

Serebryakov, A. Steklov // *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. – 2020. - pp. 923-928. - doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280613.

118. Кочеганов, Д. М. Имитационная модель солнечно-ветряной электростанции с нейро-нечеткой системой прогнозирования технического состояния / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков, А. С. Стеклов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2021. - № 2(51). – С. 68-75.

119. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation journal*. — 1997. — № 8. — pp. 1735—1780. — doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735. — PMID 9377276.

120. Muzaffar, S. Short-Term Load Forecasts Using LSTM Networks / S. Muzaffar, A. Afshari // *Energy Procedia*. – 2019. - № 158. - pp. 2922-2927. - doi/10.1016/j.egypro.2019.01.952.

121. Mateus, B. C. Comparing LSTM and GRU Models to Predict the Condition of a Pulp Paper Press / B. C. Mateus et al. // *Energies*. – 2021. - № 14, 6958. - doi /10.3390/en14216958.

122. Aydın, O. Using LSTM networks to predict engine condition on large scale data processing framework / O. Aydın, S. Guldamlasioglu // *2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*. – 2017. - DOI:10.1109/ICEEE2.2017.7935834.

123. Tang, L. Research on Prognosis for Engines by LSTM Deep Learning Method / L. Tang et al. // *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao)*. – 2019. - pp. 1-8. - doi: 10.1109/PHM-Qingdao46334.2019.8942976.

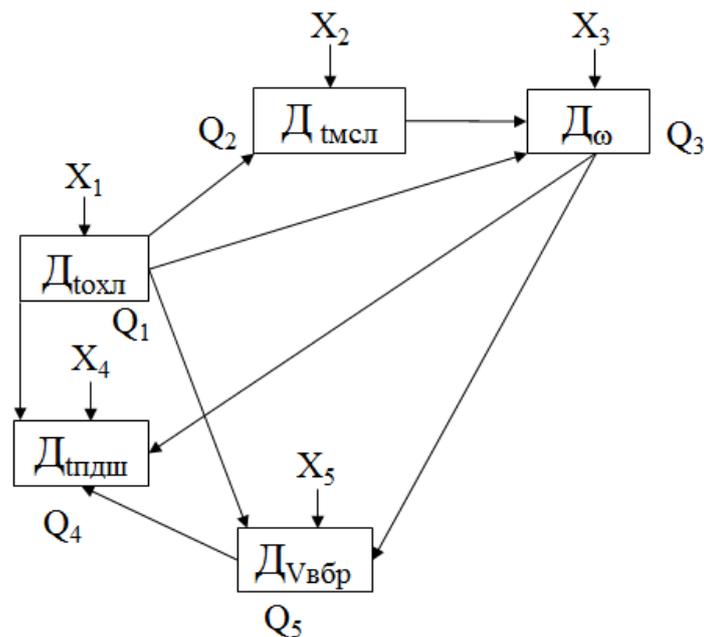
124. Schmidhuber, J. Training Recurrent Networks by Evolino / J. Schmidhuber et al. // *Neural Computation*. – 2007. - № 3 (19) - pp. 757-779. - doi: 10.1162/neco.2007.19.3.757.

125. Кочеганов, Д.М. Количественная оценка технического состояния оборудования солнечной электростанции / Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков, А.С. Стеклов // Интеллектуальная Электротехника. – 2023. – № 3. – С. 38-50. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_38.

Приложение А

Таблица А. 1 - Взаимовлияние диагностических признаков дизельного двигателя

Параметры	Температура охлаждающей жидкости	Температура масла	Частота вращения вала	Температура подшипников	Скорость вибрации корпуса
Температура охлаждающей жидкости	○	●	●	●	●
Температура масла	●	○	●	○	○
Частота вращения вала	●	●	○	●	●
Температура подшипников	●	○	●	○	●
Скорость вибрации корпуса	●	○	●	●	○



$D_{тохл}$ – датчик температуры охлаждающей жидкости; $D_{тмсл}$ – датчик температуры масла; D_{ω} – датчик частоты вращения вала; $D_{тпдш}$ – датчик температуры подшипников; $D_{\nuвбр}$ – датчик скорости вибрации корпуса;

