

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Челябинская государственная агроинженерная академия»

На правах рукописи

ТКАЧЕВ Андрей Николаевич



**МЕТОДИКА УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСА
ПЛЁНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ
РАБОТЫ ПЛЭН В УСЛОВИЯХ СВИНОВОДСТВА)**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В. А. Буторин

Челябинск – 2015

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение | 5 |
| Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования..... | 9 |
| 1.1 Способы обогрева животноводческих помещений | 9 |
| 1.2 Устройство и принцип действия плёночных электронагревателей..... | 16 |
| 1.3 Теоретические основы расчёта долговечности изоляции..... | 18 |
| 1.4 Существующие методы испытания изоляции..... | 23 |
| 1.5 Механизмы пробоя твёрдой изоляции | 28 |
| 1.6 Цель и задачи исследования..... | 32 |
| Глава 2 Теоретическое обоснование ускоренной оценки ресурса плёночных электронагревателей | 34 |
| 2.1 Обоснование детерминированной модели ресурса элементов плёночных электронагревателей | 34 |
| 2.2 Разработка вероятностной модели оценки ресурса плёночных электронагревателей | 38 |
| 2.3 Показатель изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки..... | 44 |
| 2.4 Зависимость скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих факторов..... | 45 |
| 2.5 Критерии подобия испытаний плёночных электронагревателей | 48 |
| 2.6 Прогнозирование ресурса элементов плёночных электронагревателей методом статистического моделирования..... | 51 |
| 2.7 Выводы по второй главе | 54 |
| Глава 3 Методика экспериментальных исследований..... | 55 |
| 3.1 Выбор типоразмера исследуемого плёночного электронагревателя..... | 56 |
| 3.2 Факторы, влияющие на старение изоляции плёночных электронагревателей в условиях свиноводства | 59 |
| 3.3 Методика оценки статистических характеристик эксплуатационных факторов | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 Методика определения постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей | 67 |
| 3.5 Планирование эксперимента..... | 69 |
| 3.6 Установка для ускоренных испытаний плёночных электронагревателей | 72 |
| 3.7 Устройства определения состояния изоляции плёночных электронагревателей | 76 |
| 3.7.1 Система электродов для определения электрической прочности плёночных электронагревателей | 76 |
| 3.7.2 Разработка устройства для определения электрической прочности листовых материалов | 78 |
| 3.7.3 Электрическая схема испытаний электрической прочности плёночных электронагревателей | 79 |
| 3.8 Методика обработки экспериментальных данных | 82 |
| 3.9 Методика статистического моделирования ресурса элементов плёночных электронагревателей | 85 |
| 3.10 Методика проверки результатов испытаний плёночных электронагревателей | 87 |
| 3.11 Выводы по третьей главе..... | 88 |
| Глава 4 Результаты и анализ экспериментальных исследований..... | 90 |
| 4.1 Параметры основных эксплуатационных факторов, влияющих на долговечность плёночных электронагревателей в свиноводстве | 90 |
| 4.2 Определение постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей | 94 |
| 4.3 Определение показателей изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей в зависимости от наработки | 98 |
| 4.4 Аналитическая зависимость скорости старения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих на них факторов | 100 |
| 4.5 Оценка ресурса плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний | 103 |

| | |
|--|-----|
| 4.6 Сопоставление результатов ускоренных и эксплуатационных испытаний плёночных электронагревателей | 109 |
| 4.7 Техничко-экономическая эффективность ускоренных испытаний плёночных электронагревателей | 111 |
| 4.8 Выводы по четвертой главе..... | 119 |
| Основные выводы | 121 |
| Список литературы | 123 |
| Приложение А Расчёт количества испарившегося аммиака с открытой ёмкости, установленной в климатической камере..... | 136 |
| Приложение Б Определение статистических параметров распределения фазного напряжения в сельском хозяйстве | 138 |
| Приложение В Определение постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей | 142 |
| Приложение Г Определение показателей изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей методом наименьших квадратов | 146 |
| Приложение Д Результаты ускоренных испытаний элементов изоляции плёночных электронагревателей | 148 |
| Приложение Е Результаты обработки экспериментальных данных | 150 |
| Приложение Ж Программа расчёта ресурса плёночных электронагревателей методом статистического моделирования в пакете MathCAD..... | 155 |
| Приложение И Патент на полезную модель | 158 |
| Приложение К Акты и справка внедрения результатов научно-исследовательской работы..... | 159 |

Введение

Актуальность темы. В условиях российского климата большое количество затрат связано с обогревом животноводческих помещений в холодный период. Кроме того, в зимние месяцы отмечается увеличенный падёж животных. Наиболее целесообразным средством преодоления указанной проблемы является локальный обогрев животных, особенно молодняка – из-за повышенных требований к температурным условиям. Одним из устройств локального и общего обогрева является плёночный лучистый электронагреватель («плёночный электронагреватель»), выпускаемый серийно с 2005 года. Этот вид нагревателей показал свою эффективность на достаточно большом количестве объектов сельскохозяйственного назначения, социальной сферы и жилых помещений. Надёжность плёночных электронагревателей определяется состоянием их изоляции. В данной работе их надёжность рассмотрена на примере одного из видов плёночных электронагревателей – ПЛЭН.

В реальных условиях эксплуатации электрооборудование животноводческих помещений испытывает на себе агрессивные условия среды. Как правило, на деле техническое обслуживание электрооборудования проводится не по планам, а по мере возникновения отказов, из-за большой загруженности, низкой квалификации персонала и другим причинам.

Для оперативной оценки эффективности мероприятий по повышению качества изготовления, эксплуатации и восстановления ПЛЭН необходимы подходящие для этого способы и средства. Техническая эксплуатация данных нагревателей проводится относительно недолго, что обуславливает недостаточность информации об их ресурсе. До сих пор отсутствует научно обоснованная методика оценки надёжности выпускаемых плёночных электронагревателей. Ускорить получение сведений о долговечности можно с помощью современных методов прогнозирования по результатам испытаний. Существующие методики испытаний долговечности изоляционных материалов в неадаптированном виде неприменимы для ПЛЭН и нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Поэтому разработка

методики определения и оценки ресурса плёночных электронагревателей представляет собой актуальную задачу. Решение этой задачи позволит оперативно проводить оценку качества изготовления плёночных электронагревателей и влияния принимаемых технических решений на их долговечность.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717, а именно, подпрограммам: «Развитие отрасли животноводства, переработки и реализации продукции животноводства»; «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие» (основное мероприятие 2 «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в сельскохозяйственном производстве»).

Целью работы является прогнозирование ресурса плёночных электронагревателей в животноводстве на основе разработанной методики ускоренных испытаний по результатам изменения пробивного напряжения их изоляции (на примере работы ПЛЭН в условиях свиноводства).

Объект исследования: процесс старения плёночных электронагревателей при использовании в свиноводстве.

Предмет исследования: закономерности изменения параметра состояния изоляции плёночных электронагревателей при их эксплуатации в условиях свиноводства.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Разработана вероятностная модель оценки ресурса плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний на эксплуатационных режимах работы.
2. Разработана методика ускоренных испытаний изоляции плёночных электронагревателей, позволяющая прогнозировать их ресурс в вероятностном аспекте по изменению величины пробивного напряжения.
3. Установлены значения показателя α изменения пробивного напряжения

элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки, а также закономерности, отражающие скорость изменения параметра состояния их элементов изоляции от основных эксплуатационных факторов.

Практическая ценность работы и реализация ее результатов:

1. Применение разработанной методики прогнозирования ресурса плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний позволяет значительно сократить период (в 10 раз) и средства оценки ресурса, по сравнению с эксплуатационными испытаниями.

2. Разработано техническое средство для определения состояния изоляции плёночных электронагревателей. Устройство для определения электрической прочности листовых материалов позволяет проводить контроль состояния изоляции ПЛЭН при сохранении целостности испытываемых образцов листовых материалов с большой поверхностью. Новизна данного технического решения подтверждена патентом РФ на полезную модель.

3. Обработка результатов экспериментов и вычисление ресурса оборудования с помощью разработанных программ для ЭВМ производится без фактических затрат времени.

4. Результаты научно-исследовательской работы по оценке ресурса плёночных электронагревателей апробированы в НИИ МАСП, ООО «КВАНТ» (г. Челябинск). Они могут быть использованы предприятиями-изготовителями, монтажными и эксплуатирующими организациями.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований ресурса плёночных электронагревателей используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО ЧГАА по дисциплине «Эксплуатация электрооборудования в сельском хозяйстве».

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований были представлены и получили одобрение на XLIX–LIV Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству» ЧГАА (Челябинск, 2010–2015 гг.); Всероссийской научно-практической конференции «Научное обеспечение инновационного развития АПК» в рамках

XX-ой Юбилейной специализированной выставки «АгроКомплекс-2010» (Уфа, Башкирский ГАУ, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» Саратовского ГАУ имени Н. И. Вавилова (Саратов, 2010 г.); конференциях II в Уральском федеральном округе и III финального этапов Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации по номинации «технические науки» (Челябинск – Саратов, 2011 г.); XXI научной конференции Research Journal of International Studies (Екатеринбург, 2013 г.); II Молодежной научной конференции «Разработки молодых учёных – агропромышленному комплексу» (Челябинск, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, отражающих её основное содержание, в том числе две в изданиях, рекомендованных ВАК, и один патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка литературы из 152 наименований и приложений. Основное содержание работы изложено на 135 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков и 10 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность кандидату технических наук В. И. Дергачу за всецелую поддержку при написании диссертации, ценные идеи и замечания в процессе выполнения работы. Также неоценимую помощь автору при написании диссертации оказали кандидаты технических наук И. Б. Царёв и Е. Н. Епишков консультациями по возникающим вопросам и моральной поддержкой.

Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования

В обзоре существующих вопросов, связанных с обогревом животноводческих помещений, в первую очередь, следует рассмотреть применяемые способы этого обогрева. Особое внимание уделено изучению устройства и принципа действия применяемых плёночных лучистых электронагревателей. Интересующие нас вопросы долговечности изоляции описываются различными теориями. Для их реализации применяются свои методы оценки состояния твёрдой изоляции, одному из которых – испытанию пробивным напряжением, посвящена настоящая работа.

1.1 Способы обогрева животноводческих помещений

В условиях российского климата с ярко выраженным холодным периодом года большое значение имеет обеспечение комфортных условий в местах содержания животных. Из всего разнообразия применяемых систем отопления животноводческих помещений трудно выделить наиболее эффективные по технико-экономическим показателям. Современная система обогрева должна быть унифицированной и подходить для многих типов помещений, быть экономически выгодной при существующем финансовом положении дел в сельском хозяйстве. При росте цен на топливно-энергетические ресурсы и отсутствии денежных средств для сельскохозяйственного производителя становится затруднительным даже отопление помещений для содержания молодняка животных. Это приводит к высокому уровню их падежа, массовым заболеваниям и снижению привесов [72].

Повышенная температура воздуха требуется для молодняка животных и птицы в начальный период их развития. В этом случае является выгодным применение дополнительного электрообогрева зон размещения молодняка при существующей общей системе отопления помещений [83].

На основании представленной в литературе [7] схемы приведена следующая классификация электрических систем отопления животноводческих помещений (рисунок 1.1).

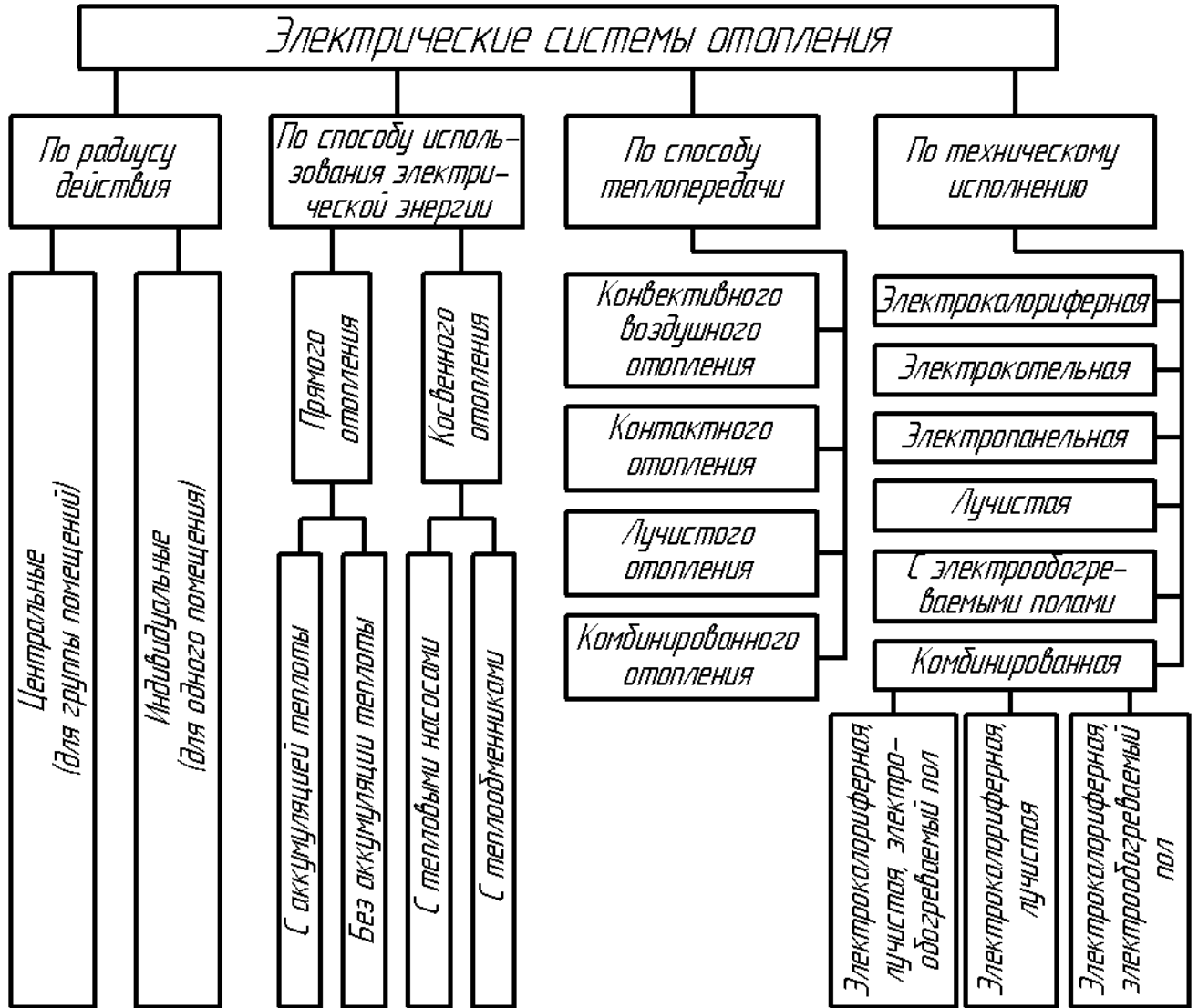


Рисунок 1.1 – Классификация электрических систем отопления

Наибольшее распространение в сельском хозяйстве получили системы прямого конвективного воздушного и комбинированного отопления помещений [Там же]. В случае применения комбинированной системы отопления, при смешанном содержании животных, в общем помещении устанавливается минимально необходимая температура за счет общего отопления, а в зоне нахождения молодняка повышается до необходимого значения с помощью средств местного (локального) обогрева.

Большой вклад в решение проблем обогрева сельскохозяйственных животных внесли работы Л. А. Баранова, Д. Н. Быстрицкого, Л. С. Герасимовича, В. Н. Делягина, Н. Е. Епишкова, И. Ф. Кудрявцева, В. К. Мурзина, В. М. Попова, Л. Г. Прищепа, В. Н. Расстригина, С. А. Растимешина, А. Э. Шкеле и других учёных.

Применение при локальном обогреве специального электрооборудования приводит к уменьшению расхода электроэнергии, улучшению температурно-влажностного режима для животных и, как следствие, к снижению уровня простудных заболеваний, повышению привесов, уменьшению себестоимости продукции и расхода кормов [7].

Также по результатам исследований А. В. Соляника [130] улучшение теплозащиты помещений и модернизация систем вентиляции приводят к повышению продуктивности поросят-отъемышей и снижению затрат корма, вследствие более благоприятного температурно-влажностного режима.

Классификация установок локального обогрева осуществляется по следующим признакам [96]:

- По методу обогрева различают устройства напольного (контактного), инфракрасного (ИК) и комбинированного обогрева, что определяется способом теплопередачи и пространственным размещением установки по отношению к объекту нагрева.

- Характер теплового воздействия установки на молодняк животных определяется способом теплопередачи. Установки бывают с лучистой, воздушной (конвективной), контактной и смешанной теплопередачей.

- По виду теплоносителя различают установки локального обогрева с электрическим, пароводяным и воздушным нагревом.

- По теплоаккумулирующей способности установки условно разделяются на инерционные (обогреваемые полы) и малоинерционные (обогреваемые коврики, плёночные электронагреватели).

- По характеру эксплуатации установки делятся на стационарные и переносные.

В результате анализа технических средств В. К. Мурзиным составлена классификационная схема для установок локального обогрева молодняка на примере поросят-сосунов, приведённая на рисунке 1.2 [Там же].

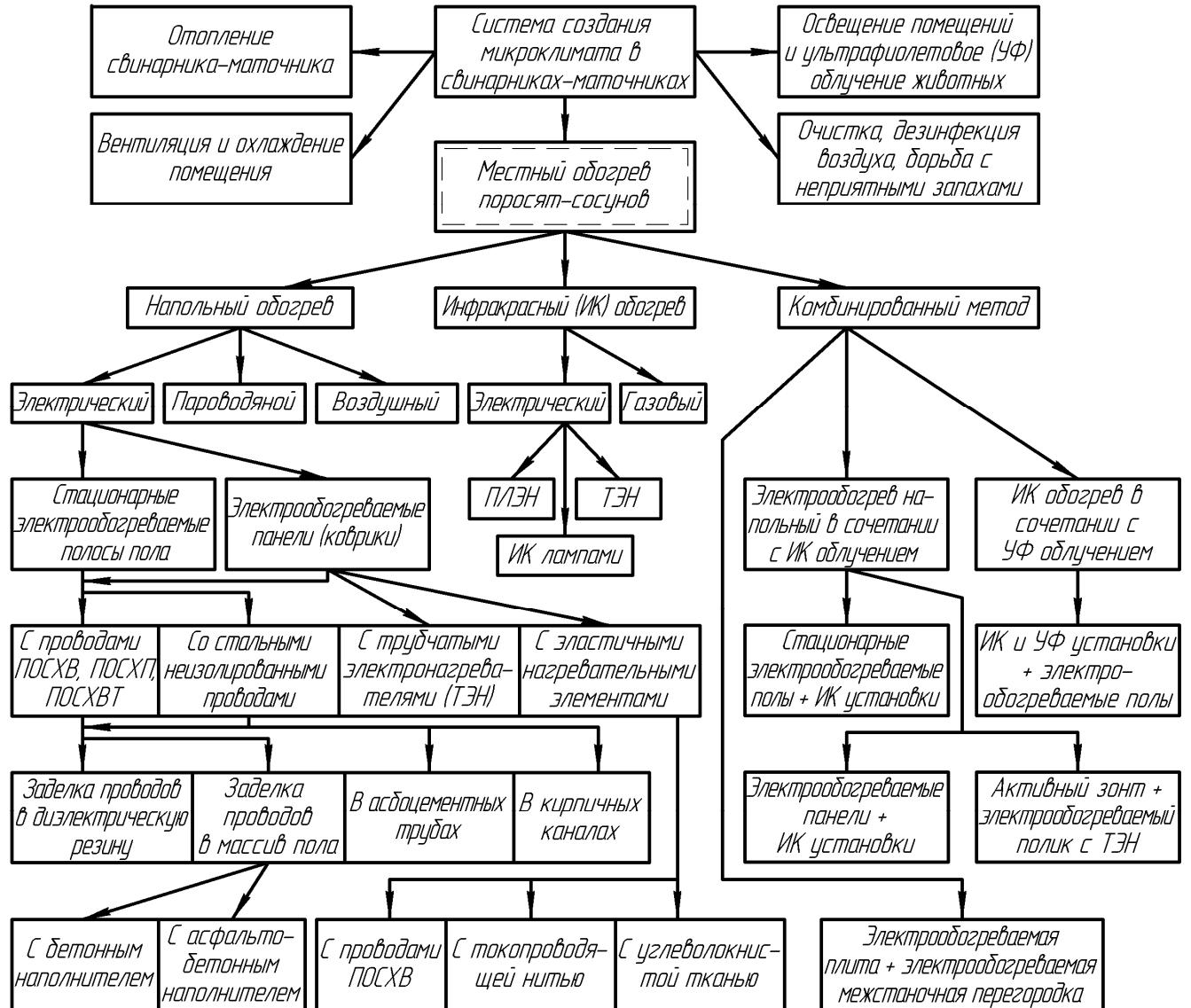


Рисунок 1.2 – Классификация установок локального обогрева поросят-сосунов

Микроклимат в свинарниках-маточниках отличается для свиноматок и поросят по требуемым параметрам температуры и влажности. При смешанном содержании в таких помещениях, обычно в зоне размещения молодняка дополнительно обеспечиваются более строгие параметры температуры и влажности с помощью средств местного обогрева [94].