Рис. А. 1. Логическая модель диагностирования дизельного двигателя

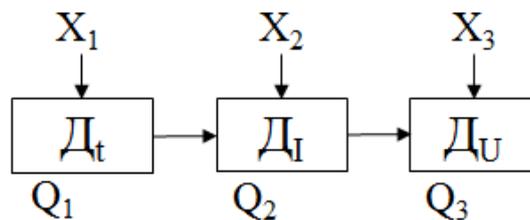
$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = Q_1 \wedge X_1 \\ Z_2 = Q_2 \wedge X_2 \wedge Z_1 \\ Z_3 = Q_3 \wedge X_3 \wedge Z_1 \wedge Z_2 \\ Z_4 = Q_4 \wedge X_4 \wedge Z_1 \wedge Z_3 \wedge Z_5 \\ Z_5 = Q_5 \wedge X_5 \wedge Z_1 \wedge Z_3 \end{array} \right. , (A.1)$$

Таблица А. 2 – Таблица функций неисправностей дизельного двигателя

Сигнал	Элемент схемы				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Z1	0	1	1	1	1
Z2	0	0	1	1	1
Z3	0	0	0	1	1
Z4	0	0	0	0	0
Z5	0	0	0	1	0

Таблица А. 3 - Взаимовлияние диагностических признаков фотоэлектрических преобразователей

Параметры	Температура ФЭП	Ток ФЭП	Напряжение ФЭП
Температура ФЭП	○	●	
Ток ФЭП	●	○	●
Напряжение ФЭП	○	●	○



D_t – датчик температуры ФЭП; D_I – датчик тока ФЭП; D_U – датчик напряжения ФЭП

Рис. А. 2. Логическая модель диагностирования фотоэлектрических преобразователей

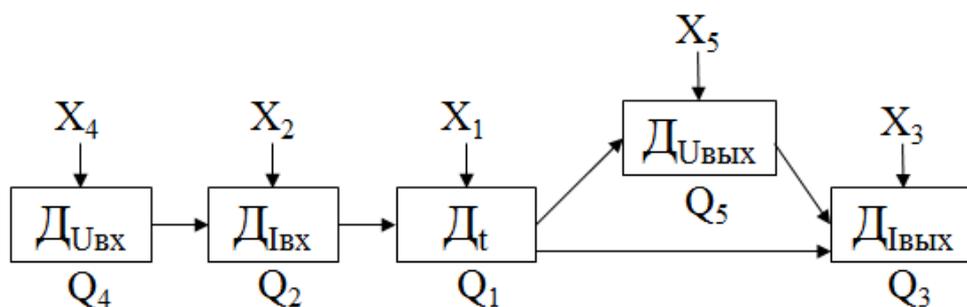
$$\begin{cases} Z_1 = Q_1 \wedge X_1 \\ Z_2 = Q_2 \wedge X_2 \wedge Z_1, \\ Z_3 = Q_3 \wedge X_3 \wedge Z_2 \end{cases} \quad (A.2)$$

Таблица А. 4 – Таблица функций неисправностей фотоэлектрических преобразователей

Сигнал	Элемент схемы		
	Q1	Q2	Q3
Z1	0	1	1
Z2	0	0	1
Z3	1	0	0

Таблица А. 5 - Взаимовлияние диагностических признаков преобразователей напряжения

Параметры	Температура ключей	Входной ток	Выходной ток	Входное напряжение	Выходное напряжение
Температура ключей	○	○	●	●	●
Входной ток	○	○	●	●	○
Выходной ток	●	●	○	○	●
Входное напряжение	●	●	○	○	○
Выходное напряжение	●	○	●	○	○



D_t – датчик температуры ФЭП; $D_{I_{ВХ}}$ – датчики входных токов; $D_{U_{ВХ}}$ – датчики входных напряжений $D_{I_{ВЫХ}}$ – датчики выходных токов; $D_{U_{ВЫХ}}$ – датчики выходных напряжений

Рис. А. 3. Логическая модель диагностирования преобразователей напряжения

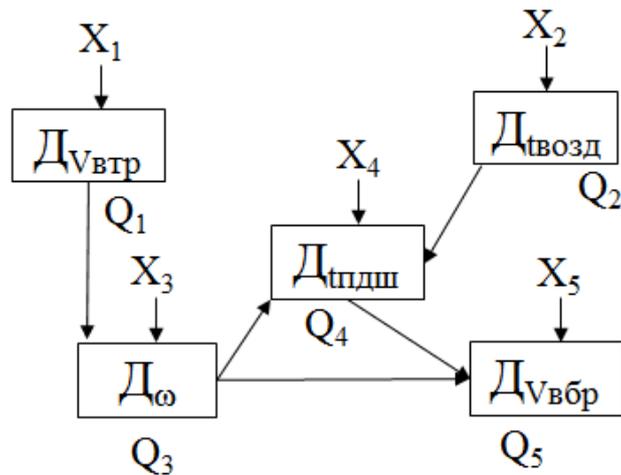
$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = Q_1 \wedge X_1 \wedge Z_2 \\ Z_2 = Q_2 \wedge X_2 \wedge Z_4 \\ Z_3 = Q_3 \wedge X_3 \wedge Z_1 \wedge Z_5, \\ Z_4 = Q_4 \wedge X_4 \\ Z_5 = Q_5 \wedge X_5 \wedge Z_1 \end{array} \right. \quad (A.3)$$

Таблица А. 6 – Таблица функций неисправностей преобразователей напряжения

Сигнал	Элемент схемы				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Z1	0	0	1	0	1
Z2	1	0	1	0	1
Z3	0	0	0	0	0
Z4	1	1	1	0	1
Z5	0	0	1	0	0

Таблица А. 7 - Взаимовлияние диагностических признаков ветровой турбины

Параметры	Скорость ветра	Температура атмосферного воздуха	Частота вращения вала	Температура подшипников	Скорость вибрации корпуса
Скорость ветра	○	○	●	○	○
Температура атмосферного воздуха	○	○	○	●	○
Частота вращения вала	●	○	○	●	●
Температура подшипников	○	●	●	○	●
Скорость вибрации корпуса	○	○	●	●	○



$D_{\text{твозд}}$ – датчик температуры атмосферного воздуха; $D_{\text{VВТР}}$ – датчик скорости ветра; D_{ω} – датчик частоты вращения вала; $D_{\text{тпдш}}$ – датчик температуры подшипников; $D_{\text{VВбp}}$ – датчик скорости вибрации корпуса;
Рис. А. 4. Логическая модель диагностирования ветровой турбины

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = Q_1 \wedge X_1 \\ Z_2 = Q_2 \wedge X_2 \\ Z_3 = Q_3 \wedge X_3 \wedge Z_1 \\ Z_4 = Q_4 \wedge X_4 \wedge Z_2 \wedge Z_3 \\ Z_5 = Q_5 \wedge X_5 \wedge Z_3 \wedge Z_4 \end{array} \right. , \quad (\text{A.4})$$

Таблица А. 8 – Таблица функций неисправностей ветровой турбины

Сигнал	Элемент схемы				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Z1	0	1	1	1	1
Z2	1	0	1	1	1
Z3	0	1	0	1	1
Z4	0	0	0	0	1
Z5	0	0	0	0	0

Таблица А. 9 – Примеры последовательностей проверок для элемента Q 3.3

Фрагменты обучающей выборки				Верно распознанные неполные последовательности				
Q1.3	Q1.3	-	-	Q1.3	-	-	-	Q1.3
Q1.4	Q1.4	-	Q1.4	Q1.4	-	Q1.4	-	-
Q1.5	Q1.5	-	-	Q1.5	Q1.5	-	Q1.5	-
Q2.10	-	-	Q2.10	-	Q2.10	Q2.10	-	Q2.10
Q2.7	-	Q2.7	-	Q2.7	Q2.7	-	Q2.7	-
Q2.8	-	Q2.8	Q2.8	Q2.8	Q2.8	Q2.8	-	Q2.8
Q2.9	-	Q2.9	-	Q2.9	Q2.9	-	Q2.9	Q2.9
Q3.1	Q3.1	Q3.1	Q3.1	-	-	-	-	Q3.1
Q3.5	Q3.5	Q3.5	-	Q3.5	-	Q3.5	Q3.5	Q3.5
Q3.3	Q3.3	Q3.3	Q3.3	Q3.3	Q3.3	-	Q3.3	-

Неверно распознанные неполные последовательности	
Q1.3	
-	
-	
Q2.10	
-	
Q2.8	
-	
Q3.1	
-	
-	

Таблица А. 10 – Сокращение количества проверок в алгоритме диагностирования преобразователя энергии ветра