Применяемые основные способы локального обогрева: инфракрасный, контактный и комбинированный (таблица 1.1) имеют присущие им достоинства и недостатки [121]. При правильном применении перечисленные способы дают высокие результаты в плане реализации требуемого режима микроклимата для животных и экономии электроэнергии [94].

Наибольшее распространение по способу теплопередачи имеют локальные устройства лучистого и контактного теплообмена [83]. Наиболее благоприятно для животных в биологическом плане совместное воздействие инфракрасного и ультрафиолетового облучения. Для этого существуют комбинированные облучательные установки, осуществляющие автоматическое регулирование воздействия на молодняк животных, с учётом наиболее экономичного режима их работы [94]. К устройствам лучистого действия относятся различные инфракрасные облучатели и брудеры, установки совместного облучения «ИКУФ» и «Луч» [7].

Источники инфракрасного обогрева делятся на две группы: «светлые» и «темные». Наибольшее распространение первых из них имеют ламповые излучатели, которые преобразуют в ИК-излучение до 70 % потребляемой энергии и имеют схожую конструкцию с лампами накаливания. Средний срок службы ламповых ИК-излучателей типа ИКЗ, ИКЗК мощностью соответственно 500 и 250 Вт составляет 4÷6,5 тыс. ч. Современные «тёмные» ИК-излучатели (ЭИС-0,25-И1 и ЭИС-0,25-И2 типа «Ирис») имеют преимущества перед «светлыми» ламповыми при ударных нагрузках и кратковременных перегрузках по напряжению. К тому же, эти излучатели не оказывают на животных слепящего действия. Они представляют собой керамическую плитку с запрессованной нихромовой спиралью и снабжены ламповым цоколем E27 [94].

К контактному обогревателю относятся электрообогреваемые полы и различные виды напольных обогревателей: обогреваемые коврики, панели и т.д. [83,94]. Из напольных обогревателей известны две модификации: электрообогреваемые коврики ЭП-935 размерами 1200×500×25 мм с армированием по периметру уголками, а также мягкие коврики размерами 1000×600×20 мм из хмостойкой резины [94].

Таблица 1.1 – Характеристики основных способов локального обогрева

| Способ | Основные достоинства | Основные недостатки | Тип оборудования | Общие рекомендации |
|-----------------|---|--|---|---|
| Инфракрасный | Простота конструкций обогревателей, низкая энерго- и материалоемкость. Простота автоматизации режимов работы оборудования. Дополнительный биологический эффект от ИК-облучения. | Раздражающее действие яркого светового потока при использовании ламповых обогревателей. Возможное временное переохлаждение нижней поверхности тела животных. Сравнительно малый срок службы излучателей. Необходимость применения подстилки. | «Светлые» и «темные» обогреватели и установки, низкотемпературные излучатели панельного типа с развитой излучательной поверхностью. | Основной и наиболее распространенный способ обогрева. Возможно применение в любых электрифицированных помещениях. |
| Контактный | Высокая технологическая эффективность. Низкая энергоемкость (по сравнению с ИК-обогревом расход энергии на локальный обогрев можно уменьшить более чем вдвое). Возможность использования в ряде случаев «внепиковой» электроэнергии. Большой срок службы обогревателей. Возможен отказ от применения подстилки. | Возможное переохлаждение верхней поверхности тела животных при взаимодействии с холодным воздухом. Необходимо использование понижающих трансформаторов. Повышенные требования к электробезопасности. Большая инерционность. | Обогреваемые полы, участки и полосы пола, панели, ковры, маты, грелки для обогрева и обсушки. | Применение возможно в любых помещениях. Использование целесообразно в строящихся и реконструируемых зданиях. |
| Комбинированный | Наиболее эффективное воздействие на организм животных. Все основные преимущества ИК- и контактного обогрева. Возможность значительного снижения общего теплового фона в помещении вплоть до отказа в некоторых случаях от подогрева приточного воздуха. | Высокие капитальные затраты. Повышенные требования к уровню эксплуатации. В некоторых случаях необходимость использования понижающих трансформаторов. Повышенные требования к электробезопасности. | Одновременное использование средств ИК и контактного обогрева. Специальные комбинированные установки, комплекты и устройства. | Высокоэффективный способ для любых электрифицированных помещений. |

Электрообогреваемые полы имеют самые хорошие технико-экономические показатели из контактно-конвекционных систем отопления [147]. Они обладают

существенной аккумуляцией теплоты, что допускает перерывы их электроснабжения в течение нескольких часов без ущерба для животных [83]. Имеются и существенные недостатки: обогрев зоны пола, где животные не отдыхают, вызывает нерациональное использование теплоты; усложнена или полностью исключена возможность ремонта поврежденной электрической части; новорожденные поросята без световой приманки не находят теплого места отдыха и остаются около матки, что приводит к их повышенному падежу [147].

Основными носителями тепла обогреваемых полов могут выступать электроэнергия, вода или воздух. Наиболее доступными на практике являются электрообогреваемые полы на основе бетона с нагревательными элементами в виде проводов марок ПОСХВ, ПОСХВТ, ПНВСВ, неизолированного стального провода \varnothing 4-6 мм и углеграфитовых нагревательных элементов. Наиболее целесообразным при устройстве электрообогреваемых полов является использование нагревательного провода ПНВСВ из-за его повышенной прочности и защищенности. Этот провод имеет двойную изоляцию с защитным металлическим экраном между слоями. Поэтому для его применения не требуется дополнительная защитная металлическая сетка [94].

На основании анализа различных способов обогрева животноводческих помещений логичным является следующий вывод [Там же]: «Использование в животноводческих помещениях средств локального обогрева является одним из способов, обеспечивающих не только комфортные условия выращивания поросят, но и значительную экономию энергии, которая достигается за счет рационального сочетания локального обогрева с общим обогревом помещения, в результате чего происходит снижение требуемого теплового фона».

Ещё в конце 80-х годов XX века В. К. Мурзин обращает внимание на инфракрасный обогрев [96]: «перспективным направлением исследований следует считать разработку и внедрение низкотемпературного ИК излучателя».

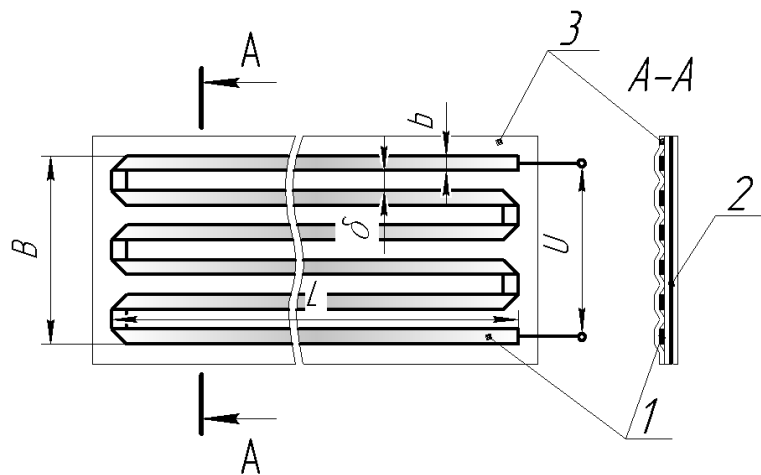
Одним из направлений в области современных разработок локального обогрева является система теплового комфорта (СТК). СТК предназначена для создания необходимых тепловых условий новорожденным животным при недостаточ-

ном обогреве помещений для их содержания и с наименьшими затратами энерго-ресурсов. СТК для поросят-сосунов состоит из логова и системы автоматического регулирования температуры в них, функционально связанных между собой. Логово выполнено в виде параллелепипеда со стенками, обладающими высоким термосопротивлением, в нижней части располагается теплоизолированный пол, а в верхней – низкотемпературный плёночный электронагреватель [72].

Таким образом, анализ приведенных систем обогрева животноводческих помещений показывает, что плёночные электронагреватели обладают наилучшими технико-экономическими показателями [71,77]. Плёночные электронагреватели надёжны в эксплуатации и отличаются коррозионной стойкостью при работе в агрессивных средах. Но фактор агрессивности среды в условиях сельскохозяйственного производства и, в частности, свиноводства всё же существенно влияет на надёжность устройств. С учётом этого, для более точной оценки долговечности данных устройств необходимы дальнейшие исследования.

1.2 Устройство и принцип действия плёночных электронагревателей

Основным элементом СТК является плёночный электронагреватель (рисунок 1.3), представляющий собой многослойное полотно [107,108]. Резистивный ленточный греющий слой 1 из металлической фольги 20НХГ и алюминиевая фольга 2 для выравнивания температуры по поверхности нагревателя ламинируются между слоями полимерной полиэтилентерефталатной (ПЭТ) плёнки 3. Основные разработки плёночных лучистых электронагревателей на базе ЧГАУ (с 2009 г. ЧГАА) принадлежат учёному кандидату технических наук Н. Е. Епишкову. СТК на базе ПЛЭН для поросят-сосунов в условиях неотапливаемого свинарника-маточника разработана в рамках научной работы Е. Н. Епишкова [71] совместно с учёными ЧГАУ – ЧГАА.



1 – резистивный элемент; 2 – слой алюминиевой фольги для выравнивания температуры; 3 – слой полотна из полиэтилентерефталатной плёнки; b – ширина резистивной полосы; δ – расстояние между резистивными полосами; L – длина резистивных полос;

B – ширина контактной поверхности теплообмена

Рисунок 1.3 – Конструктивная схема плёночного электронагревателя

При протекании тока через проводник нагревателя – резистивную греющую ленту – выделяется теплота, которая контактно передается алюминиевой фольге, от чего она нагревается до температуры 40–45 °С. Плёночный электронагреватель начинает излучать тепло в виде инфракрасного спектра длиной волны 9–15 мкм. [109]. Л. С. Герасимовичем по литературным данным составлен перечень основных низкотемпературных тепловых процессов в сельском хозяйстве с учётом продолжительности, средних параметров нагрева и вида контактного теплоносителя, который включает 67 технологических процессов по 15 отраслям [44].

Тонкослойные поверхностно-распределенные резистивные плёночные электронагреватели весьма перспективны для сельскохозяйственного производства при низкотемпературном нагреве [5,42,44]. Основные достоинства этих нагревателей: высокая антикоррозионная стойкость при работе в агрессивных средах, технологичность изготовления нагревателей разнообразных конфигураций, равномерный и дифференцированный нагрев больших поверхностей сложной формы, относительно низкая металлоемкость и высокий тепловой коэффициент полезного действия [42]. Предполагается, что плёночные электронагреватели обла-

дают значительной долговечностью, но для её оценки необходимо провести соответствующие испытания.

1.3 Теоретические основы расчёта долговечности изоляции

Согласно исследованиям Л. С. Герасимовича «требуемая работоспособность поверхностно-распределенного электронагревателя определяется, в конечном итоге, общей допустимой энергетической нагрузкой основных функциональных элементов (резистивных тел и тонкослойной электроизоляции)». От правильного решения задачи топологических расчетов основных функциональных элементов зависит сложность технологического процесса изготовления, срок службы и стоимость поверхностно-распределенного электронагревателя [44].

В процессе хранения, транспортировки и эксплуатации изоляция электрооборудование подвергается воздействию различных внешних неблагоприятных условий. С течением времени это приводит к ухудшению её свойств [36].

Из многочисленных факторов во многих случаях доминирует температура и, как следствие – тепловое старение изоляции, которое относительно подробно исследовано. Одним из наиболее известных законов в результате исследований в данном направлении является «правило восьми градусов» Монтзингера, сформулированное для изоляции класса А, согласно которому превышение температуры на каждые восемь градусов сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое [74,84]. Это эмпирическое правило записывается в виде уравнения

$$T = T_0 \cdot 2^{-\Theta/\Delta\Theta}, \quad (1.1)$$

где T – срок службы изоляции при температуре Θ , годы;

Θ – температура изоляции, °С;

T_0 – условный срок службы изоляции при $\Theta=0$ °С и $\Delta\Theta=8$ °С ($T_0=6,225 \cdot 10^4$), лет.

В таблице 1.2 приведены значения коэффициента $\Delta\Theta$ для различных классов изоляции [58] из технической литературы [84]. Для более высокого класса изоляции её старение происходит медленнее.

Таблица 1.2 – Зависимость $\Delta\Theta$ от класса изоляции

| Класс изоляции | A | E | B | F | H | C |
|---------------------|-----|------|-----|------|------|------|
| Θ , °C | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |
| $\Delta\Theta$, °C | 8 | 9,14 | 9,9 | 11,8 | 13,7 | – |

На основании экспериментальных исследований учёными были получены усредненные линии регрессии для изоляционных материалов различных классов, представленные на рисунке 1.4 [74]. Указанные зависимости в литературе имеют некоторый разброс значений.

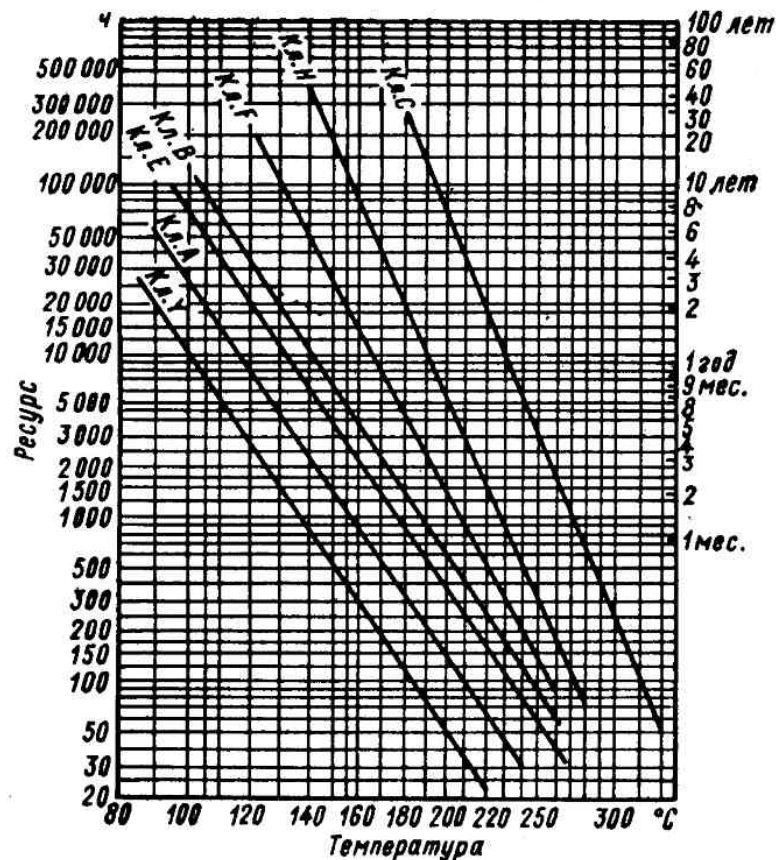


Рисунок 1.4 – Зависимости ресурса изоляции от температуры для различных классов нагревостойкости

Специалист в области машин постоянного тока профессор В. С. Хвостов следующим образом поясняет рассматриваемое правило [141]: «Главное значение этого правила в том, что оно указывает на характер зависимости, т. е. всегда можно утверждать, что повышение температуры на 8 °С примерно в 2 раза снизит срок службы машины. Более точное определение срока службы может быть получено только из статистических данных эксплуатации машин конкретного типа. «Правило восьми градусов» неразумно распространять в область низких температур. Так при длительной температуре 90 °С и ниже старение изоляции происходит, в основном, не из-за химических превращений, а по другим причинам». Также и по современным представлениям, описанным О. Д. Гольдбергом, «правило десяти градусов» (для изоляции класса *B*) в чистом виде не выполняется для обмоток электрических машин [47].

Таким образом, уравнение (1.1) можно использовать только для ориентировочных расчётов при тепловом старении изоляции. Причём, данное равенство было получено опытным путём для электрических машин и, поэтому, может дать ложные значения для изоляции других видов электрооборудования. Обратим внимание и на то, что описывается срок службы изоляции, а не наработка, что имеет большое значение из-за различных режимов работы. Указанная зависимость учитывает только лишь влияние температуры на старение изоляционных материалов. Также область рассматриваемых нами температур изоляции плёночных электронагревателей существенно ниже описываемых данным эмпирическим законом.

Для описания процессов старения изоляции Я. Вант-Гоффом и С. Аррениусом были применены общие законы кинетики химических реакций. В результате ими получено уравнение, представляющее постоянную скорость протекания реакции K как величину, определяющую относительное число эффективных столкновений частиц, завершающихся химическим взаимодействием [84,135]

$$K = A \cdot e^{-E_a/(R\Theta)}, \quad (1.2)$$

где A – коэффициент;

E_a – энергия активации, Дж/моль;

$R=8,317$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль);

Θ – абсолютная температура, К.

На практике расчёт времени T , в течение которого изоляция достигает своего предельного состояния вследствие старения можно произвести с помощью безразмерной величины G

$$\ln T = E_a / (R\Theta) - G, \quad G = \ln A - \ln(\ln(C_0 / C)), \quad (1.3)$$

где C_0 – начальная концентрация молекул;

C – концентрация молекул в рассматриваемый момент.

Для известного срока службы изоляции T_1 при температуре Θ_1 можно определить срок службы T_2 при температуре Θ_2

$$T_2 = T_1 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\Theta_2} - \frac{1}{\Theta_1}\right)\right]. \quad (1.4)$$

Значения E_a , G и коэффициента $B = -E_a / R$ для различных классов изоляции определены экспериментально и приведены в таблице 1.3 [84]. Приведённые данные также учитывают только воздействие температуры и поэтому приближённо характеризуют степень старения изоляции.

Таблица 1.3 – Экспериментальные данные параметров, определяющих срок службы изоляции

| Класс изоляции | $B, 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ | G | $E_a,$ Дж/моль | Класс изоляции | $B, 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ | G | $E_a,$ Дж/моль |
|----------------|-------------------------------------|------|-------------------|----------------|-------------------------------------|------|-------------------|
| A | 0,95 | 15,3 | 7,90 | F | 1,27 | 19,7 | 10,55 |
| E | 0,985 | 15,1 | 8,19 | H | 1,55 | 24,2 | 12,89 |
| B | 1,02 | 15,5 | 8,48 | C | 1,55 | 21,8 | 12,89 |

Аналитическая зависимость (1.3) срока службы от температуры может нарушаться, когда изменяется характер процесса старения. Поэтому использование данной зависимости для прогнозирования срока службы электрической изо-

ляции известной нагревостойкости от рабочей температуры делает невозможным [92].

По материалам Н. Л. Кузнецова [84] механические и термомеханические факторы в значительной мере влияют на срок службы изоляции. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодического нагрева и охлаждения обмоток. Механические нагрузки (вибрация, давление, удары и т.д.), например, во вращающихся машинах являются следствием электродинамических сил, неуравновешенности вращающихся частей, центробежных усилий, ударов и толчков со стороны привода и приводного механизма, и отсутствуют в ПЛЭН.

Для определения степени старения изоляции используется закономерность уменьшения её влагостойкости, т.е. процесс впитывания влаги происходит интенсивнее, что приводит к понижению сопротивления этой изоляции. Для проверки изоляция на некоторое время может быть помещена в камеру влажности. Для оценки степени увлажнения изоляции часто используется метод контроля абсорбции. Он основан на определении зависимости тока, проходящего через изоляцию, при приложении постоянного напряжения, от времени [80].

Согласно научной литературе [84], влага и химически активные среды существенно влияют на срок службы изоляции. Процесс проникновения влаги в изоляцию электрической машины особенно интенсивно происходит при её остывании после работы, что справедливо и для плёночных электронагревателей. Причиной этого является уменьшение давления в порах изоляции ниже атмосферного. Благодаря своим свойствам вода проникает в микроскопические поры изоляции. «Влага снижает сопротивление изоляции и её электрическую прочность, создавая тем самым предпосылки для появления в изоляции токов утечки, частичных разрядов и других явлений, которые увеличивают вероятность пробоя».

По данным И. П. Жерихина [74] совокупное влияние на срок службы изоляции температуры, влажности и агрессивных сред оценивается по формуле

$$T = A \cdot e^{\frac{b}{a}} \cdot Q^{-m} \cdot W^{-n}, \quad (1.5)$$

где Q – концентрация агрессивного агента;

W – относительная влажность;

m, n – коэффициенты;

b, q – эмпирические коэффициенты.