Номер последовательности																				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Длина полной последовательности																				
11	10	9	11	10	9	8	6	5	8	7	6	9	8	7	6	3	4	3	3	2
Количество верно классифицированных неполных последовательностей																				
5	5	5	5	3	5	6	5	6	6	6	1	6	6	3	6	6	6	4	5	6
Количество сокращенных элементов в верно классифицированных неполных последовательностях																				
4	3	4	4	4	4	3	2	1	2	3	3	4	3	3	2	0	0	1	0	0
2	4	3	2	5	5	2	2	2	2	3		4	3	2	1	1	0	1	1	0
5	5	4	3	4	3	4	1	1	3	2		3	3	2	2	1	1	0	1	0
4	5	2	4		2	3	3	2	2	2		5	2		1	0	1	0	0	0
3	4	3	3		3	2	1	2	2	3		4	4		1	1	0		0	0
						1		1	1	2		3	3		2	0	0			0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности																				
3,6	4,2	3,2	3,2	4,3	3,4	2,5	1,8	1,5	2,0	2,5	3,0	3,8	3,0	2,3	1,5	0,5	0,3	0,5	0,4	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности, %																				
32,7	42,0	35,6	29,1	43,3	37,8	31,3	30,0	30,0	25,0	35,7	50,0	42,6	37,5	33,3	25,0	16,7	8,3	16,7	13,3	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для всех последовательностей, %																				
29,3																				

Таблица А. 11 – Сокращение количества проверок в алгоритме диагностирования преобразователя солнечной энергии

Номер последовательности								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина полной последовательности								
6	5	4	6	5	4	2	3	2
Количество верно классифицированных неполных последовательностей								
4	6	6	5	5	6	6	6	6
Количество сокращенных элементов в верно классифицированных неполных последовательностях								
2	1	1	2	2	1	0	0	0
3	1	2	3	3	2	0	1	0
3	2	1	3	2	2	0	1	0
2	2	1	2	2	1	0	0	0
	2	2	3	1	2	0	0	0
	1	2			1	0	1	0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности								
2,5	1,5	1,5	2,6	2,0	1,5	0,0	0,5	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности, %								
41,7	30,0	37,5	43,3	40,0	37,5	0,0	16,7	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для всех последовательностей, %								
27,4								

Таблица А. 12 – Сокращение количества проверок в алгоритме диагностирования дизель-генераторной установки

Номер последовательности																				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Длина полной последовательности																				
11	10	9	11	10	9	7	6	5	8	7	6	9	8	7	6	3	2	4	3	2
Количество верно классифицированных неполных последовательностей																				
6	5	5	4	5	5	6	6	6	5	3	5	3	5	5	4	4	4	4	6	6
Количество сокращенных элементов в верно классифицированных неполных последовательностях																				
5	3	4	4	4	4	3	1	1	4	2	3	3	3	3	2	1	0	1	0	0
2	4	4	5	5	4	2	2	2	2	3	3	4	4	2	1	1	0	1	1	0
4	4	4	5	4	3	3	1	1	3	3	3	4	3	3	3	0	0	0	0	0
4	5	3	4	4	4	2	1	1	2		2		2	2	2	0	0	2	0	0
3	4	3		3	3	2	2	2	3		2		3	1					1	0
5						1	3	2											1	0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности																				
3,8	4,0	3,6	4,5	4,0	3,6	2,2	1,7	1,5	2,8	2,7	2,6	3,7	3,0	2,2	2,0	0,5	0,0	1,0	0,5	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для последовательности, %																				
34,8	40,0	40,0	40,9	40,0	40,0	31,0	27,8	30,0	35,0	38,1	43,3	40,7	37,5	31,4	33,3	16,7	0,0	25,0	16,7	0,0
Среднее арифметическое значение количества сокращенных элементов для всех последовательностей, %																				
30,6																				

Приложение Б

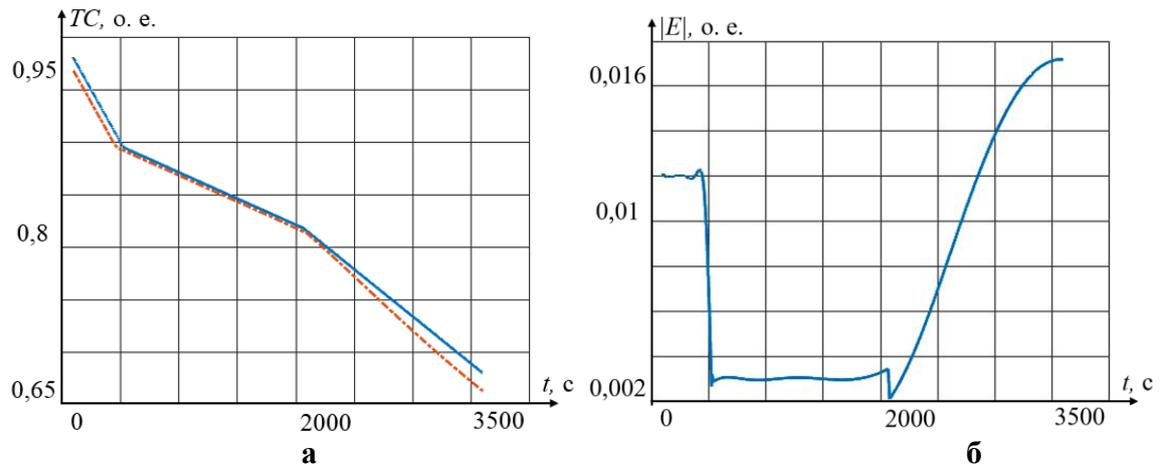


Рис. Б.1. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния дизельного двигателя: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