Жерихин подчёркивает, что «процессы старения изоляции поддерживают и активизируют друг друга. ... Разрушение изоляции происходит постепенно, причём иницирующая роль принадлежит процессам старения. Даже при сравнительно невысоких температурах, когда термоокислительная деструкция незначительна, под воздействием тепла происходит усыхание изоляции, испарение летучих компонентов из связующих, уменьшение эластичности изоляции, повышение её хрупкости. Последнее способствует развитию процессов механического старения. В изоляции появляются трещины и другие дефекты, она расслаивается и рыхлится, что создаёт условия для возникновения ионизационных явлений. Разрушение изоляции происходит неравномерно и завершается пробоем в наиболее слабом месте. Влага и агрессивные среды способствуют ускорению и активизации процессов старения».

При реальных условиях эксплуатации использование приведённых выше теоретических уравнений для определения ресурса изоляции связано со значительными трудностями, так как они не учитывают стохастический характер воздействующих нагрузок. Расчёт по ним приведёт к неоднозначным результатам.

1.4 Существующие методы испытания изоляции

К моменту начала изучения надёжности ПЛЭН это направление в научных изданиях не освещено. В настоящей работе учтены данные, полученные при изучении надёжности изоляции электрических машин в сельском хозяйстве, как наиболее близкие по тематике. Значительный вклад в решение вопросов надёжности асинхронных двигателей внесли Э. К. Стрельбицкий, Ю. П. Похолков, О. П. Муравлёв, В. В. Пыхтин, С. С. Марьин (г. Томск), О. Д. Гольдберг, А. И. Голубович, С. П. Хелемская (г. Москва), а также О. И. Хомутов, О. К. Никольский,

Н. П. Воробьев, С. О. Хомутов, О. В. Хоменко (г. Барнаул) и другие. В ЧИМЭСХ (г. Челябинск) надёжность изоляции электродвигателей изучали А. А. Пястолов, Е. Г. Мякинин, В. К. Мокеев, А. Е. Немировский, Л. А. Саплин, В. И. Чарыков, Г. А. Петров, Ю. П. Ильин, В. И. Дергач и другие учёные.

Основными методами определения долговечности являются эксплуатационные и ускоренные (стендовые) испытания. При разработке научных методов, как правило, ориентируются на ускоренные испытания, занимающие обычно меньшее количество времени. Эксплуатационные испытания, между тем, также являются неотъемлемой частью методики оценки надёжности оборудования. Они могут использоваться для контроля правильности разработанных методик ускоренных испытаний, так как всегда реально учитывают все происходящие при этом процессы.

Существуют разработанные модели надёжности изоляции для конкретных электрических машин и узлов. Модель надёжности изоляции насыпных обмоток асинхронных двигателей, разработанная О. Д. Гольдбергом, стала основой ряда отраслевых стандартов и руководящих документов, используется на электротехнических заводах. В качестве макетов используются два расположенных рядом и разделённых между собой пропитанной изоляцией витка. При отказе одного из элементов модели считается, что обмотка вышла из строя. Отказ обмотки, согласно модели, происходит в результате межвиткового замыкания, когда напряжение между соседними витками превышает напряжение пробоя межвитковой изоляции. Соответственно, в том случае, если пробивное напряжение межвитковой изоляции будет больше приложенного к ней напряжения, то отказ не наступит [47].

Разработанная Ю. П. Похолковым модель надёжности насыпных обмоток асинхронных двигателей также используется в промышленности. В работах созданной им научной школы последовательно и достаточно подробно рассматриваются вопросы надёжности электрических машин. Согласно этим исследованиям, отказ системы изоляции обмоток является основной причиной выхода из строя большинства низковольтных электрических машин. Также установлено, что

для системы изоляции этих машин наиболее слабым элементом является витковая изоляция. Однако, расчётно-экспериментальные методы определения надёжности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей, разработанные во главе с Ю. П. Похолковым, очень трудоёмки [88].

В работах Ю. П. Похолкова и В. В. Пыхтина было предварительно обосновано, что трещинообразование в изоляции приводит к потере электрической прочности диэлектрика. В свою очередь, в диссертационной работе С. С. Марьина [Там же] изучены процессы образования трещин в полимерных материалах и разработана методика расчета долговечности системы межвитковой изоляции низковольтных электрических машин, основанной на теории прорастания сквозных трещин. Одним из результатов работы Марьина является установление взаимосвязи механической и электрической стойкости электроизоляционных систем: «напряжение пробоя различных типов низковольтной межвитковой изоляции электрических машин уменьшается с ростом скорости дефектообразования». Другими словами «рабочий ресурс межвитковой изоляции низковольтных электрических машин определяется скоростью образования сквозных трещин в процессе эксплуатации». За основу была взята термофлуктуационная теория прочности полимеров, разработанная С. Н. Журковым и его учениками. В качестве объектов исследования С. С. Марьин использовал макеты в виде попарно связанных отрезков обмоточного провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155 и ПЭТМ-180, пропитанных погружением составами марок МЛ-92 и КО-916К.

Испытания на надёжность изоляции тесно связаны с нагревостойкостью применяемых в них материалов и конструкций, особенно для электрических машин. Серия таких стандартов как ГОСТ 27905.1-88, ГОСТ 27905.2-88 и ГОСТ 27905.3-88 [53,54,55] устанавливает порядок оценки и требования испытаний для систем электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость устанавливает ГОСТ 10518-88 [48], на основе которого должны разрабатываться методики для конкретных материалов и конструкций. Учесть влияние агрессивных сред возможно применением метода

ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость по ГОСТ Р 51372-99 [63].

Существует также прямой метод эксплуатационных испытаний. Для этого согласно РД 50-690-89 [124] определяется необходимый объём испытаний для выбранного плана, который может оказаться затруднительным для выполнения. Также для этого потребуется затратить большое количество времени, связанное с вынужденными простоями оборудования по технологическим причинам. При этом точность проводимых испытаний возрастает с увеличением количества задействованных в них образцов.

При очень больших длительностях испытаний может применяться форсирование, т.е. усиление влияния отдельных факторов. Однако, данный метод нежелателен, так как при этом может искажаться общий характер износа испытуемого изделия [21]. Желательно проведение ресурсных испытаний при нагрузках близких к номинальным.

Контроль состояния изоляции асинхронных двигателей современными методами может быть [39]:

- повышенным напряжением;
- по частичным разрядам;
- добротно-ёмкостный;
- по сопротивлению изоляции;
- по коэффициенту абсорбции;
- по тангенсу угла диэлектрических потерь;
- акустический;
- с использованием нечёткой логики.

Согласно описанию Н. Л. Кузнецова основным критерием работоспособности изоляции является пробивное напряжение, которое характеризует состояние наиболее «слабого звена» [84]. В равномерном электрическом поле величина напряженности во всех точках одинакова, в неравномерном – различна и определяется наибольшей напряженностью поля. При достижении предельного для данного диэлектрика значения напряженности происходит его пробой.

Протекание различных процессов повреждения в ПЛЭН приводит к изменению выходного параметра – пробивного напряжения U . Через некоторый случайный промежуток времени работы изделия при достижении параметром своего предельного значения U_{np} возникнет отказ. Постепенные (износные) отказы возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия [116,126]. Поэтому в данном случае будет иметь место постепенный отказ при присутствии процессов старения. Согласно А. С. Проникову [116] «процессом старения называется необратимое изменение свойств или состояния материала изделия в результате действия различных факторов».

При выходе параметра изделия за предельное значение, оно становится неработоспособным согласно требованиям, установленным техническими нормативами [Там же]. Поэтому отказ изоляции плёночных электронагревателей носит признаки параметрического. Такой отказ является наиболее характерным видом для изделий, в отличие от отказов функционирования.

В данной работе целесообразно обратить внимание на выводы, сделанные в научном обзоре [92] по оценке долговечности изоляции электрических машин. Часть из них справедливо можно отнести к предмету исследований настоящей работы:

- 1) Общепринятым параметром, по которому оценивается электрическая прочность изоляции, является пробивное напряжение – минимальное напряжение, при котором происходит пробой изоляции.
- 2) Пробивное напряжение является интегральной характеристикой состояния изоляции, отражающее влияние всех деградиационных процессов, происходящих в изоляции.
- 3) Пробивное напряжение является разрушающим параметром, определение которого сопровождается разрушением испытываемого образца.
- 4) Испытания изоляции можно проводить на макетах, но для этого требуется достаточно точное воспроизведение условий эксплуатации. Предпочтительно и менее трудоёмко испытывать изоляцию реально эксплуатировавшихся машин.

Образцы для испытания изоляции целесообразно подбирать из числа электрических машин, поступающих в ремонт.

5) Сопротивление изоляции, как показатель степени старения изоляции непригодно. Посредством измерения сопротивления изоляции можно выявить только явные дефекты, например металлических замыканий. Связь между пробивным напряжением и сопротивлением изоляции не установлена. Поэтому многие авторы считают измерение сопротивления изоляции бесполезным.

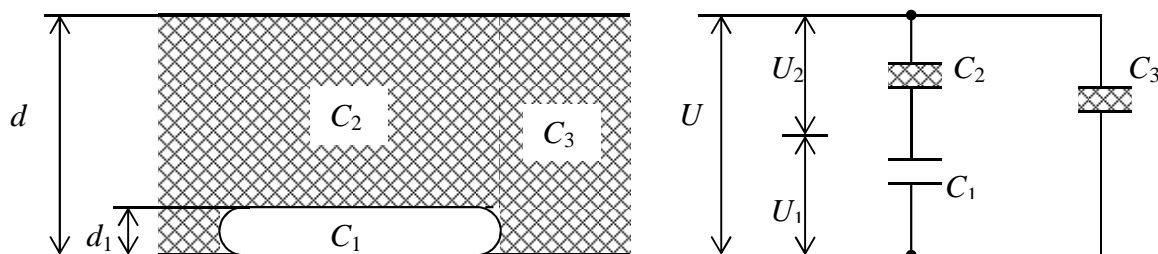
Таким образом, были рассмотрены основные методы определения надёжности изоляции. Конструкция ПЛЭН существенно отличается от электрических двигателей, так как нагреватели имеют открытую поверхность, с которой происходит равномерная отдача тепла. Поэтому разработанные модели надёжности изоляции электрических машин не могут быть применены к рассматриваемым нагревателям без учёта их особенностей. Испытания плёночных электронагревателей предпочтительно проводить на натуральных образцах. Эксплуатационные испытания не требуют специальных технических средств их реализации, но имеют большую длительность. В отличие от них, ускоренные испытания менее продолжительны, но не адаптированы к испытаниям ПЛЭН и, поэтому, нуждаются в значительной доработке.

1.5 Механизмы пробоя твёрдой изоляции

Перед пробоем в диэлектрике обычно возникают частичные разряды (ЧР) – это разряды в газовых включениях твёрдой или жидкой изоляции. Поры и расслоения в твёрдой изоляции, заполненные газом (рисунок 1.5), образуются в процессе изготовления и эксплуатации (результате резких смен температур, неполных пробоев, растрескивания под действием механических нагрузок) [45]. ЧР обычно приводят к местному разрушению изоляции, а при длительном существовании – и к сквозному пробоем диэлектрика [23].

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твёрдой изоляции оказывают её температура и толщина, а также время приложения напряжения. На

характеристической зависимости пробивного напряжения изоляции от времени его приложения, изображённой на рисунке 1.6, выделяются различные области происходящих процессов [23].

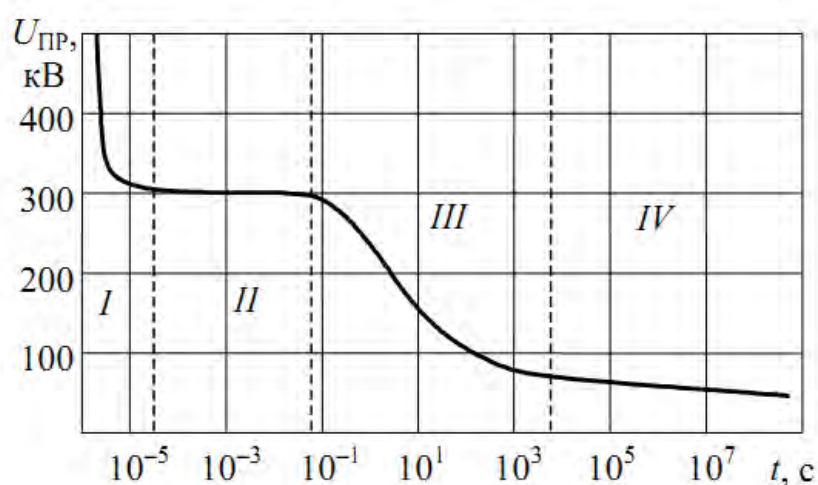


d и d_1 – соответственно толщина диэлектрика и газовой полости;

U – приложенное напряжение; U_1 – напряжение на газовой полости;

C_1 и C_2 – соответственно емкости газовой полости и последовательно включенного с ней диэлектрика; C_3 – емкость бездефектной изоляции

Рисунок 1.5 – Разрез и схема замещения изоляции с газовым включением



I – электрический пробой с запаздыванием развития канала разряда;

II – электрический пробой, не зависящий от температуры;

III – тепловой пробой; *IV* – старение

Рисунок 1.6 – Вольт-временная характеристика твёрдой изоляции

Изучением пробоя твёрдых диэлектриков занимались ведущие отечественные учёные: А. Ф. Иоффе, А. А. Смуров, Я. И. Френкель, В. Франц, А. А. Воробь-

ёв, В. А. Чуенков, Г. И. Сканави, Н. П. Богородицкий, В. С. Дмитриевский, А. С. Зингерман, Д. В. Разевиг, Г. А. Воробьёв и многие другие.

Согласно научно-технической литературе различают три основных вида пробоя диэлектриков [37,38,43,79,81]. Каждый из них может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля, времени воздействия напряжения, наличия в диэлектрике дефектов, толщины материала, условий охлаждения и т. д. [101].

Основные теории пробоя твёрдых диэлектриков были обобщены в работе Е. В. Кисляковой [79]. Согласно её описанию, наиболее изученным является механизм теплового пробоя, для которого имеется теория, согласующаяся с экспериментом. Электрический пробой имеет два основных направления представляемой теории происходящего процесса. Работы Г. А. Воробьева, А. Хиппеля, Г. Фрелиха, В. Франца объясняют электрический пробой как ударную ионизацию электронами и составляют первый подход. Второй подход, рассматриваемый научной школой Ю. Н. Вершинина, представляет данный процесс в виде результата перегревной тепловой неустойчивости и процессов электронной детонации под действием сильного электрического поля. К настоящему времени теория электрического старения диэлектриков также хорошо изучена.

Электрический (электронный) пробой протекает за время 10^{-8} – 10^{-5} с., объясняется ударной ионизацией ускоренными в электрическом поле электронами [43]. Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам решетки и разогревают ее вплоть до плавления. При этом вероятно появление трещин или полное разрушение изолятора [101].

Как правило, электрический пробой твёрдых диэлектриков происходит в результате перенапряжений в диэлектриках с однородной структурой, когда влияние остальных воздействий, обуславливающих пробой, практически исключено [79]. Существующие в настоящее время основные теории электрического пробоя твёрдых диэлектриков делятся на классические, квантово-механические теории пробоя неударным механизмом и ударной ионизации электронами.

Влияние электрического поля на старение изоляции в электрических машинах подытоживает И. П. Жерихин [74]: данные эксплуатации и экспериментальных исследований показывают, что в машинах с номинальным напряжением менее 6 кВ явлений электрического старения не наблюдается.

Электротепловой пробой вызван прогрессивно нарастающим выделением теплоты в диэлектрике под действием диэлектрических потерь в местах наихудшего теплоотвода образца за время 10^{-3} – 10^2 с. [43]. Явление теплового пробоя происходит в том случае, если имеет место лавинообразное увеличение выделяющейся в диэлектрике тепловой энергии при незначительном её рассеянии в данных условиях, и повышении температуры материала до значений, приводящих к плавлению и т.д. [101].

Электрохимический пробой (электрическое старение) полимеров вызвано возникающими в течение длительного времени (10^3 – 10^8 с.) частичными разрядами и при напряжённости значительно меньшей пробивного значения диэлектрика. Это приводит к медленному изменению химического состава и структуры диэлектрика [43].

Под воздействием внешних факторов в диэлектрике начинают протекать необратимых химические процессы, приводящие к снижению его электрической прочности [79]. Вероятность электрохимического пробоя материалов становится высокой при повышенных температурах и высокой влажности воздуха [101].

Природа диэлектрика и условия определения пробивной напряжённости $E_{пр}$ или эксплуатации определяют развитие определённой формы пробоя диэлектрика. При кратковременных воздействиях во время испытаний длительностью 10^{-8} – 10^{-5} с. происходит электрический пробой, если отсутствуют разряды на краях электродов. При выдержке такого же диэлектрика, с большой удельной объёмной проводимостью и резкой зависимостью от температуры, под напряжением в течение 10^{-3} – 10^{-2} с. в нём развивается тепловой пробой. Электрохимический пробой наблюдается при воздействии на такой же образец в течение длительного времени меньших напряжений, обуславливающих частичные разряды и старение материала [43].

1.6 Цель и задачи исследования

К настоящему времени механизм старения изоляции и методика определения ресурса плёночных электронагревателей не определены. К тому же вопросы, связанные с изучением долговечности ПЛЭН не исследованы. Также неизвестно поведение данных нагревателей в довольно тяжёлых условиях эксплуатации электрооборудования на свиноводческих фермах. Поэтому пока невозможно установить чёткие технические требования условий эксплуатации и, соответственно, контролировать их соблюдение для предотвращения преждевременных отказов и повышения надёжности электрооборудования.

Изучение указанных вопросов целесообразно проводить на основании ускоренных испытаний рассматриваемого электрооборудования. При этом возможно значительно сократить затраты времени и материальных средств для оценки ресурса плёночных электронагревателей. Также только на основе полученных научных результатов предприятия-изготовители смогут обосновать заявляемый гарантийный срок службы и срок эксплуатации ПЛЭН. В ходе испытаний возможно выявление некоторых ошибок в технологии изготовления плёночных электронагревателей и формулирование соответствующих рекомендаций по их устранению.

Существующие методы ускоренных испытаний изоляции электрических машин не применимы для плёночных электронагревателей. Имеющиеся методы эксплуатационных испытаний требуют слишком длительного периода их реализации. Новая методика ускоренных испытаний в перспективе должна быть применена для других типов плёночных электронагревателей, а возможно, для всех устройств, содержащих плёночные изоляционные материалы.

Из выше сказанного вытекает **цель диссертационной работы**: прогнозирование ресурса плёночных электронагревателей в животноводстве на основе разработанной методики ускоренных испытаний по результатам изменения пробивного напряжения их изоляции (на примере работы ПЛЭН в условиях свиноводства).

Для достижения этой цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1. Разработать вероятностную модель и алгоритм статистического моделирования для оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей, а также обосновать функцию результирующей надёжности этих нагревателей.
2. Разработать методику оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний на эксплуатационных режимах воздействующих факторов и технические средства её реализации.
3. Установить факторы, влияющие на долговечность ПЛЭН, с учётом режима их работы, а также аналитические зависимости скорости изменения пробивного напряжения от этих факторов и показатели изменения пробивного напряжения элементов плёночных электронагревателей от наработки.
4. Произвести оценку ресурса ПЛЭН по разработанной методике на основе ускоренных испытаний и сопоставить её результаты с данными эксплуатационных наблюдений в свиноводстве.

Глава 2 Теоретическое обоснование ускоренной оценки ресурса плёночных электронагревателей

В первую очередь для ускоренной оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей проводится обоснование детерминированной математической модели. Далее, на её основании, проводится разработка вероятностной модели прогнозирования ресурса элементов и обоснование функции результирующей надёжности нагревателей. Рассматриваются отдельные параметры, входящие в описываемую математическую модель, в частности показатель изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки. Зависимость скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих факторов представляется в виде уравнения регрессии. Прогнозирование ресурса элементов изоляции плёночных электронагревателей также возможно методом статистического моделирования.

2.1 Обоснование детерминированной модели ресурса элементов плёночных электронагревателей

Надёжность и безопасность эксплуатации электрооборудования плёночных электронагревателей определяется состоянием его изоляции. Электрическая изоляция должна выполнять свои функции при применении по назначению. Способность электроизоляционного материала выполнять функции электрической изоляции заключается в проявлении им гарантированных диэлектрических свойств при сохранении механической целостности [62]. Однако, до настоящего времени длительность времени выполнения ПЛЭН этой функции не исследовалась.

Из требований безопасности, предъявляемых к диэлектрическим материалам, используемых для изготовления изоляции, доминирующее значение имеет запас электрической прочности, проверяемый повышенным напряжением. Установлено, что если изоляция электроустановки успешно прошла профилактические

испытания, то она не станет причиной отказа в течение времени использования, установленного нормами. Практика подтверждает необходимость таких испытаний [89].

Согласно ГОСТ Р 51180-98 показателем безопасности плёночных электроизоляционных материалов принимается пробивное напряжение, а ГОСТ 6433.3-71 регламентирует методы их испытаний. Таким образом, в качестве определяющего параметра состояния изоляции ПЛЭН следует использовать пробивное напряжение [40,62].

Приложение повышенного напряжения создает в испытываемом диэлектрике увеличенную напряженность электрического поля, что позволяет обнаруживать дефекты, вызвавшие недопустимое для дальнейшей эксплуатации электрооборудования снижение электрической прочности его изоляции. Испытание повышенным напряжением позволяет выявить дефекты изоляции, не обнаруживаемые другими способами [40].

Ресурс ПЛЭН определяется наработкой достижения параметром технического состояния (ПТС) своего предельного значения. В условиях эксплуатации изоляция плёночных электронагревателей подвержена воздействию большого количества изменяющихся во времени случайных факторов, оказывающих значительное влияние на её ресурс.

При наблюдении за динамикой нарастания износа в строго определенных, постоянных во времени условиях изнашивания, которые можно обеспечить при испытании объекта на установке, функция износа от наработки будет иметь вполне определенный детерминированный вид. Вид данной функции в этом случае определяется конструктивно-технологическими особенностями рассматриваемого элемента и характеристикой внешних условий изнашивания.

При обосновании закона распределения отказов, по мнению Г. В. Дружинина, необходимо соблюдать следующие принципы: «Для выбора типа теоретического распределения наработки до отказа целесообразно использовать информацию об изменениях в объектах перед возникновением отказов. Для этого необходимо знать, в результате каких физических процессов появляется со-

ответствующее распределение. Иначе говоря, выбранному теоретическому распределению наработки до отказа должна соответствовать определённая модель приближения объекта к отказу. Желательно, чтобы эти модели были физическими, т.е. обобщали основные особенности физических процессов приближения к отказам» [68].

Наиболее универсальной зависимостью ПТС от наработки, отображающей широкий спектр процессов эксплуатации объектов электрооборудования, является степенная функция, использованная в работах Г. В. Дружинина, Б. С. Сотскова, Е. Г. Мякинина [98], А. Е. Немировского [100], В. А. Буторина [21], В. Д. Девяткова [66], М. С. Швецова [145], К. П. Вовденко [31] и других учёных. В связи с этим зависимость текущей величины напряжения пробоя изоляции от наработки ПЛЭН можно представить в виде [17]

$$U = U_0 - V \cdot t^\alpha, \quad (2.1)$$

где U – пробивное напряжение изоляции, В;

U_0 – пробивное напряжение изоляции после периода стабилизации, В;

V – величина, характеризующая скоростной режим старения, В/ч ^{α} ;

t – наработка, ч;

α – безразмерный показатель процесса старения, определяющий характер изменения пробивного напряжения от наработки (рисунок 2.1).

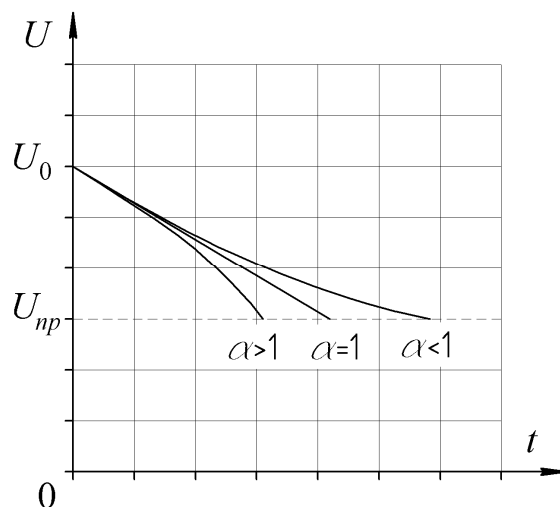


Рисунок 2.1 – Характер изменения пробивного напряжения изоляции при постоянных условиях изнашивания в зависимости от наработки

Выражаем время работы элемента t

$$t^\alpha = \frac{U_0 - U}{V},$$

$$t = \left[\frac{U_0 - U}{V} \right]^{1/\alpha}. \quad (2.2)$$

Непосредственно поддающейся экспериментальному определению величиной при проведении испытаний является пробивное напряжение U . Введём в рассмотрение скорость изменения пробивного напряжения y от наработки

$$y = \frac{dU}{dt}. \quad (2.3)$$

Из выражения (2.1), взяв производную по времени, определим значение скорости изменения пробивного напряжения

$$y = -\alpha V \cdot t^{\alpha-1}. \quad (2.4)$$

Откуда после преобразований при наработке $t = 1$, от начала ускоренных испытаний после периода стабилизации, имеем

$$V = -\frac{y(t=1)}{\alpha} \cdot \mu, \quad (2.5)$$

где $y(t=1)$ – скорость изменения пробивного напряжения при единичной наработке, В/ч;

μ – коэффициент, введённый для согласования размерности, $\mu = 1$ [единица времени^{1- α}].

За единичную наработку $t = 1$ принимается необходимый временной интервал, отсчитываемый от начала ускоренных испытаний после периода стабилизации, согласно разрабатываемой методике их проведения. Впоследствии все вычисления производятся в выбранной размерности.

Выражение (2.5) показывает, что параметр V численно равен скорости изменения пробивного напряжения, уменьшенного в α раз, при наработке, равной единице [93].

Выразим наработку элемента с использованием $y(t=1)$. При подстановке значения V из (2.5) в выражение (2.2), получаем

$$t = \left[-\frac{(U_0 - U) \cdot \alpha}{y(t=1) \cdot \mu} \right]^{1/\alpha},$$

$$t = \left[\frac{\alpha(U - U_0)}{y(t=1) \cdot \mu} \right]^{1/\alpha}. \quad (2.6)$$

При достижении предельного значения пробивного напряжения изоляции $U = U_{np}$ наступает отказ ПЛЭН. В этом случае наработка t в последнем выражении будет равна ресурсу T , для которого согласно (2.6) можем записать

$$T = \left[\frac{\alpha(U_{np} - U_0)}{y(t=1) \cdot \mu} \right]^{1/\alpha}, \quad (2.7)$$

где T – ресурс, ч;

U_{np} – предельное значение пробивного напряжения изоляции, В.

Таким образом, получено детерминированное выражение для оценки ресурса элементов ПЛЭН, которое может быть использовано для получения вероятностной модели оценки ресурса этих нагревателей. Это же выражение может быть применено для статистического моделирования ресурса элементов. Определив значения величин, входящих в выражение (2.7), по результатам испытаний плёночных электронагревателей на пробивное напряжение, станет возможным оценить ресурс данных элементов.

2.2 Разработка вероятностной модели оценки ресурса плёночных электронагревателей

Из выражения (2.1) при наработке ПЛЭН равной ресурсу следует, что последний определяется следующим образом

$$T = \alpha \sqrt[\alpha]{\frac{U_0 - U_{np}}{V}}. \quad (2.8)$$

Приведённые параметры U_0 , U_{np} и α для каждого элемента плёночных электронагревателей имеют определенное постоянное значение. Величина U_0 определяется после периода стабилизации по результатам замеров. Предельное значение

пробивного напряжения $U_{пр}$ обуславливается недопустимостью дальнейшей эксплуатации рассматриваемой изоляции с точки зрения безопасности и несет вполне определенное значение согласно действующим нормативным документам [123]. Показатель α определяет характер изменения пробивного напряжения от наработки, отражает конструктивные особенности и технологию изготовления ПЛЭН [19,93].

Из анализа зависимости (2.8) и выше сказанного следует, что ресурс изоляции плёночных электронагревателей является функцией одной случайной величины V , определяемой множеством эксплуатационных факторов (температура изоляции, напряжение сети, характеристик среды – влажность, загазованность, запыленность и т.д.) и характеризующей внешние условия изменения параметра состояния ПЛЭН. Согласно центральной предельной теореме А. М. Ляпунова, если случайная величина X представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало, то X имеет распределение, близкое к нормальному [46]. На основании только что сказанного и согласно проводившимся исследованиям [76,84,97,116,118] рассматриваемая величина распределена по нормальному закону

$$f(V) = \frac{1}{\sigma_V \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(V - m_V)^2}{2\sigma_V^2}\right], \quad (2.9)$$

где m_V, σ_V – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины V .

Пробивное напряжение U , как видно из (2.1), является линейной функцией случайной величины V , распределённой по нормальному закону (2.9). Тогда в каждый фиксированный момент времени U тоже будет нормальной случайной величиной, с плотностью распределения [28]

$$f(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(U - m_U)^2}{2\sigma_U^2}\right], \quad (2.10)$$

где m_U, σ_U – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения U .

При этом математическое ожидание m_U и среднеквадратическое отклонение σ_U пробивного напряжения соответственно выражаются через параметры m_V и σ_V величины V по формулам [Там же]

$$m_U = U_0 - m_V t^\alpha, \quad \sigma_U = \sigma_V t^\alpha. \quad (2.11)$$

Вид плотности распределения $f(U)$ меняется в зависимости от наработки, так как согласно выражениям (2.11) от неё зависят m_U и σ_U . Вероятность безотказной работы P элемента ПЛЭН в некоторый (фиксированный) момент времени t есть вероятность того, что в этот момент текущее значение напряжения пробоя его изоляции U больше некоторой заранее известной предельной величины U_{np} ($U > U_{np}$) [84], поэтому

$$P = \int_{U_{np}}^{\infty} \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(U - m_U)^2}{2\sigma_U^2}\right] dU. \quad (2.12)$$

С помощью замены переменной $x = (U - m_U) / \sigma_U$ интеграл (2.12) выражается через функцию Лапласа $\Phi(x)$ [28]

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (2.13)$$

Сделав в интеграле (2.12) замену переменных и, соответственно, изменив пределы интегрирования, получим

$$P = \Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{U_{np} - m_U}{\sigma_U}\right). \quad (2.14)$$

Так как $\Phi(\infty) = 0,5$ и $\Phi(-x) = -\Phi(x)$, то выражение (2.14) можно преобразовать к виду

$$P = 0,5 + \Phi\left(\frac{m_U - U_{np}}{\sigma_U}\right). \quad (2.15)$$

Подставляя в формулу (2.15) значения m_U и σ_U из равенств (2.11), приходим к выражению для вероятности безотказной работы $P(t)$ элементов плёночных электронагревателей в некоторый момент времени

$$P(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{U_0 - U_{np} - m_V t^\alpha}{\sigma_V t^\alpha}\right). \quad (2.16)$$

Согласно полученному выражению (2.16) вероятность безотказной работы элементов ПЛЭН, зависит от параметров распределения V . Реализация данного выражения требует знания математического ожидания m_V и среднеквадратического отклонения σ_V . Однако непосредственно поддающейся экспериментальному определению величиной является пробивное напряжение U .

Параметры m_V и σ_V можно соответственно выразить через математическое ожидание $m_{y(t=1)}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{y(t=1)}$ случайной величины y при единичной наработке, т.к. согласно равенству (2.5) между рассматриваемыми величинами существует линейная связь:

$$m_V = -\frac{m_{y(t=1)}}{\alpha} \cdot \mu, \quad \sigma_V = \frac{\sigma_{y(t=1)}}{\alpha} \cdot \mu. \quad (2.17)$$

После подстановки значений m_V и σ_V из равенств (2.17) в (2.16), получим окончательное выражение для вероятности безотказной работы $P(t)$ элементов ПЛЭН в некоторый (фиксированный) момент времени

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left(\frac{U_0 - U_{np} + \frac{m_{y(t=1)}}{\alpha} \cdot \mu \cdot t^\alpha}{\frac{\sigma_{y(t=1)}}{\alpha} \cdot \mu \cdot t^\alpha} \right). \quad (2.18)$$

Все величины, входящие в конечную формулу (2.18), могут быть определены экспериментальным путем. Таким образом, получено выражение вероятности безотказной работы $P(t)$ элементов плёночных электронагревателей, которое в дальнейшем может быть использовано для оценки их ресурса при любом значении этой вероятности.

В нашем случае поведение изоляции ПЛЭН будет происходить согласно модели «слабейшего звена», аналогично разработанной О. Д. Гольдбергом модели надёжности статорных обмоток асинхронных двигателей [84,92]. Согласно данной модели изоляция плёночных электронагревателей представляет собой систему с последовательным соединением элементов, в которой при отказе одного элемента выходит из строя вся цепь. Надёжность ПЛЭН в целом будет определяться как произведение значений надёжности для его отдельных элементов [47,84]

$$P_{\text{ПЛЭН}}(t) = [P_1(t)]^{r_1} \cdot [P_2(t)]^{r_2} \cdot \dots \cdot [P_s(t)]^{r_s}, \quad (2.19)$$

где $P_1(t), P_2(t), \dots, P_s(t)$ – вероятности безотказной работы отдельных элементов ПЛЭН;

r_1, r_2, \dots, r_s – количество одинаковых элементов в составе ПЛЭН.

Из функции вероятности безотказной работы можно получить графическое представление плотности распределения ресурса. Для получения более наглядной информации о ресурсе элементов ПЛЭН установим аналитическое выражение плотности распределения этого ресурса. Исходя из выражений (2.8), (2.9) и приведённых к ним пояснений, функцию плотности распределения ресурса $g(T)$ можно найти, используя равенство [28]

$$g(T) = f[V(T)] \cdot |V'(T)|, \quad (2.20)$$

где $f[V]$ – функция плотности распределения величины V ;

$V(T)$ – функция величины V в зависимости от ресурса, обратная (2.8);

$|V'(T)|$ – абсолютное значение первой производной функции $V(T)$.

После соответствующих вычислений получаем

$$f[V(T)] = \frac{1}{\sigma_V \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_V^2} \left(\frac{U_0 - U_{np}}{T^\alpha} - m_V \right)^2 \right],$$

$$V'(T) = -\alpha \frac{U_0 - U_{np}}{T^{\alpha+1}}.$$

После подстановки полученных выражений в равенство (2.20) находим плотность распределения ресурса элементов ПЛЭН

$$g(T) = \frac{\alpha(U_0 - U_{np})}{\sigma_V \sqrt{2\pi} \cdot T^{\alpha+1}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_V^2} \left(\frac{U_0 - U_{np}}{T^\alpha} - m_V \right)^2 \right]. \quad (2.21)$$

Для реализации выражения (2.21) необходимо иметь сведения о значении параметров m_V и σ_V . Математическое ожидание m_V и среднеквадратическое отклонение σ_V величины V ранее были соответственно выражены через экспериментально определяемые значения $m_{y(t=1)}$ и $\sigma_{y(t=1)}$ случайной величины y при единичной наработке. Тогда после подстановки полученных значений m_V и σ_V из ра-

венств (2.17) в (2.21) окончательное выражение плотности распределения ресурса элементов ПЛЭН будет выглядеть следующим образом

$$g(T) = \frac{\alpha^2 (U_0 - U_{np})}{\sigma_{y(t=1)} \cdot \mu \sqrt{2\pi} \cdot T^{\alpha+1}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\alpha (U_0 - U_{np})}{T^\alpha \cdot \sigma_{y(t=1)} \cdot \mu} + \frac{m_{y(t=1)}}{\sigma_{y(t=1)}} \right)^2 \right]. \quad (2.22)$$

Согласно определению, средним ресурсом является математическое ожидание ресурса, которое может быть определено по следующей формуле [46,47,117]

$$m_T = \int_0^{\infty} T \cdot f(T) dT. \quad (2.23)$$

На основании определения гамма-процентный ресурс T_γ является таким ресурсом, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах [61]. Тогда вероятность безотказной работы для T_γ наработки можно выразить в виде формулы [146]

$$R(T_\gamma) = 1 - \int_0^{T_\gamma} f(T) dT, \quad (2.24)$$

где T_γ – гамма-процентный ресурс, ч.

Из приведённого выражения (2.24) можно получить искомое значение гамма-процентного ресурса при заданной вероятности безотказной работы.

Для реализации полученной плотности распределения ресурса $g(T)$ элементов ПЛЭН (2.22) необходимо знать три параметра: $m_{y(t=1)}$, $\sigma_{y(t=1)}$ и α . Эти параметры могут быть определены по результатам ускоренных или эксплуатационных испытаний. Полученная функция (2.19) вероятности безотказной работы $R_{ПЛЭН}(t)$ плёночных электронагревателей позволит произвести оценку любого γ -процентного ресурса изделия, являющейся основной характеристикой долговечности. Сокращение времени испытаний на надёжность позволит применение теории активного планирования эксперимента [75,84].

2.3 Показатель изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки

При строго постоянных условиях испытаний функция изменения пробивного напряжения изоляции от наработки будет иметь детерминированный вид, определяемый показателем α . Для определения этого показателя необходимо, чтобы воздействие факторов, влияющих на ресурс изоляции плёночных электронагревателей, было строго постоянным.

Приведём выражение (2.1) к виду функции отклика для линейной модели $y = b_0 + b_1 \cdot x_1$ [2,10], с обозначением в качестве абсциссы наработки изделия, а ординаты – пробивного напряжения:

$$\begin{aligned} U_0 - U &= V \cdot t^\alpha, \\ \lg(U_0 - U) &= \lg(V \cdot t^\alpha), \\ \lg(U_0 - U) &= \lg(V) + \alpha \cdot \lg(t). \end{aligned}$$

Тогда значение показателя α для элементов изоляции можно рассчитать согласно методу наименьших квадратов следующим образом [2,10,47,93,122]

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.25)$$

где n – число экспериментальных точек наблюдения;

$x_i = \lg(t_i)$ – логарифм значения наработки t_i от начала наблюдения до замера величины изменения пробивного напряжения U_i ;

$y_i = \lg(U_0 - U_i)$ – логарифм значения изменения пробивного напряжения изоляции за наработку t_i .

В реальных условиях эксплуатации установление постоянных значений влияющих факторов практически невозможно. В связи с этим для определения показателей α проводятся серии опытов на испытательной установке. При этом основные воздействующие факторы, оказывающие существенное влияние на старение изоляции, поддерживаются на одном уровне в течение всего эксперимента.

2.4 Зависимость скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих факторов

При эксплуатации ПЛЭН на их изоляцию воздействует большое количество факторов [14,82,118,120]. Поэтому получение аналитической зависимости выходного параметра $y(t=1)$ от действующих факторов обычными методами однофакторного эксперимента является сложной задачей, но вполне возможно для многофакторного эксперимента, реализованного путём проведения ускоренных испытаний [21]. В настоящей работе предполагается проведение ускоренных испытаний натуральных образцов ПЛЭН при воспроизведении на установке основных эксплуатационных факторов.

Скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей при фиксированной наработке представим в виде функции отклика [18,20,29,67,69,75]

$$y(t=1) = f(X_1, X_2, \dots, X_k), \quad (2.26)$$

где $y(t=1)$ – выходной параметр (отклик);

X_1, X_2, \dots, X_k – факторы, влияющие на скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН.

После разложения искомой функции (2.26) в степенной ряд она примет следующий полиномиальный вид [2,103]

$$y(t=1) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot X_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} \cdot X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot (X_i)^2 + \dots, \quad (2.27)$$

где $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}, \dots$ – коэффициенты регрессии, характеризующие степень влияния каждого фактора и их сочетаний на скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН.

Для определения значений коэффициентов регрессии полинома проводится многофакторный эксперимент. Воздействующие факторы поддерживаются на одинаковом уровне в течение одного опыта. На основании результатов ускоренных испытаний по матрице планирования многофакторного эксперимента опре-

деляются выборочные оценки коэффициентов регрессии. С учетом этого выражение (2.27) примет вид [29]

$$y(t=1) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cdot x_i + \sum_{i<j}^k A_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} \cdot (x_i)^2 + \dots, \quad (2.28)$$

где $A_0, A_i, A_{ij}, A_{ii}, \dots$ – выборочные оценки коэффициентов регрессии, характеризующие степень влияния каждого основного фактора на скорость изменения ПТС элементов ПЛЭН;

x_1, x_2, \dots, x_k – основные действующие факторы в кодированном виде.

Значение коэффициента A_0 в уравнении регрессии (2.28) близко к среднему по всем опытам значению функции отклика, то есть по физическому смыслу соответствует средней скорости изменения ПТС элементов ПЛЭН. Величина коэффициентов A_i, A_{ij}, A_{ii} в физическом смысле показывает, насколько изменится значение функции отклика, если фактор при них изменить на величину интервала варьирования [90].