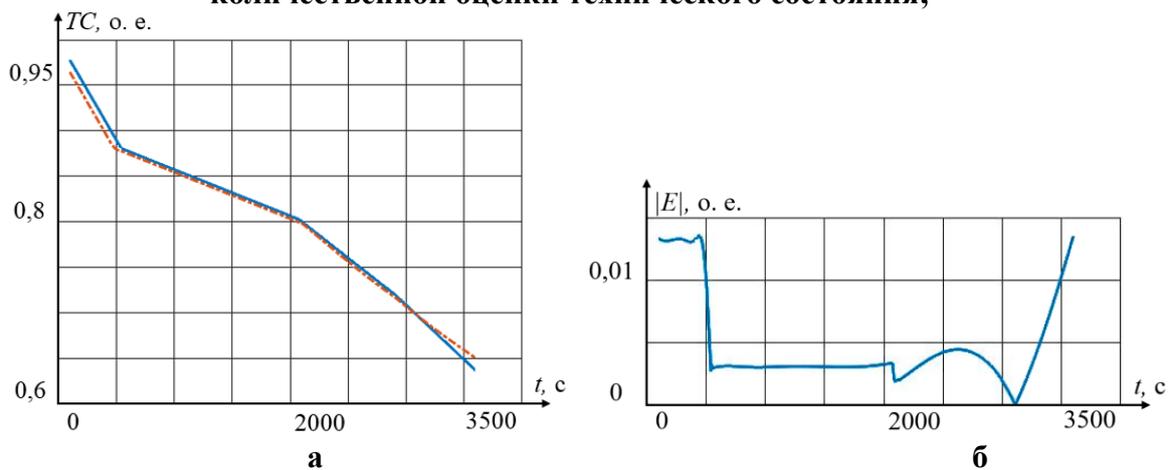


Рис. Б.2. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

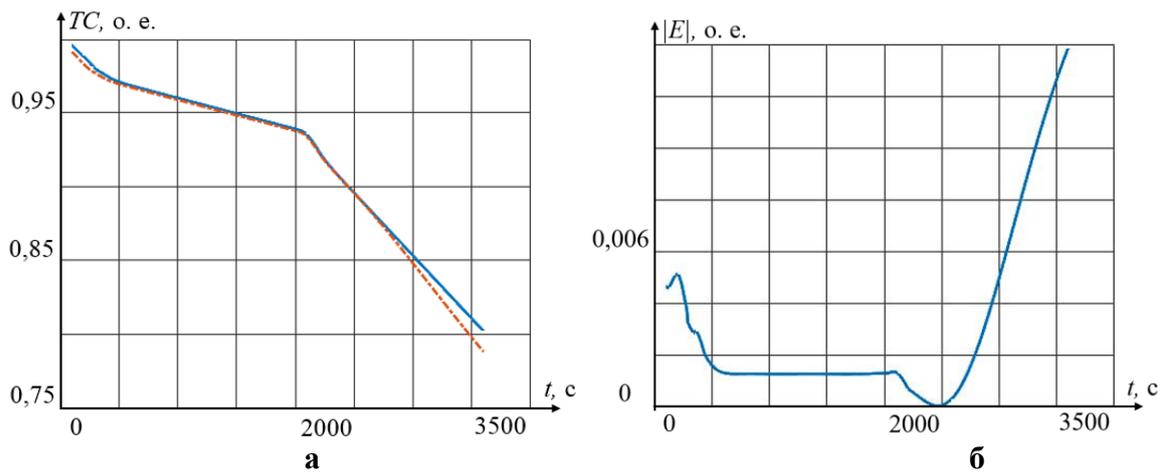


Рис. Б.3. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния преобразователя частоты: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