Основные действующие факторы при фиксированной наработке являются случайными величинами. Следовательно, скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей $y(t=1)$, как их функция, также является случайной величиной, описываемая определенным законом распределения [28]. Этот же закон определяется видом законов распределения основных действующих факторов.

Необходимо рассмотреть способ определения скорости изменения пробивного напряжения при наработке $t = 1$ во время ускоренных испытаний. Контроль значений этого параметра необходимо осуществлять с помощью соответствующих технических средств. Сначала определим для этого теоретическое выражение. В результате подстановки выражения (2.5) в (2.1) получим следующее равенство

$$U = U_0 + \frac{y(t=1)}{\alpha} \cdot \mu \cdot t^\alpha.$$

Из полученного равенства выразим значение величины $y(t=1)$

$$y(t=1) = \frac{(U - U_0) \cdot \alpha}{\mu \cdot t^\alpha}. \quad (2.29)$$

По полученной формуле определяется скорость старения использованных для ускоренных испытаний образцов, до этого не находившихся в эксплуатации. При использовании только новых изделий для определения $y(t=1)$ возникают значительные экономические затраты. Это связано со стоимостью приобретения данных образцов при планах многофакторных экспериментов со значительным количеством опытов. В данном случае одним из возможных вариантов сокращения затрат на проведение испытаний является использование для ускоренных испытаний изделий с некоторым уже имеющимся износом, но не достигших предельного состояния. Тогда использование формулы (2.29) для определения скорости старения изделий возможно только при значении параметра $\alpha=1$. Во всех остальных случаях данная величина будет найдена некорректно [19].

Рассмотрим вариант использования для ускоренных испытаний частично изношенных изделий. На начало опыта параметр состояния изоляции такого образца будет иметь значение U_i , а к концу его значение составит U_{i+1} (рисунок 2.2). Тогда за время опыта параметр состояния изоляции изменится на величину

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i. \quad (2.30)$$

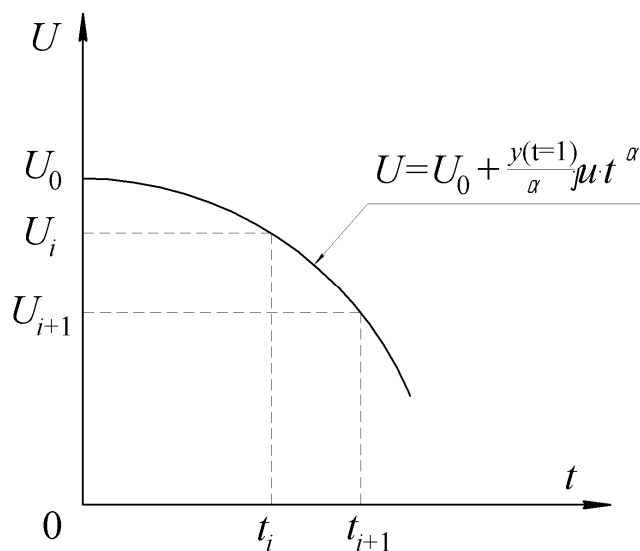


Рисунок 2.2 – Изменение параметра состояния изоляции в зависимости от наработки

Соответственно время изменится от t_i в начале опыта до t_{i+1} к его концу на величину

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i. \quad (2.31)$$

Используя выражение (2.6) можно записать равенство (2.31) в виде

$$\begin{aligned} \Delta t &= \sqrt[\alpha]{\frac{\alpha(U_{i+1} - U_0)}{y(t=1) \cdot \mu}} - \sqrt[\alpha]{\frac{\alpha(U_i - U_0)}{y(t=1) \cdot \mu}}, \\ \Delta t &= \sqrt[\alpha]{\frac{\alpha}{y(t=1) \cdot \mu}} \cdot (\sqrt[\alpha]{U_{i+1} - U_0} - \sqrt[\alpha]{U_i - U_0}). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Из полученного выражения (2.32) находим искомое значение величины $y(t=1)$

$$y(t=1) = \frac{\alpha}{\mu} \cdot \left(\frac{\sqrt[\alpha]{U_{i+1} - U_0} - \sqrt[\alpha]{U_i - U_0}}{\Delta t} \right)^\alpha. \quad (2.33)$$

Таким образом, по результатам ускоренных испытаний скорость изменения пробивного напряжения при заданной наработке будет рассчитываться по одной из полученных формул (2.29) или (2.33).

2.5 Критерии подобия испытаний плёночных электронагревателей

В данной работе используется широко распространённый метод моделирования реальных процессов. Моделирование представляет собой метод экспериментального исследования, заключающегося в замещении объекта исследования, образца (натуры), подобным явлением – модель [65]. При ускоренных испытаниях должно обеспечиваться сходство с реальными процессами изнашивания изоляции испытываемых нагревателей. Для этого величины воздействующих факторов должны находиться в эксплуатационных пределах.

По имеющимся рекомендациям, эксперимент по определению пробивного напряжения следует проводить на натуральных образцах [92]. Таким образом, при ускоренных испытаниях для получения достоверных результатов целесообразно использовать натурные образцы плёночных электронагревателей. За обобщенную

координату процесса изнашивания можно принять интенсивность старения изоляции ПЛЭН [4,21,66,143,145].

Для систем, состоящих из совокупности элементов изоляции плёночных электронагревателей, изнашивающихся в эксплуатационных условиях (натура) и в процессе ускоренных испытаний (модель), скорость изменения параметра их состояния будет представлена в виде функции отклика (2.26) от воздействующих факторов соответственно для природы и модели.

Согласно теории подобия две системы подобны, если выполняется условие: любые соответствующие обобщенные координаты для любых сходственных моментов времени пропорциональны, т.е.

$$y_s(t_s) = k \cdot y_y(t_y), \quad (2.34)$$

где y_s и y_y – скорости старения изоляции плёночных электронагревателей соответственно при эксплуатации и ускоренных испытаниях;

k – коэффициент пропорциональности;

t_s и t_y – сходственные моменты времени соответственно при эксплуатации и ускоренных испытаниях.

Если две системы подобны, тогда, зная коэффициент подобия k и имея данные системы модель, можно определить характеристики системы натура. Во время проведения ускоренных испытаний ПЛЭН регулированием эксплуатационных режимов можно получить различный коэффициент подобия. При $k < 1$ скорость старения изоляции на установке будет меньше чем в эксплуатационных условиях. При $k = 1$ скорость старения изоляции на установке соответствует эксплуатационной, что даёт наиболее точное представление о долговечности испытываемого образца. Также имеет место такой вид испытаний, при котором $k > 1$, т.е. скорость старения изоляции на установке будет больше эксплуатационной за счёт ужесточения какого-либо фактора. Однако форсирование факторов может исказить общую картину изнашивания. Учитывая последнее и для сокращения времени проведения износных испытаний изоляции ПЛЭН, принимаем коэффициент подобия $k = 1$ [21]. Тогда выражение теоремы подобия (2.34) будет иметь следующий вид

$$y_s(t_s) = y_y(t_y). \quad (2.35)$$

В этом случае, из полученного выражения следует, что факторы, влияющие на износ ПЛЭН, при ускоренных испытаниях должны быть учтены в тех соотношениях, что и в эксплуатации. Таким образом, при воспроизводстве условий эксплуатации руководствуемся третьей теоремой подобия (Кирпичева-Гухмана) о необходимых и достаточных условиях для практической реализации подобия [27]: «для подобия явлений должны быть соответственно одинаковыми определяющие критерии подобия и подобны условия однозначности».

В общем случае, единственным условием, необходимым (и достаточным), для подобия явлений является равенство значений комплексов, составленных из заданных по условию величин. Значения, одинаковые для всех подобных между собой явлений, представляют собой характерные количественные признаки каждой группы подобных явлений [65]. Равенство критериев подобия для систем натура и модель обеспечивает возможность переноса экспериментальных результатов, полученных путём физического моделирования, на натурные условия [30].

Для плёночных электронагревателей к условиям однозначности, т.е. определяющим индивидуальные особенности процесса нагрева и выделяющим его из общего класса, являются:

- геометрические свойства системы, включающей в себя ПЛЭН;
- физические параметры среды и ПЛЭН, образующих систему;
- начальное состояние (начальные условия) системы;
- граничные (краевые) условия системы;
- взаимодействие нагревателя и внешней среды.

Таким образом, для соблюдения подобия ускоренных и эксплуатационных испытаний плёночных электронагревателей должны быть выполнены два основных условия: равенство скоростей старения и применение одного типоразмера ПЛЭН.

2.6 Прогнозирование ресурса элементов плёночных электронагревателей методом статистического моделирования

Определение численных значений математического ожидания $m_{y(t=1)}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{y(t=1)}$ случайной величины y при единичной наработке для выражений вероятности безотказной работы (2.18) и плотности распределения ресурса (2.22) элементов ПЛЭН довольно легко производится по известным формулам при значимости в выражении (2.28) только свободного члена и линейных зависимостей, т.е. для полинома первого порядка. В этом случае при композиции нормально распределённых факторов получается снова нормальный закон с параметрами [28]:

$$m_{y(t=1)} = A_0 + A_1 \cdot \overline{X_1} + A_2 \cdot \overline{X_2} + \dots + A_k \cdot \overline{X_k}, \quad (2.36)$$

$$\sigma_{y(t=1)} = \sqrt{A_1^2 \cdot \sigma_{x_1}^2 + A_2^2 \cdot \sigma_{x_2}^2 + \dots + A_k^2 \cdot \sigma_{x_k}^2}, \quad (2.37)$$

где $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_k}$ – натуральные средние значения значимых факторов;

$\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_k}$ – средние квадратические отклонения значимых факторов.

При значимости линейных взаимодействий, квадратичных членов, т.е. для полиномов с линейными взаимодействиями, второго и более высоких порядков применение ранее приведённых формул может привести к неверным результатам. В этом случае данная задача успешно решается применением метода Монте-Карло – статистического моделирования [19,66,145], состоящего в замене значений параметров реальных случайных процессов также случайными данными, выдаваемыми в данном случае ЭВМ.

Один из методов моделирования следующий [73]: «исходной для моделирования нужной случайной величины является случайная величина, равномерно распределенная на $[0; 1]$ ». Полученные значения будут представлять собой интегральную функцию закона распределения $F(x_i)$. Значения аргумента для известного заданного закона распределения можно выразить явно через $F(x_i)$, и определить ряд случайных значений аргумента.

С помощью ЭВМ составляется случайный ряд распределения значений каждого основного фактора, влияющего на ресурс элементов изоляции ПЛЭН. В настоящее время существует достаточное количество программных продуктов, позволяющих выводить случайные значения для определённого закона распределения.

Согласно методу [129] производится многократный расчёт ресурса элементов изоляции плёночных электронагревателей по формуле (2.7) с учётом степени влияния значимых факторов, определяемой по выражению (2.28). Полученные случайные значения факторов будут определять значение ресурса элементов для данных условий и, в совокупности, составят статистическое испытание. При большом числе повторов статистических испытаний получается ряд значений ресурса, моделирующий реальные процессы старения изоляции. Разработанная согласно стандарту [51] структурная схема моделирующего алгоритма для прогнозирования представлена на рисунке 2.3.

Если значения скорости изменения пробивного напряжения при обработке результатов экспериментов берутся положительными, то формулу (2.7) для исключения ошибок вычислений рекомендуется представить в виде

$$T_i = \alpha \sqrt{\frac{\alpha(U_{np} - U_0)}{-|y(t=1)| \cdot \mu}}. \quad (2.38)$$

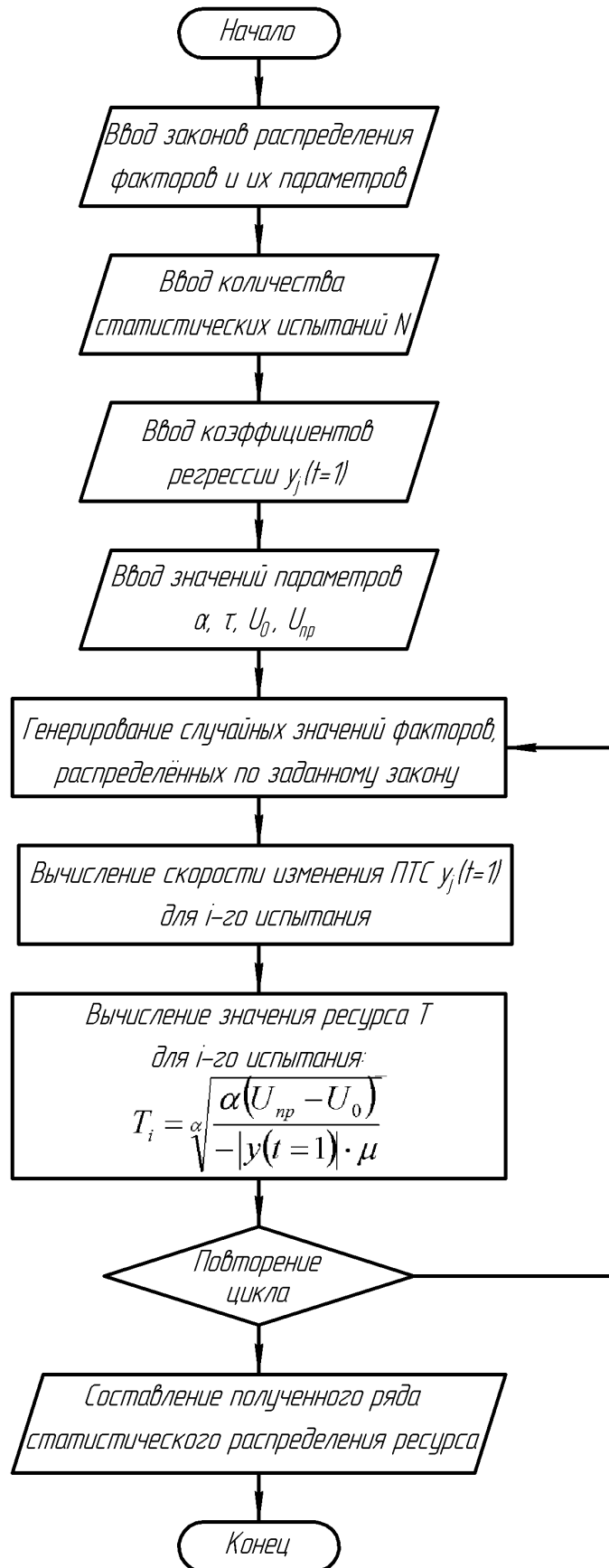


Рисунок 2.3 – Структурная схема статистического моделирования для прогнозирования ресурса элементов ПЛЭН

Использование полученной формулы в предложенной схеме алгоритма оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей методом статистического моделирования позволит её произвести в современных программных продуктах для ЭВМ с достоверной точностью.

2.7 Выводы по второй главе

1. Определяющим параметром состояния изоляции плёночных электронагревателей является пробивное напряжение, для которого обоснована детерминированная математическая модель оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей при фиксированной наработке.

2. Разработана вероятностная модель для оценки ресурса элементов плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний. Она учитывает случайный характер условий эксплуатации, включает функции плотности распределения ресурса и вероятности безотказной работы элементов плёночных электронагревателей. Обоснована функция результирующей надёжности данных нагревателей.

3. Расчёт показателя изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки возможен по методу наименьших квадратов, для которого получено аналитическое выражение.

4. Зависимость скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих факторов определяется по результатам многофакторных ускоренных испытаний в виде уравнения регрессии.

5. Определение параметров ресурса для уравнения регрессии по результатам экспериментов в виде полинома с линейными взаимодействиями, второго и более высоких порядков возможно методом статистического моделирования, для чего разработана структурная схема алгоритма.

Глава 3 Методика экспериментальных исследований

Оценка ресурса изоляции плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний основана на применении теории вероятности и математической статистики, методов планирования многофакторного эксперимента и физического моделирования. Физическое моделирование требует определения основных факторов, влияющих на скорость старения изделий. При проведении ускоренных испытаний также следует выбирать режимы работы, не нарушающие физического процесса изнашивания исследуемых изделий.

Электрооборудование, выпускаемое на территории Российской Федерации и эксплуатируемое на ее территории, должно удовлетворять требованиям установленных стандартов. Тем не менее, до настоящего времени оценка пробивного напряжения изоляции, являющегося определяющим ПТС, выпускаемых серийно с 2005 года [148] ПЛЭН не проводилась.

Заявленный производителем ПЛЭН срок эксплуатации 50 и более лет, а также гарантийный срок эксплуатации 25 лет со дня продажи требуют экспериментального подтверждения, хотя и указываются в качестве основания протокол испытаний продукции № ИЦКБ.ПТ.0474083 от 20.11.2008г. [110,148]. При сертификации протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям [114]. Также указанный протокол лишь подтверждает соответствие предоставленного на сертификацию образца соответствию санитарных, противопожарных и других норм стандартам Российской Федерации [139,140]. Это не может быть основанием срока службы данных изделий без проведения испытаний на долговечность. Определение ресурса не входит в программу указанных сертификационных испытаний [59,60]. Поэтому производитель указал заявленные значения срока эксплуатации произвольно.

Испытания в данном случае проводились с целью получению паспорта на продукцию, необходимого для любого технического изделия, продаваемого на территории Российской Федерации, эксплуатация которого может быть связана с опасностью для человека и имущества. Определение срока службы изделия явля-

ется непростой задачей, требует разработки специальной методики и проведения соответствующих экспериментов, довольно длительных и трудоёмких, что и осуществлено в настоящей работе. Тем более на настоящий момент отсутствует опыт эксплуатации ПЛЭН в десятки лет, заявляемый производителем, так как с момента изготовления первых образцов прошло около 15 лет, а рассматриваемая нами более совершенная конструкция нагревателей выпускается менее 10 лет. Таким образом, в данной главе рассмотрены необходимые методики и средства проведения испытаний изоляции плёночных электронагревателей.

Методика рассматриваемых в данной работе экспериментальных исследований плёночных электронагревателей предусматривает выполнение следующих основных этапов:

- 1) выбор в качестве объекта исследования определённого типоразмера;
- 2) анализ и выбор факторов, влияющих на старение ПЛЭН, с учётом режима их работы;
- 3) планирование ускоренных испытаний, разработка установки;
- 4) разработка технических средств определения ПТС изоляции;
- 5) реализация плана факторного эксперимента и получение функции зависимости скорости изменения ПТС от основных факторов;
- 6) оценка ресурса плёночных электронагревателей на ЭВМ;
- 7) сопоставление полученных результатов ускоренных испытаний с данными эксплуатационных наблюдений в свиноводстве.

Для непосредственного проведения работ каждый этап программы исследования может включать дополнительно необходимые методы и средства.

3.1 Выбор типоразмера исследуемого плёночного электронагревателя

К настоящему времени налажено массовое производство плёночных электронагревателей на базе ЧГАА, разработки защищены патентами РФ. Конструкция ПЛЭН постоянно совершенствуется. Это касается, в основном, технологии изготовления, удобства и ускорения процесса производства, применения новых

высокотехнологичных материалов, но принцип работы данных нагревателей остаётся таким же. В настоящей работе при выборе типоразмера ПЛЭН для испытаний на надёжность руководствовались их массовой применяемостью, определяемой наибольшим спросом на данный типоразмер, удобством практического осуществления эксперимента и его технической реализацией.

В настоящее время распространены следующие типы плёночных электронагревателей (нумерация типов приведена произвольно):

1) Первый тип – ПЛЭН, наиболее распространён на данное время. Устройство и принцип его действия описан в п. 1.2. В месте изменения направления резистивной греющей ленты произведён перегиб материала.

2) Второй тип. Конструкция аналогична предыдущей, за исключением того, что в местах поворота резистивного греющего элемента соединения произведены пайкой дополнительных частей материала. Данная конструкция была распространена на начальных этапах разработки плёночных электронагревателей, но в дальнейшем от неё отказались из-за падающей надёжности устройства в целом от большого количества контактных соединений последовательно соединённых проводников и большой трудоёмкости изготовления.

3) Третий тип. Конструкция аналогична предыдущим, только вместо резистивной ленты производится напыление поверхности мелкодисперсными частицами массы вещества также с высоким термосопротивлением. Наиболее «слабым» местом с точки зрения надёжности является место крепления контактов к напылённой поверхности, очевидно из-за относительно малой плотности проводящих частиц, по сравнению с нагревателями с резистивной греющей лентой.

4) Четвёртый тип. Конструкция также аналогична предыдущим. В качестве нагревательного элемента используется проволока высокого термосопротивления. При создании таких нагревателей с большой удельной плотностью возможно прожигание изоляции в местах соприкосновения с термоэлементом. Особенно это может проявиться при расположении нагревателей на стенах и потолке излучающей поверхностью вниз. Достоинством является относительная дешевизна данного типа плёночных электронагревателей. Наиболее «слабым» местом, как и для

всех типов плёночных электронагревателей, является крепление контактов к токоподводящим проводам.

В дальнейшей работе мы остановимся на плёночных электронагревателях первого типа, как наиболее распространённых и массовых. Они применяются во внедрённых в технологический процесс производства свинины для обогрева поросят-сосунов на свиноводческих комплексах Урала. Также данные устройства лишены недостатков относительно «слабых» контактов разрабатываемых напылённых нагревателей, хотя и достаточно перспективных.

В составе СТК для обогрева поросят-сосунов в логовах используется типоразмер ПЛЭН 0,65x1,5 м, ~220 В, 50 Гц, мощностью около 200 Вт [71]. Для проведения исследований из одной партии были выбраны экспериментальные образцы аналогичного типоразмера ПЛЭН 0,65x1,5 м, ~220 В, 50 Гц, 175 Вт (рисунок 3.1), выпускаемые предприятием ООО «ЭСБ-Технологии» [148]. Проведённые экспериментальные замеры показали соответствие действительных характеристик ПЛЭН заявленным производителем.



Рисунок 3.1 – Плёночный электронагреватель ПЛЭН 0,65x1,5 м,
~220 В, 50 Гц, 175 Вт

Предварительными испытаниями установлено наиболее «слабое» место ПЛЭН. Во время испытаний при оценке параметра состояния пробивным напряжением исследовался верхний слой изоляции ПЛЭН со стороны основной излу-

чающей поверхности, как наиболее подверженный внешним воздействиям, снижающим электрическую прочность. Материал полимерной изоляционной плёнки – полиэтилентерефталат, толщина одного слоя которого составляет 125 мкм.

3.2 Факторы, влияющие на старение изоляции плёночных электронагревателей в условиях свиноводства

В научных изданиях отсутствует информация о воздействии факторов на изоляцию ПЛЭН. В этом случае приходится руководствоваться данными о старении изоляции электрических машин в свиноводстве.

Электрическая прочность электрооборудования, работающего в животноводческих помещениях, зависит от целого ряда факторов, которые, в свою очередь, меняются с течением времени. Многочисленными исследованиями показано, что в этом случае имеет место несоответствие параметров окружающей среды установленным нормам. Эта особенность является одной из причин преждевременного выхода из строя изоляции [120].

На основании условий работы в свиноводстве и источников научно-технической информации [12,14,47,53,54,58,118,119,120] во время эксплуатации ПЛЭН на их изоляцию воздействует большое количество факторов, многообразие которых можно подразделить на группы.

а) Конструктивные факторы:

- 1) химический состав материала изоляционной плёнки (X);
- 2) размеры технологического полотна ПЛЭН (P);
- 3) тип применяемых материалов проводников (M);
- 4) тип соединения контактов (K);
- 5) плотность распределения нагревательного слоя по полотну ($П$).

б) Технологические факторы:

- 1) наличие перегибов технологического полотна ПЛЭН (Y);
- 2) технология термообработки поверхности изоляционной плёнки на конечном этапе изготовления ПЛЭН (Z);

3) повышенная температура изоляции в верхнем слое со стороны основной излучающей поверхности (T°).

в) Эксплуатационные факторы:

- 1) относительная влажность окружающего воздуха (W);
- 2) содержание агрессивных газов и паров в окружающем воздухе (Q);
- 3) температура окружающей среды (τ°);
- 4) абразивность окружающей среды (C);
- 5) напряжение питания (U);
- 6) режим включения (B).

В общем виде зависимость выходного параметра скорости изнашивания изоляции ПЛЭН от действующих факторов представлена на рисунке 3.2 в виде «чёрного ящика» [99,142]. Объекту исследования – ПЛЭН, соответствует прямоугольник. Выход, обозначенный стрелкой, направленной от объекта, соответствует целевой функции. Входы, обозначенные стрелками, направленными к объекту, соответствуют возможным способам воздействия на объект и называются факторами [2].

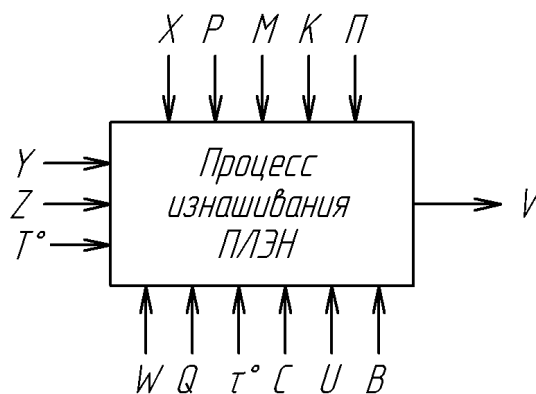


Рисунок 3.2 – Схема процесса изнашивания ПЛЭН

Во время проведения испытаний должна обеспечиваться независимость каждого из выбранных факторов в отдельности на любом эксплуатационном уровне его значений от уровней других факторов. Совокупность действующих эксплуатационных факторов делится на две категории: основные факторы, не зависящие друг от друга и оказывающие влияние на ресурс, и второстепенные, зна-

чение которых невелико. При определении ресурса изоляции второстепенные факторы можно принять неизменными и не рассматривать их влияние [9].

Анализ приведённых факторов показывает, что не все из них значительно влияют на процесс изнашивания. Вследствие этого, для проведения экспериментальных исследований выделяются только факторы, существенно влияющие на рассматриваемый процесс.

Рассмотрим влияние конструктивных факторов на скорость изменения ПТС изоляции ПЛЭН. При испытаниях будут использоваться плёночные электронагреватели одного типоразмера. Конструктивные факторы остаются такими же, как в процессе эксплуатации, и одинаковы для новых и изношенных ПЛЭН при выбранном типоразмере. Например, толщина изоляции ПЭТ 125 мкм для выбранного типоразмера плёночных электронагревателей является оптимальной, обусловлена практическими соображениями при их изготовлении и эксплуатации. При меньшей толщине изоляции поверхность ПЛЭН имеет недостаточную механическую прочность. При большей толщине возникают неоправданные дополнительные материальные затраты и появляются сложности при ламинировании утолщенных образцов. Таким образом, эти факторы являются наследственными, и поэтому их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Из технологических факторов также исключим наличие перегибов технологического полотна ПЛЭН (Y), потому что нагреватель имеет преимущественное расположение в одной плоскости и максимально допустимый изгиб полотна оговаривается в соответствующей инструкции по эксплуатации. Технология термообработки поверхности изоляционной плёнки на конечном этапе изготовления ПЛЭН (Z) влияет на выходные параметры готовых изделий, но в дальнейшем не оказывает какого-либо существенного воздействия на его износ. Величина температуры изоляции в верхнем слое со стороны основной излучающей поверхности (T°) зависит от подаваемого на контакты нагревателя напряжения, что учтено в эксплуатационных факторах. Таким образом, мы исключаем из дальнейшего рассмотрения все технологические факторы.

Параметры условий окружающей среды, как эксплуатационные факторы, влияющие на надёжность электрооборудования в животноводческих помещениях, рассматриваются во многих работах [4,21,66,143,145]. Таковыми параметрами являются наличие повышенной относительной влажности окружающей среды (W) и содержание агрессивных газов в окружающей среде (Q) – углекислого газа, аммиака, сероводорода, сернистого ангидрида. Как показывают исследования [11,13,125] наибольшее влияние на изоляцию среди перечисленных газов оказывает аммиак, особенно в помещениях для содержания свиней, который и будем рассматривать в дальнейшем. В работах таких учёных ЧИМЭСХ – ЧГАУ – ЧГАА как А. А. Пястолов, Е. Г. Мякинин, А. Е. Немировский, В. П. Машевский, О. М. Ковалёва, В. В. Усов, В. И. Чарыков, Г. А. Петров, Ю. П. Ильин и других, изучавших работу различного электрооборудования в условиях сельского хозяйства, указывается на существенность влияния относительной влажности окружающей среды и имеющихся в ней агрессивных газов.

Температура окружающей среды (τ°) будет рассматриваться косвенно в виде температуры поверхности самой изоляции. При проведении эксперимента температура окружающей среды будет контролироваться, и, по возможности, поддерживаться на эксплуатационном уровне. Следует отметить, что оптимальной температурой для содержания поросят-сосунов в первые дни является температура 31°C , а в последующем это значение снижается до 22°C для поросят-отъёмышей [71,134]. Принцип действия ПЛЭН как нагревателя с инфракрасным излучением приводит к тому, что температура воздуха в логове для поросят изменяется незначительно. При этом происходит непосредственное нагревание пола и тел самих поросят. Температура окружающей среды существенно ниже допустимой для данной изоляции [52]. Согласно эмпирическому правилу, на процесс старения изоляции оказывает влияние только «превышение температуры сверх предельно допустимой» [84]. В связи с этим температура окружающей среды не будет оказывать существенного влияния на старение изоляции плёночных электронагревателей.

Такие факторы как абразивность окружающей среды (C) и наличие пыли рассматривать не будем, так как в рассматриваемом оборудовании отсутствуют движущиеся и трущиеся детали, а количество пыли на рабочей поверхности, как правило, направленной вниз – незначительно [15].

В условиях сельского хозяйства напряжение питания (U) является одним из существенно изменяющихся параметров. В данной работе присутствует прямо пропорциональная зависимость между подводимым напряжением питания и температурой изоляционного полотна, которая в конечном итоге учитывается опосредованно. Температура внешнего слоя изоляции на излучающей поверхности нагревателя будет определяться работой токонагревательной ленты.

В некоторых возможных сферах применения встречается прикрытие излучающей поверхности нагревателя дополнительным материалом, что может вызывать некоторое повышение температуры изоляции. В основном это производится для придания большей эстетичности внешнему виду нагревателей путём прикрытия декоративным материалом. В рассматриваемых нами логовах для поросят-сосунов ПЛЭН используются без дополнительных прикрытий внешних поверхностей, поэтому данное влияние не учитывается.

Такой фактор как режим включения ПЛЭН при ускоренных испытаниях будет соответствовать условиям эксплуатации, и потому принят постоянным. Под режимом включения понимается продолжительность рабочего времени в течение цикла и число включений в час. Режим работы связан с величиной достижения наибольшей температуры изоляции при нагреве, поэтому необходимо установить действительный режим включения испытуемых нагревателей по методике, приведённой ниже в п. 3.4.

Анализ перечисленных эксплуатационных факторов в свиноводстве показал, что большинство из них может влиять на износ плёночных электронагревателей. На основании проведённого анализа выявлены следующие основные факторы, влияющие на ресурс изоляции ПЛЭН:

- 1) Напряжение питания (U);
- 2) Относительная влажность воздуха (W);

- 3) Концентрация аммиака в воздухе (Q);
- 4) Режим включения.

Фактор режима включения плёночных электронагревателей принят постоянным при ускоренных испытаниях. Его влияние на скорость изменения ПТС изоляции нагревателей учитывается величиной свободного члена уравнения (2.28) в виде коэффициента регрессии A_0 . Остальные факторы, в соответствии с условиями эксплуатации, носят случайный характер.

Получение аналитической зависимости выходного параметра y от воздействующих факторов обычными методами однофакторного эксперимента является сложной задачей, но вполне возможно для многофакторного эксперимента по результатам ускоренных испытаний даже при неполном знании механизма изучаемого старения изоляции нагревателей.

3.3 Методика оценки статистических характеристик эксплуатационных факторов

При отсутствии данных статистических характеристик влияющих эксплуатационных факторов необходимо провести сбор требуемого статистического материала. Методика обработки полученной информации приведена в данном разделе.

Первоначальной задачей является определение необходимого количества интервалов для полученного статистического ряда значений фактора. Ориентировочно определить число групп с равными интервалами можно по формуле Стёрджесса [106,151]

$$k = 1 + \log_2 \Sigma N = 1 + 3,322 \lg \Sigma N, \quad (3.1)$$

где ΣN – число испытаний (объём выборки);

k – число групп.

Существуют альтернативные формулы Скотта и Фридмана-Диакониса для расчёта числа интервалов статистического ряда, оперирующие не числом ячеек, а

их шириной. Применительно к числу интервалов формула Скотта имеет вид [6,152]

$$k = \sqrt[3]{\frac{2 \sum N}{3}}. \quad (3.2)$$

Величина равных интервалов определяется по формуле

$$c = (x_{\max} - x_{\min}) / k, \quad (3.3)$$

где x_{\max} , x_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения признаков совокупности; c – величина интервала.

Так как отдельные значения усредняемого признака повторяются, то расчет выборочной средней проводится по сгруппированным данным [127]. Пользуясь методом произведений [46,106], находим выборочную среднюю, т.е. среднее арифметическое значение признака X выборочной совокупности

$$\bar{x}_B = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i n_i)}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (3.4)$$

где \bar{x}_B – выборочная средняя.

n_i – частота попаданий в i -й интервал.

Выборочная дисперсия, т.е. среднее арифметическое квадратов отклонения наблюдаемых значений признака от их среднего значения \bar{x}_B [Там же]

$$D_B = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_B)^2 \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (3.5)$$

где D_B – выборочная дисперсия.

Выборочное среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}, \quad (3.6)$$

где σ_B – выборочное среднее квадратическое отклонение.

Выравнивающие частоты непрерывного распределения [46]

$$\tilde{n}_i = \sum N \cdot p_i, \quad (3.7)$$

где p_i – вероятность попадания X в i -й частичный интервал, вычисленная при допущении, что X имеет предполагаемое распределение.

Для совокупности случайной величины X выравнивающие частоты могут быть найдены следующим образом

$$\tilde{n}_i = \frac{\sum N \cdot h}{\sigma_g} \varphi(u_i), \quad (3.8)$$

где h – длина частичного интервала;

$$u_i = \frac{x_i - \bar{x}_g}{\sigma_g}, \quad (3.9)$$

где x_i – середина i -го частичного интервала.

В итоге проверка гипотезы о распределении совокупности данных проводится по критерию согласия Пирсона [28,46,126,149]

$$\chi_{расч}^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - \tilde{n}_i)^2 / \tilde{n}_i, \quad (3.10)$$

где n_i, \tilde{n}_i – количество точек в исследуемом интервале по экспериментальным данным и по теоретическому распределению соответственно.

Для оценки согласованности теоретического и статистического распределений полученное расчётное значение критерия Пирсона $\chi_{расч}^2$ сравнивается с табличным $\chi_{табл}^2$. При $\chi_{расч}^2 < \chi_{табл}^2$ можем утверждать, что экспериментальные данные согласуются с теоретическим распределением с принятой вероятностью.

Также можно проверить применимость предполагаемого распределения с помощью критерия Б. С. Ястремского l , который даёт прямой ответ на данный вопрос [26]

$$l = \frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k + 4\theta}}, \quad (3.11)$$

где χ^2 – хи-квадрат критерий Пирсона;

θ – величина, зависящая от числа групп; при количестве групп меньше 20 величина $\theta = 0,6$.

При $|l| \leq 3$ выбранный теоретический закон можно принять в качестве модели опытного распределения.

3.4 Методика определения постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей

На данный момент для рассматриваемых плёночных электронагревателей не изучен их режим включения. Это возможно по результатам анализа экспериментальных кривых нагрева и охлаждения ПЛЭН, особенностей их конструкции и работы.

Нагревостойкость отдельных материалов системы изоляции может не соответствовать нагревостойкости самой системы. Совместимость же материалов и установление максимальной рабочей температуры для системы в целом должны устанавливаться в ходе функциональных испытаний или в результате опыта эксплуатации [58]. Для определения класса нагревостойкости изделия ПЛЭН в целом необходимо отдельное проведение полноценных испытаний. По результатам исследований зафиксировано снижение величины пробивного напряжения полимерной электроизоляционной плёнки в процессе изготовления нагревателя.

Рассеяние тепла с внешней поверхности ПЛЭН при постоянном нагреве описывается сложной взаимосвязью законов, отражающих данные процессы, поэтому необходимо сделать некоторые допущения. Плёночный электронагреватель представим в виде однородного твёрдого тела с едиными тепловыми свойствами в любой его точке. Считаем, что нагреватель имеет одинаковую температуру и теплоёмкость во всех точках, отдача тепла в окружающую среду пропорциональна превышению температуры ПЛЭН и за время нагрева температура окружающей среды не меняется [8,25]. При работе нагревание ПЛЭН вызывают потери в резистивной ленте. Малая масса и высокая теплопроводность греющей ленты обуславливают быстрое повышение её температуры, и почти сразу начинается процесс интенсивной отдачи тепла в окружающую среду [3].

Для определения периодичности включения ПЛЭН вычисляются постоянные нагрева T_H и охлаждения T_O , зависящие от геометрических размеров и конструктивных особенностей изделий [8]. При этом процесс нагрева описывается экспоненциальным законом [8,25,95]

$$\tau = \tau_{уст} \cdot (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 \cdot e^{-t/T_H}, \quad (3.12)$$

где τ – температуры поверхности ПЛЭН, °С;

$\tau_0, \tau_{уст}$ – соответственно начальное и установившееся значение температуры поверхности ПЛЭН, °С;

t – время работы при постоянной нагрузке, с;

T_H – постоянная времени нагрева, с.

Физический смысл постоянной времени нагрева T_H состоит в том, что она равна времени нагрева устройства до установившейся температуры $\tau_{уст}$, если бы отсутствовала отдача тепла в окружающую среду [25,95].

Выражение функции нагрева приводим к виду функции отклика для линейной модели, с обозначением в качестве абсциссы наработки изделия, а ординаты – значения температуры

$$\tau(t) = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_0) \cdot e^{-t/T_H},$$

$$\frac{\tau_{уст} - \tau(t)}{\tau_{уст} - \tau_0} = e^{-t/T_H},$$

$$\ln \frac{\tau_{уст} - \tau_0}{\tau_{уст} - \tau(t)} = \frac{1}{T_H} \cdot t.$$

Таким образом, для вычисления постоянной нагрева по методу наименьших квадратов определяется численное значение коэффициента $b_1 = 1/T_H$, аналогично формуле (2.25) для определения показателя α , где:

$x_i = t_i$ – значение наработки от начала наблюдения до достижения текущей температуры;

$y_i = \ln \frac{\tau_{уст} - \tau_0}{\tau_{уст} - \tau(t)}$ – логарифм отношения, характеризующего изменение температуры, за наработку t_i .

По полученным экспериментально данным нужно построить кривую нагрева ПЛЭН. Величину T_H можно определить и графически методом трёх касательных, заключающегося в проведении трёх касательных прямых к кривой нагрева в точках соответственно равных $\tau = \tau_{уст} \cdot 0$; $\tau = \tau_{уст} \cdot 0,5$; $\tau = \tau_{уст} \cdot 0,8$. Далее находится среднее из значений времени нагрева, получающихся при пресечении касательных с горизонтальной прямой установившейся температуры [3,8]. Тогда постоянная времени нагрева

$$T_H = \frac{T_{H1} + T_{H2} + T_{H3}}{3}. \quad (3.13)$$

Уравнение (3.12) справедливо и для процесса охлаждения ПЛЭН [25]. В этом случае изменяются лишь начальные и конечные условия

$$\tau = \tau_{уст.охл.} \cdot (1 - e^{-t/T_O}) + \tau_{уст.н.} \cdot e^{-t/T_O}, \quad (3.14)$$

где $\tau_{уст.охл.}$ – установившаяся температура поверхности ПЛЭН, °С;

$\tau_{уст.н.}$ – начальная температура нагретой поверхности ПЛЭН в момент отключения, °С;

T_O – постоянная времени охлаждения, с.

Тепловая постоянная времени, характеризующая процесс изменения температуры, обратно пропорциональна теплоотдаче [95]. Так как при процессах нагрева и охлаждения условия теплоотдачи ПЛЭН не изменяются, то будут равны и постоянные времени. Поэтому постоянная времени охлаждения плёночного электронагревателя будет равна постоянной времени нагрева, то есть $T_O = T_H$.

3.5 Планирование эксперимента

Как уже было сказано, определение скорости изменения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН целесообразно проводить по методике активного планирования эксперимента. Полученная математическая модель должна адекватно отображать реальные процессы. При этом затраты на проведение эксперимента должны быть наименьшими.

Так как количество варьируемых факторов сравнительно невелико применим широко распространённый план полного факторного эксперимента (ПФЭ) первого порядка. Если полученная математическая модель окажется неадекватной, следует перейти к более сложным планам, например, второго порядка [2,75].

В данном случае приходится учитывать трудности, связанные с недостаточным количеством необходимых испытательных камер. Отметим невозможность помещения в одну камеру более одного плёночного электронагревателя для исключения вероятности взаимного перекрытия рабочих поверхностей и, следовательно, перегрева от этого изоляции, не имеющего место на практике.

Для того, чтобы привести варьируемые факторы и их уровни к единой системе исчисления от действительных значений для планирования многофакторного эксперимента, они кодируются по выражению [2,75,84,103]

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (3.15)$$

где X_i – натуральное значение фактора;

X_{0i} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

ΔX_i – интервал варьирования.