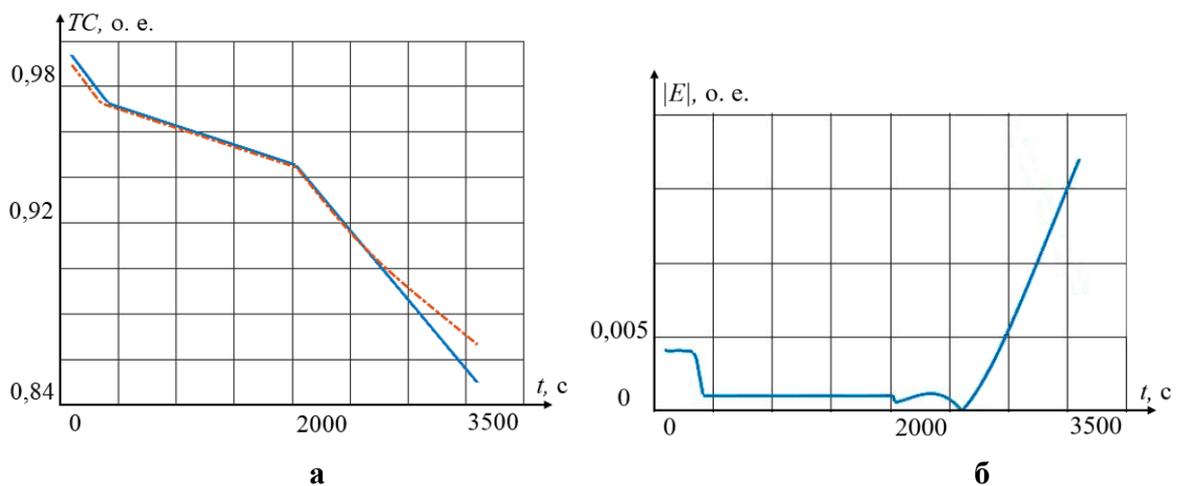


Рис. Б.4. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния фотоэлектрических преобразователей: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

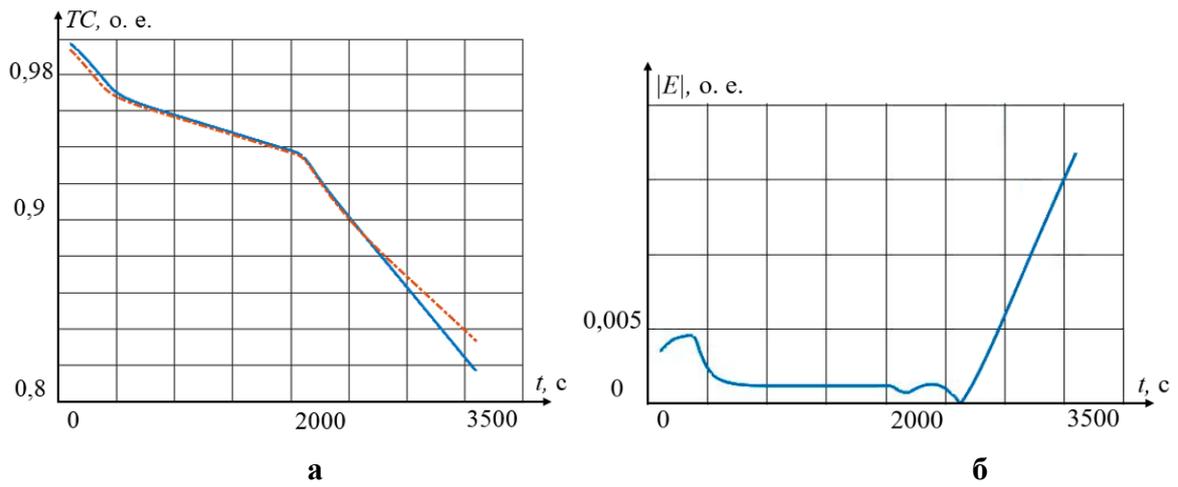


Рис. Б.4. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния инвертора напряжения: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штрихпунктирная линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