Искомые величины определяются исходя из действительных значений

$$X_{0i} = \frac{X_{\max i} + X_{\min i}}{2}, \quad \Delta X_i = \frac{X_{\max i} - X_{\min i}}{2}, \quad (3.16)$$

где $X_{\max i}$ – наибольшее натуральное значение фактора;

$X_{\min i}$ – наименьшее натуральное значение фактора.

Экспериментальные исследования проводятся на установке по плану полного факторного эксперимента 2^3 , приведённого в таблице 3.1 [75]. Обозначение «+1» соответствует верхнему уровню варьирования факторов из диапазона эксплуатационных значений, «-1» – нижнему.

По результатам каждого опыта, соответствующего строкам матрицы планирования, в итоговый столбец записывается скорость изменения выходной величины $y(t=1)$ пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН в зависимости от действующих факторов x_1, x_2, x_3 при некоторой одинаковой наработке. Величины

$y(t=1)$ рассчитываются по формуле (2.29) или (2.33) согласно п. 2.4. При реализации факторного плана эксперимента необходимо расположить опыты в случайном порядке для исключения систематических погрешностей и внесения элемента случайности влияния неконтролируемых факторов [69,75]. Во избежание дополнительных потерь времени проведём частичную рандомизацию с проведением соответствующего номера опыта с выбранной повторностью.

Таблица 3.1 – Матрица планирования полного факторного эксперимента для трёх факторов 2^3

| № опыта | Условия проведения опытов | | | | | | | | |
|------------|---------------------------|-------|-------|-------|----------------|----------|----------|-----------|-------|
| | Факторы | | | | Взаимодействия | | | | Выход |
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_{12} | x_{13} | x_{23} | x_{123} | y |
| 1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_1 |
| 2 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | y_2 |
| 3 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | y_3 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | y_4 |
| 5 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | y_5 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | y_6 |
| 7 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | y_7 |
| 8 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | y_8 |

За результат каждого из испытаний согласно ГОСТ 6433.3-71 и ГОСТ 24234-80 принимают среднее арифметическое пяти измерений. Количество опытов при ускоренных испытаниях соответствует количеству строк принятой матрицы проведения эксперимента. При этом должно выполняться условие воспроизводимости опытов, которое проверяется в начале обработки полученных данных. В противном случае увеличивают повторность опытов до достижения требуемого результата. Первоначальная повторность опытов принимается равной трём [75].

3.6 Установка для ускоренных испытаний плёночных электронагревателей

Стендовые испытания обеспечивают постоянное наблюдение за процессом потери изделием работоспособности и дают возможность за сравнительно короткие сроки получать необходимые сведения о надёжности и долговечности объекта испытаний [116]. Испытание рассматриваемых ПЛЭН по приведённому плану в эксплуатационных условиях не представляется возможным исходя из тех соображений, что:

а) необходимость постоянного поддержания заданного уровня факторов не выполнима в свиноводческих помещениях из-за колебаний параметров, что приведет к невозможности обработки такого эксперимента статистическими методами и потере смысла универсальности предложенного метода;

б) непосредственно перед испытаниями проводится измерение пробивного напряжения ПЛЭН для фиксации начальных параметров, что приводит к пробое изоляции и недопустимости использования таких образцов в работе на производственном объекте с точки зрения электробезопасности.

Для испытаний на надёжность необходима довольно простая по конструкции и удобная в обслуживании установка, отвечающая следующим требованиям [4,21,66]:

1) Обеспечение воздействия на испытываемый плёночный электронагреватель каждого из выделенных факторов в диапазоне их эксплуатационных значений.

2) Возможность установления и контроля каждого из эксплуатационных факторов на заранее заданном уровне их значений.

3) Наличие независимого управления и защиты.

4) Минимально возможные габариты и масса, использование стандартных узлов и агрегатов.

5) Простота и надёжность, удобство в обслуживании и безопасность в эксплуатации по сравнению с существующими установками.

Разработанная установка для испытания ПЛЭН на долговечность включает две камеры окружающей среды, оснащённые силовыми частями и блоками управления. В данной работе применяются ранее разработанные на кафедре ЭМЭЭСХ ЧГАА камеры имитации условий окружающей среды и использовавшиеся для климатических испытаний различного электрооборудования. Методика работы и контроля заданных параметров окружающей среды также принята существующая [4], так как используются совпадающие факторы – относительная влажность воздуха и концентрация аммиака. Размеры испытательных камер получаются минимально необходимыми для развёрнутого расположения плёночных электронагревателей без перекрытия излучающих поверхностей, согласно требованиям эксплуатации. Эти камеры обеспечивают в рабочей зоне относительную влажность и концентрацию аммиака в требуемом диапазоне.

Испытательные камеры на надёжность ПЛЭН (рисунки 3.3, 3.4) в общем виде содержат прямоугольный короб без днища и поддон. Плёночные электронагреватели, расположенные на деревянном каркасе, помещаются в поддон, который сверху накрывается прямоугольным коробом из листового железа. В камерах предусмотрены окна для визуального наблюдения и контроля работы испытуемого оборудования, а также отверстия для кабелей питания и контрольной аппаратуры.



Рисунок 3.3 – Внешний вид камеры влажности с помещённым в неё плёночным электронагревателем



Рисунок 3.4 – Внешний вид климатической камеры с агрессивными условиями среды с помещённым в неё плёночным электронагревателем

Для создания повышенной влажности воздуха в металлический поддон наливается вода. Уровень влажности контролируется психрометром ВИТ-2. Влажность и содержание газов аммиака в воздухе поддерживается на требуемом уровне обеспечением соответствующей площади поверхности испаряемого вещества внутри камеры. Концентрация аммиака в камерах объёмом X и Y достигается установкой дополнительных ёмкостей с готовым летучим 10 %-м раствором аммиака NH_3 . Аммиак, постепенно испаряясь с поверхности небольшой площади, создаёт необходимую концентрацию. Необходимое количество аммиачного раствора определяется расчётно-опытным путём с периодическим контролем загазованности с помощью универсального газоанализатора УГ-2 линейно-колористическим методом, согласно методикам [41,49,50]. Расчёт количества испарившегося аммиака с открытой ёмкости, установленной в климатической камере, приведён в приложении А [35,131,133]. Для вычислений используем следующие значения объёма камер: климатическая – $0,5 \text{ м}^3$; влажности – $0,4 \text{ м}^3$.

Для питания установки подаётся трёхфазное напряжение 380/220 В переменного тока. Электрическая принципиальная схема испытаний плёночных электронагревателей представлена на рисунке 3.5.

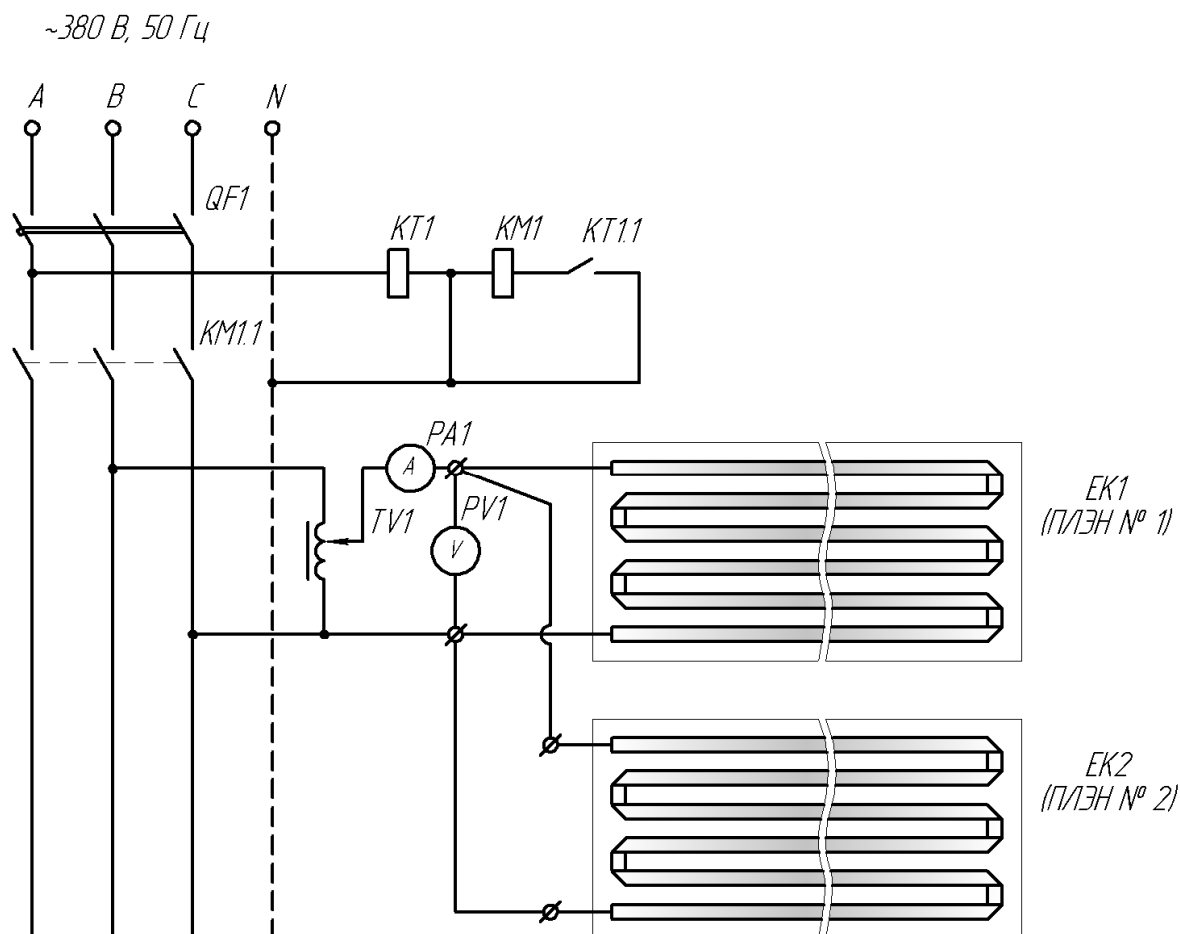


Рисунок 3.5 – Электрическая принципиальная схема испытания плёночных электронагревателей

Силовая часть схемы состоит из нагревателей, подключённых к сети через автоматический выключатель $QF1$. В силовой цепи имеются контакты магнитного пускателя, осуществляющего управление силовой цепью. Требуемое напряжение питания испытуемого ПЛЭН для соответствующего опыта по приведённому плану подается с помощью однофазного регулятора напряжения $TV1$ марки РНО-250-5 (сеть 127/220 В, ~ 50 Гц, выходное регулируемое напряжение $\sim 0 \div 250$ В, максимальный ток регулятора на выходе $\sim 12/20$ А), работающего в требуемом диапазоне значений. Блок управления включает реле времени $KT1$ марки ВС-43-63У3 (класс точности 1,5, $1 \div 60$ мин, 220 В, ~ 50 Гц) и магнитный пускатель $KM1$ марки ПМЛ. Таким образом, эксплуатационные режимы включения обеспечиваются с помощью реле времени. Требуемый режим включения установки определяется после анализа полученных значений постоянных нагрева

и охлаждения ПЛЭН в главе 4. Плёночные электронагреватели *EK1*, *EK2*, ... подключены к питающей сети от разных фаз для соблюдения симметричности нагрузки. Для проверки соответствия электрических параметров в схему могут вводиться измерительные приборы.

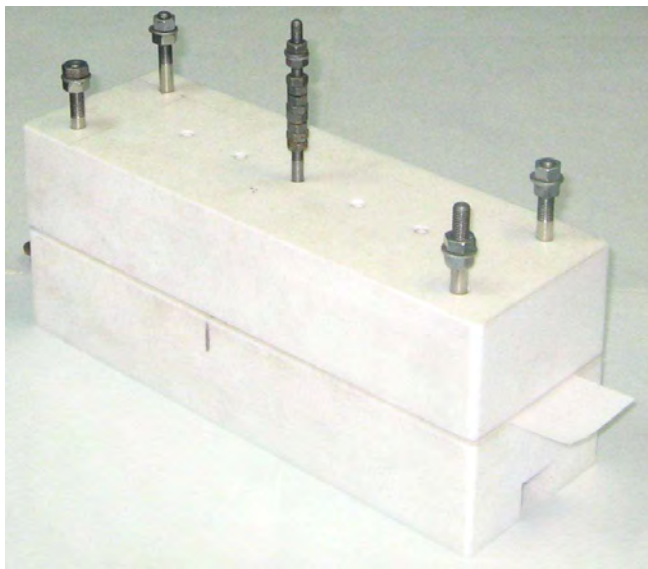
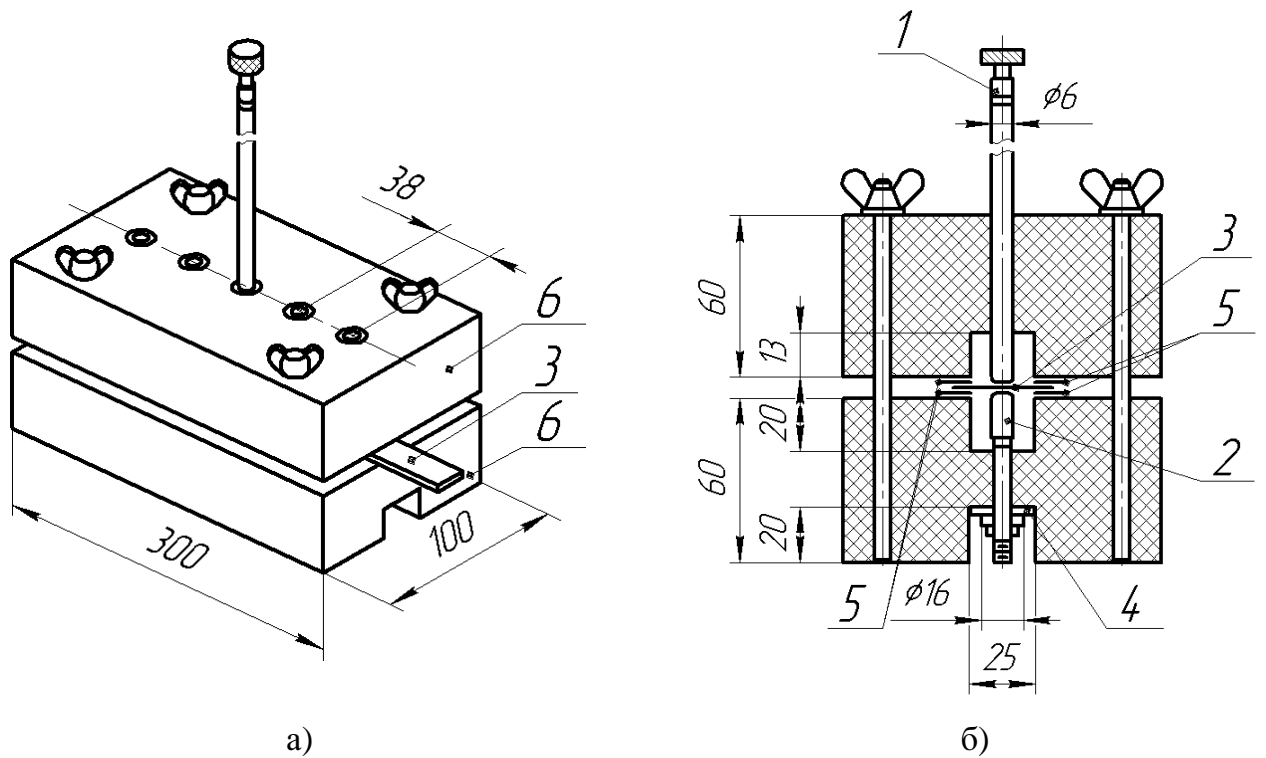
Таким образом, испытания плёночных электронагревателей по плану многофакторного эксперимента проводятся на указанной установке с приведённой электрической схемой.

3.7 Устройства определения состояния изоляции плёночных электронагревателей

Для определения состояния изоляции необходимы технические средства, обеспечивающие проведение испытаний для определения пробивного напряжения: система электродов и электрическая принципиальная схема установки. Основным элементом технических средств для определения электрической прочности изоляции является система электродов, которая указана в стандартах на материал, зависит от типа и формы испытываемого образца.

3.7.1 Система электродов для определения электрической прочности плёночных электронагревателей

В результате изучения существующих стандартов и норм испытаний электрической прочности применительно к ПЛЭН были выявлены требования к системе электродов. Материал электродов, способ создания контакта с образцом должны соответствовать указанным в стандартах или технических условиях [57]. Согласно действующему стандарту применяются два одинаковых цилиндрических металлических электрода диаметром 6 мм с радиусом закругления краев 1 мм. Испытуемый образец зажимается между торцовыми поверхностями электродов. Масса верхнего электрода должна составлять (50 ± 2) г. Пример системы электродов и его общий вид в натуральном виде приведены на рисунке 3.6.



в)

г)

1 – верхний (подвижный) электрод; 2 – нижний электрод; 3 – образец; 4 – латунная лента для соединения нижних электродов; 5 – лента из электроизоляционного материала;
6 – корпус из электроизоляционного материала

Рисунок 3.6 – Чертежи системы электродов для определения электрической прочности полос (а, б) и её общий вид (в, г)

После выбора системы электродов возможна разработка устройства для определения электрической прочности изоляции плёночных электронагревателей.

3.7.2 Разработка устройства для определения электрической прочности листовых материалов

Рассмотренная ранее система электродов не приспособлена для проведения измерений параметра состояния изоляции исследуемых ПЛЭН. В данной работе эта проблема была решена оригинальным способом, на разработанное устройство получен патент РФ № 103932 на полезную модель.

На основании устройства для определения электрической прочности узких полос и ленточных материалов (ГОСТ 6433.3-71) разработано устройство [138], позволяющее проводить испытания целых ПЛЭН без разрезания на части листового образца (рисунки 3.7, 3.8), и этим обеспечить возможность их дальнейшего использования для определения скорости изменения параметра состояния изоляции от наработки.