Приложение В

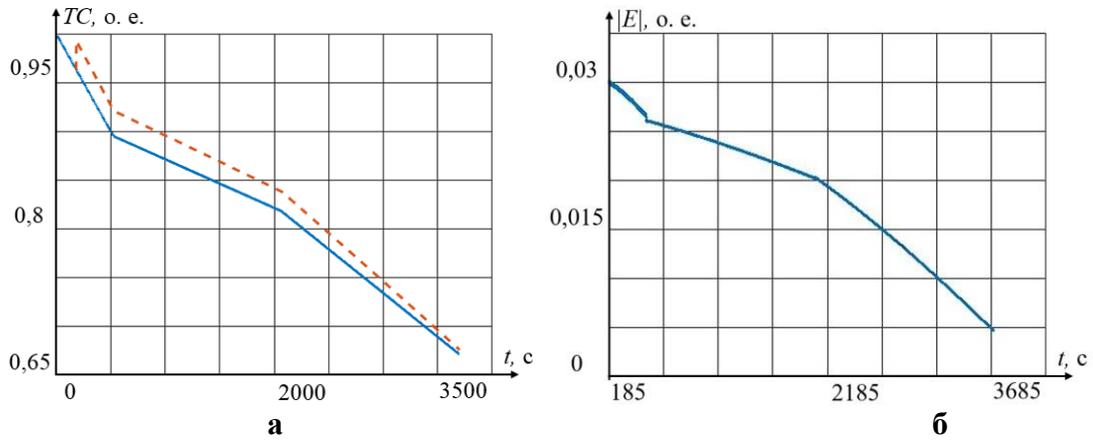


Рис. В.1. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния дизельного двигателя: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

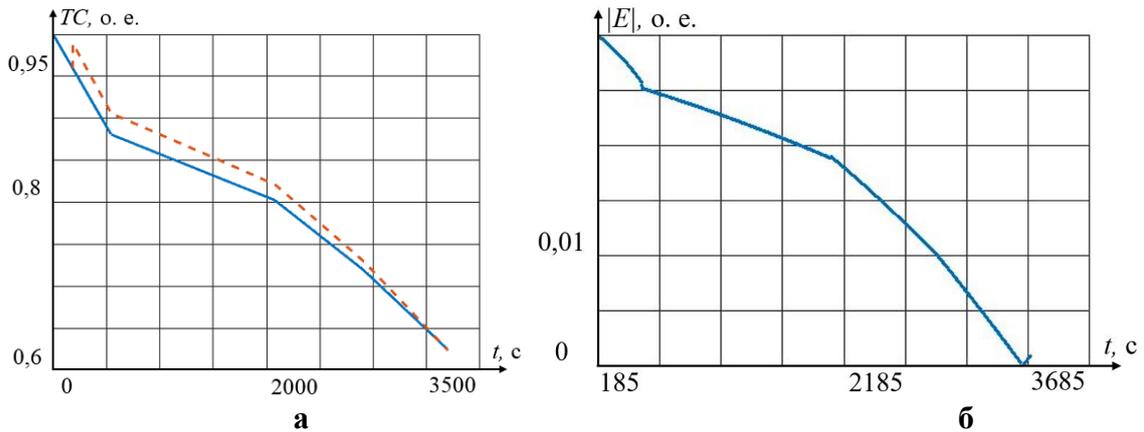


Рис. В.2. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния синхронного генератора: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

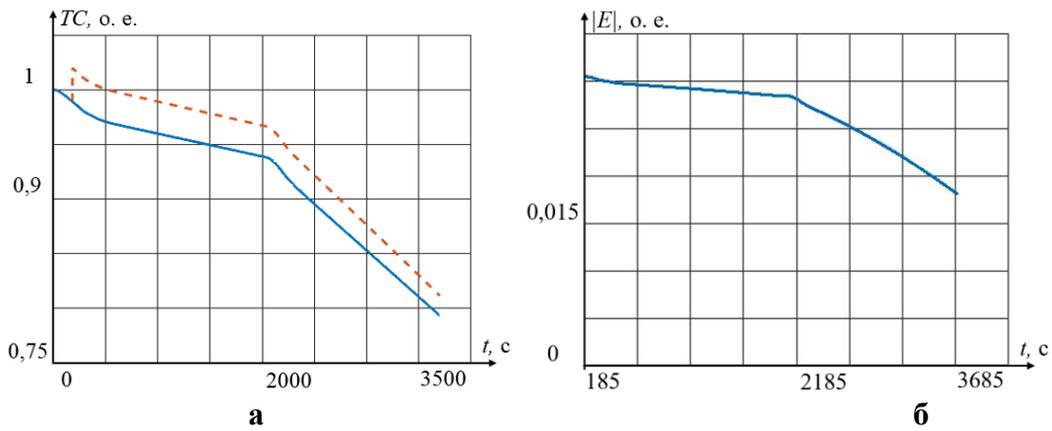


Рис. В.3. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния преобразователя частоты: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

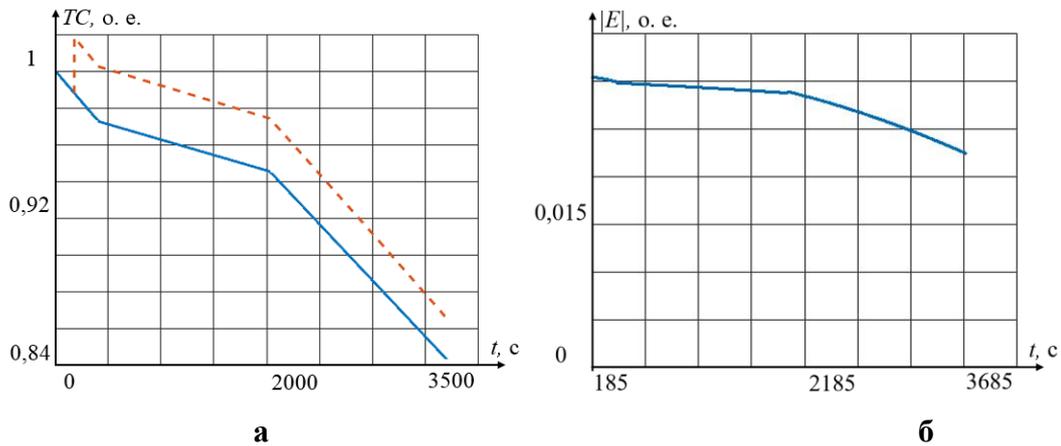


Рис. В.4. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния фотоэлектрических преобразователей: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

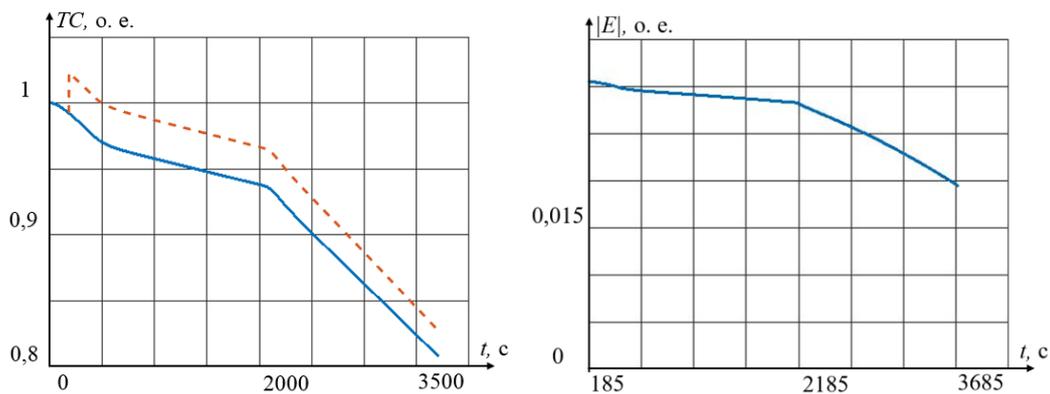


Рис. В.4. Результаты прогнозирования количественной оценки технического состояния инвертора напряжения: а – графики исходной (сплошная линия) и спрогнозированной (штриховая линия) количественных оценок технического состояния; б – график модуля ошибки прогнозирования количественной оценки технического состояния;

Приложение Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023688432

Имитационная модель ветро-солнечно-дизельной электростанции

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Кочеганов Дамир Михайлович (RU), Серебряков Артём Владимирович (RU), Стеклов Алексей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023687670

Дата поступления 12 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 декабря 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»
(НГТУ)

АКТ

№ _____

г. Нижний Новгород



УТВЕРЖДАЮ:
Первый проректор – проректор по
образовательной деятельности НГТУ

Ивашкин Е. Г.

_____ 2024 г.

О внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертации

Кочеганова Д.М.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник учебного отдела ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ) Мухина И.В., директор образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ, заведующий кафедрой «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ, д.т.н., доцент Дарьенков А.Б., доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ, к.т.н., доцент Плехов А.С., составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Кочеганова Д.М.: «Оценка технического состояния оборудования комбинированной электростанции» внедрены в учебный процесс кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ.

Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам «Альтернативные источники электрической энергии» для магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Начальник учебного отдела НГТУ

Мухина И.В.

Директор образовательно-научного
института электроэнергетики НГТУ,
заведующий кафедрой
«Электрооборудование, электропривод
и автоматика» НГТУ, д.т.н., доцент

Дарьенков А.Б.

Доцент кафедры
«Электрооборудование, электропривод
и автоматика» НГТУ, к.т.н., доцент

Плехов А.С.