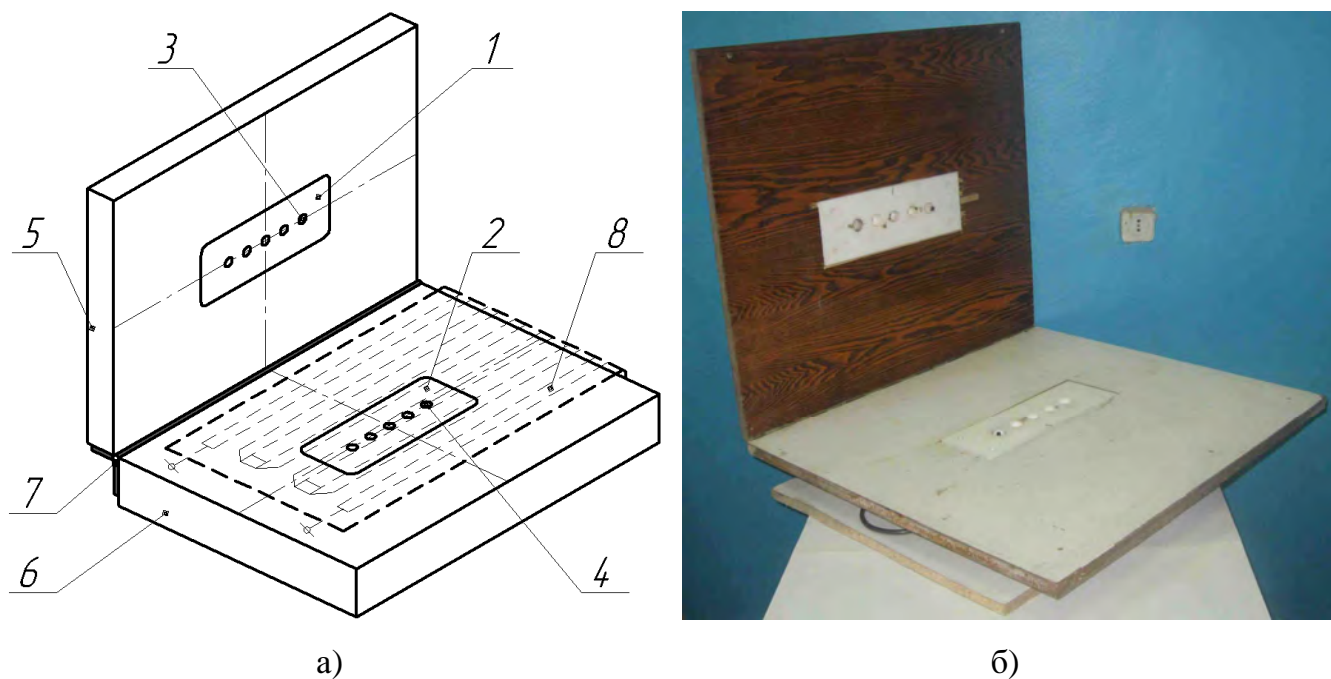


Рисунок 3.7 – Схема расположения ПЛЭН в устройстве для определения электрической прочности листовых материалов (а) и общий вид данного устройства (б)

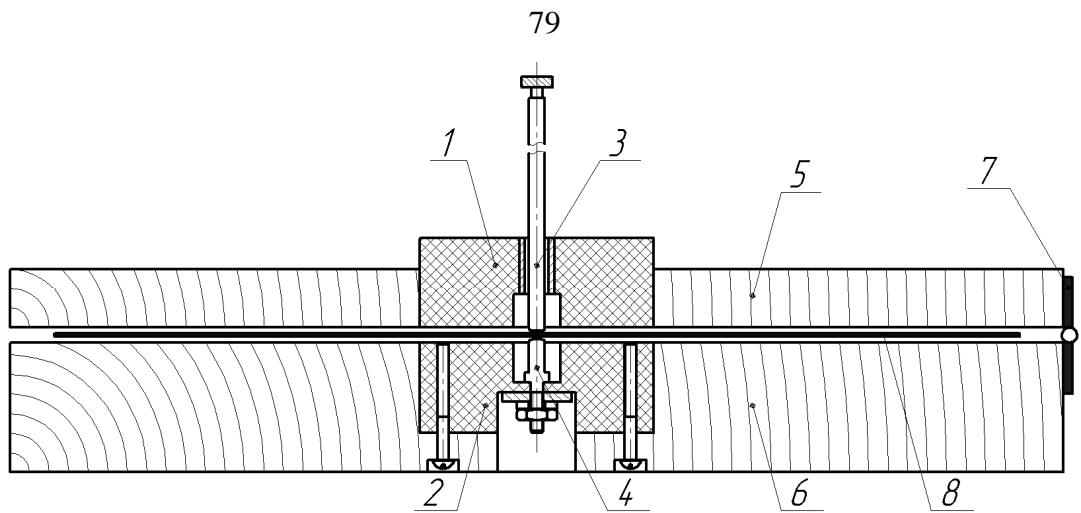


Рисунок 3.8 – Устройство для определения электрической прочности листовых материалов в разрезе

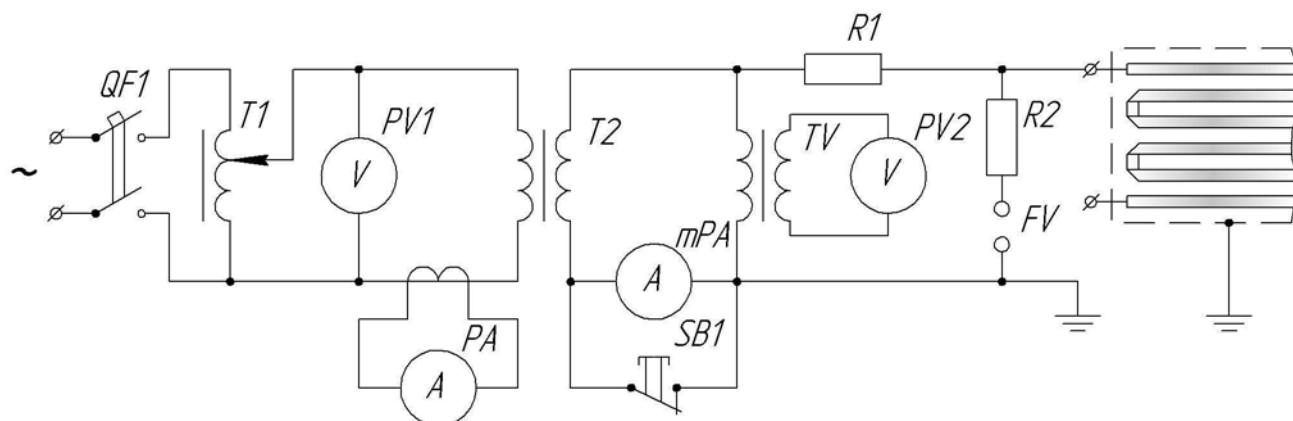
Принцип работы изображённого на рисунках устройства заключается в следующем: между торцевыми рабочими поверхностями верхнего 1 и нижнего 2 корпусов для электродов, установленных в крышке 5 и основании 6 внешнего корпуса, соединённых шарниром 7, помещается образец из испытуемого материала 8, который зажимается между верхним 3 и нижним 4 электродами под действием собственного веса верхнего электрода 3; затем производятся необходимые измерения.

Таким образом, было разработано устройство, позволяющее проводить измерения пробивного напряжения листовых электроизоляционных материалов без фрагментирования их образцов. При этом обеспечивается контроль требуемой соосности верхнего и нижнего электродов. Дальнейшее совершенствование устройства может быть направлено на снижение его массы.

3.7.3 Электрическая схема испытаний электрической прочности плёночных электронагревателей

Испытание переменным напряжением является основным способом определения наличия запаса прочности, как в заводских, так и эксплуатационных условиях [40]. Для проведения этих испытаний необходимо выбрать установку с соответствующей существующим требованиям электрической схемой.

Мощность испытательной установки должна быть достаточной для того, чтобы действующее значение установившегося тока короткого замыкания на стороне высокого напряжения было не менее 40 мА при испытаниях изоляции ПЛЭН. На испытываемом образце должна обеспечиваться синусоидальная форма кривой напряжения частоты $(50 \pm 0,5)$ Гц, чтобы отношение максимального значения испытательного напряжения к действующему было в пределах от 1,34 до 1,48. Регулирующее устройство установки должно обеспечивать плавную регулировку напряжения. Пробивное напряжение предпочтительно измерять на стороне высокого напряжения применяемого повышающего трансформатора [57]. В данном случае определение электрической прочности изоляции плёночных электронагревателей при переменном напряжении возможно согласно приведённой на рисунке 3.9 схеме [144].



QF1 – автоматический выключатель; *T1* – автотрансформатор; *PV1*, *PV2* – вольтметр; *PA* – амперметр для измерения тока на стороне низкого напряжения; *T2* – трансформатор испытательный повышающий; *mPA* – миллиамперметр для измерения тока утечки испытуемой изоляции; *SB1* – кнопка, шунтирующая миллиамперметр для его защиты от перегрузки; *TV* – трансформатор напряжения измерительный; *R1* – резистор для ограничения тока в испытательном трансформаторе при пробоях в испытуемой изоляции ($0,2 \div 1$ Ом на 1 В испытательного напряжения); *R2* – то же для ограничения коммутационных перенапряжений на испытуемой изоляции при пробое разрядника (1 Ом на 1 В испытательного напряжения); *FV* – разрядник

Рисунок 3.9 – Схема испытаний электрической прочности изоляции электрооборудования повышенным напряжением переменного тока

Представленная на рисунке 3.9 схема на практике реализована в серийной установке АИИ-70. Напряжение питающей сети данного аппарата 127/220 В. Максимальное напряжение при испытаниях на переменном токе составляет 50 кВ. Также существуют более компактные современные аналоги на основе полупроводниковых элементов. На кафедре ЭМЭЭСХ ЧГАА изготовлено разработанное устройство для определения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН, собрана установка с аппаратом АИИ-70 и статическим киловольтметром марки С196 (рисунок 3.10) для испытаний при переменном напряжении частоты 50 Гц.

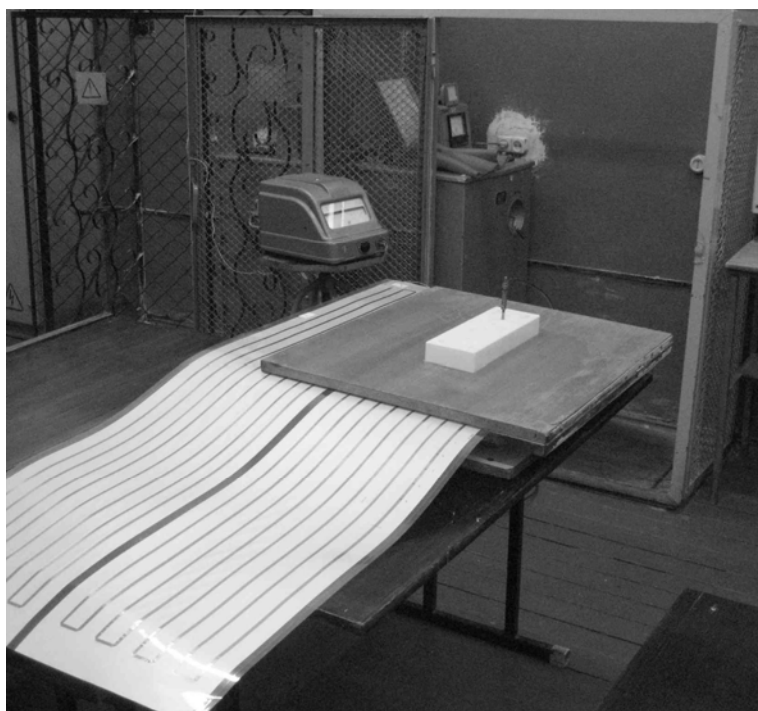


Рисунок 3.10 – Общий вид установки в сборе для определения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН

Описанные в работе система электродов и электрическая принципиальная схема установки, наряду с исследовательскими испытаниями долговечности ПЛЭН, могут быть включены в перечень технических средств системы планово-предупредительного ремонта. Это позволит восполнить отсутствие сведений о проведении испытаний плёночных электронагревателей и определить нормативные показатели для системы ППРЭСх [128] с последующим повсеместным применением.

3.8 Методика обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных проводится по методике, сложившейся в теории планирования [2,10,29,69,75,90,99,103]. Прежде всего необходимо проверить условие воспроизводимости выполненных опытов. Для этого находится среднее арифметическое из m повторностей

$$\bar{y}_n = \frac{\sum_{n=1}^m y_n}{m}, \quad (3.17)$$

где m – количество повторностей опытов;

n – порядковый номер опыта в плане эксперимента;

y_n – значение скорости изменения параметра технического состояния $y(t=1)$ для одного n -го опыта из m повторных;

\bar{y}_n – среднее арифметическое значение скорости изменения параметра технического состояния $y(t=1)$ для одного n -го опыта при m повторных.

Сумма квадратов отклонений

$$\sum_{l=1}^m \Delta y_n^2 = \sum_{l=1}^m (y_{nl} - \bar{y}_n)^2, \quad (3.18)$$

где l – номер повторности опыта;

y_{nl} – значение скорости изменения параметра технического состояния $y(t=1)$ в l -ой повторности n -го опыта.

Далее определяется дисперсия для каждого параллельного опыта

$$S_n^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{l=1}^m \Delta y_n^2. \quad (3.19)$$

Для проверки воспроизводимости проведённых опытов рассчитывается значение критерия Кохрена

$$G_{\max \text{ расч}} = \frac{S_{n.\max}^2}{\sum_{n=1}^N S_n^2}, \quad (3.20)$$

где $S_{n.\max}^2$ – максимальное значение дисперсии в отдельных опытах;

N – количество опытов.

При воспроизводимости опыта должно выполняться условие

$$G_{\max \text{ расч}} \leq G_{\max \text{ табл}}, \quad (3.21)$$

где $G_{\max \text{ табл}}$ – табличное значение критерия Кохрена.

Гипотеза об однородности дисперсий принимается при значении критерия $G_{\max \text{ расч}}$ меньше $G_{\max \text{ табл}}$ для степени свободы $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$, количества опытов $f_2 = N = 8$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$, достаточном для инженерных расчётов [46]. При невыполнении условия (3.21) опыт невоспроизводим, и в этом случае следует принять соответствующие рекомендации согласно справочной литературе [75].

После проверки воспроизводимости опытов находятся коэффициенты уравнения регрессии (2.28) по выражениям

$$A_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n}{N}, \quad (3.22)$$

$$A_i = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n \cdot x_{in}}{N}, \quad (3.23)$$

$$A_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n \cdot x_{in} \cdot x_{jn}}{N}, \quad (3.24)$$

где i, j – номера факторов;

x_{in}, x_{jn} – значения фактора i и j в n -ом опыте.

Затем осуществляется оценка статистической значимости коэффициентов регрессии по величине доверительного интервала

$$\Delta A_i = t_{\text{табл}} \cdot S_{A_i}, \quad (3.25)$$

где $t_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы $\nu = N \cdot (m - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$ и принятом уровне значимости $\alpha = 0,05$ [46];

S_{A_i} – ошибки коэффициентов регрессии.

Квадратичные ошибки S_{Ai} всех коэффициентов регрессии при полнофакторном планировании эксперимента равны между собой

$$S_{Ai} = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot m}}, \quad (3.26)$$

где S_y – ошибка эксперимента.

Значение S_y определяется как

$$S_y = \sqrt{S_y^2} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N S_n^2}{N}}, \quad (3.27)$$

где S_y^2 – дисперсия воспроизводимости (генеральная дисперсия).

При полнофакторном эксперименте доверительные интервалы, в том числе и эффектов взаимодействия, равны друг другу [2]. Значимыми являются только те коэффициенты регрессии, абсолютное значение которых больше величины доверительного интервала, рассчитанного по формуле (3.25). Коэффициенты, не удовлетворяющие данному условию, отбрасываются.

Заключительная проверка полученной математической модели на адекватность проводится по критерию Фишера [Там же]

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (3.28)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности, которая находится по выражению [2,10]

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \cdot \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - y'_n)^2, \quad (3.29)$$

где d – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии модели;

y'_n – теоретическое значение выходной величины, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для условий n -го опыта.

Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$ находится для следующих степеней свободы: $f_{числ} = N - d$ и $f_{зн} = N \cdot (m - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [46]. При выполнении условия $F_{расч} \leq F_{табл}$ считается, что полученная математическая модель адекватно описывает исследуемый процесс.

3.9 Методика статистического моделирования ресурса элементов плёночных электронагревателей

Современные компьютерные программы позволяют решать задачи статистического моделирования, упрощая процесс их реализации. В математическом пакете MathCAD возможно воспроизведение функций распределения случайных величин для любого из 17 встроенных видов. Возможен расчёт плотности вероятности, функции распределения, квантиля вероятности и генерации вектора случайных чисел для каждого имеющегося распределения [86].

Для моделирования методом Монте-Карло в MathCAD присутствует функция-генератор случайных чисел для определённых законов распределения. Например, функция $\text{rnd}(N)$, выдаёт одно случайное число в интервале от 0 до N . Другие функции-генераторы для выбранного распределения создают вектор случайных чисел [Там же].

Таким образом, необходимо получить статистические распределения значений влияющих на старение изоляции ПЛЭН факторов. С учётом скорости изменения ПТС элементов изоляции плёночных электронагревателей, полученной по результатам ускоренных испытаний, рассчитывается статистический ряд распределения ресурса элементов ПЛЭН. На основании структурной схемы, представленной в п. 2.6, разработана блок-схема моделирующего алгоритма для прогнозирования (рисунок 3.11) [51].

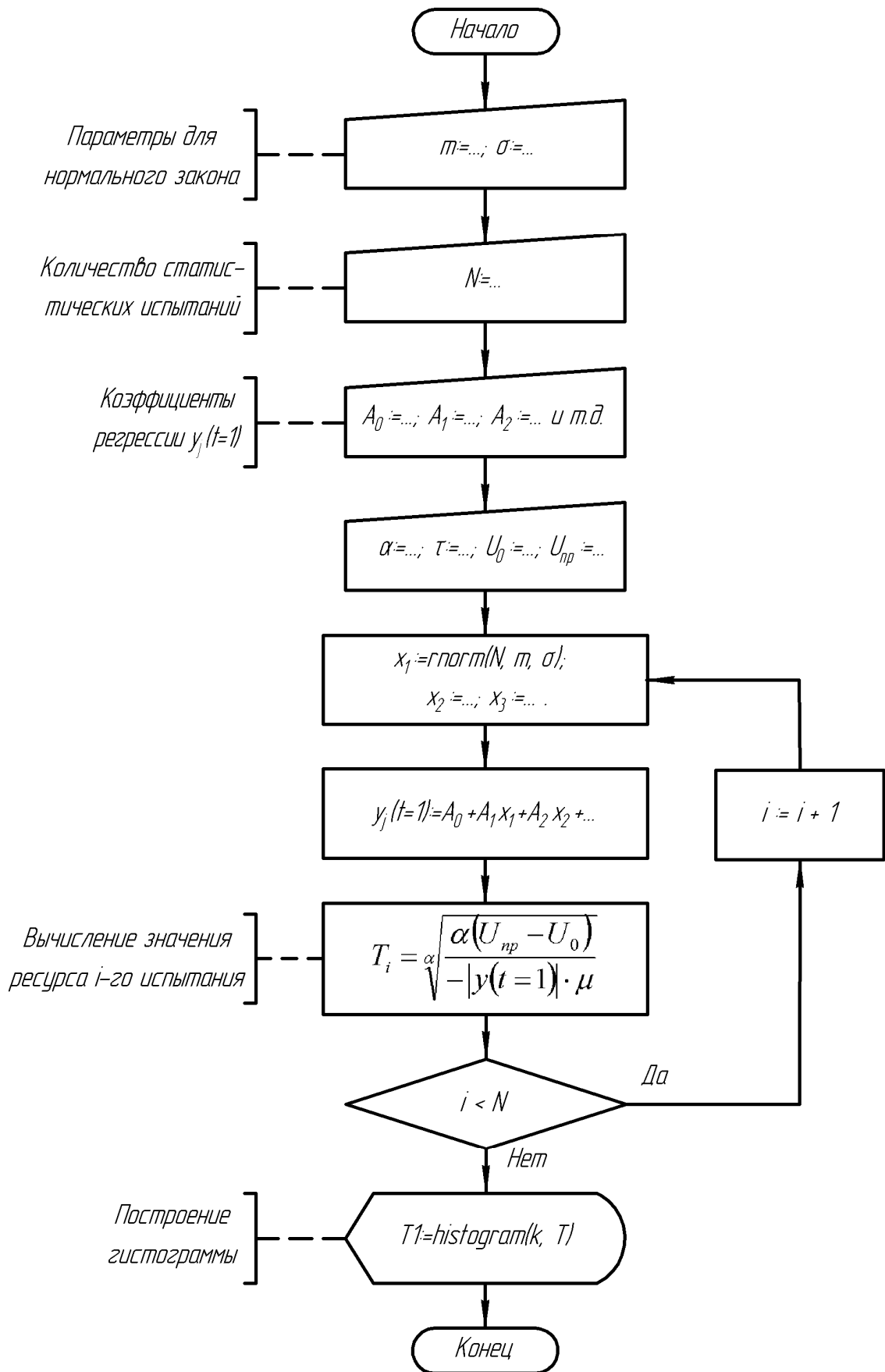


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритма статистического моделирования для прогнозирования ресурса элементов ПЛЭН

Таким образом, разработанный алгоритм компьютерного моделирования скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции методом Монте-Карло позволит провести оценку искомого ресурса элементов рассматриваемых плёночных электронагревателей.

3.10 Методика проверки результатов испытаний плёночных электронагревателей

Ресурс плёночных электронагревателей является величиной случайной, поэтому необходимо провести проверку адекватности полученных результатов ускоренных испытаний. Для этого производится их сопоставление с данными реальной эксплуатации. Перед установкой в эксплуатацию необходимо провести замеры значений параметра состояния изоляции ПЛЭН, то есть пробивного напряжения.

Для сопоставления полученного по результатам ускоренных испытаний ресурса с данными эксплуатационных наблюдений потребуется значительный период времени, поскольку последние длятся 15–25 лет. Такие испытания совершенно не приемлемы в данном случае, поэтому ограничимся сравнением средних скоростей изменения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН.

При независимых выборках большого объёма выборочные средние распределены приближённо нормально, а выборочные дисперсии являются достаточно хорошими оценками генеральных дисперсий [46]. При имеющихся двух совокупностях с независимыми выборками объёмом n_y и $n_э$, для сравнения соответствующих выборочных средних y_y и $y_э$ выдвигается нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий H_0 при $M(y_y) = M(y_э)$ и альтернативная гипотеза H_1 при $M(y_y) \neq M(y_э)$.

Проверка гипотезы о равенстве средних значений скоростей изменения ПТС изоляции производится с помощью t -критерия Стьюдента [46,70,85,132]

$$t_{расч} = \frac{|y_y - y_э|}{\sqrt{\frac{s_y^2}{n_y} + \frac{s_э^2}{n_э}}}, \quad (3.30)$$

где $y_y, y_э$ – средние значения скорости изменения ПТС, соответственно по результатам ускоренных и эксплуатационных испытаний;

$s_y, s_э$ – средние квадратические отклонения скорости изменения ПТС, соответственно при ускоренных и эксплуатационных испытаниях;

$n_y, n_э$ – объём выборок наблюдения при ускоренных и эксплуатационных испытаниях.

По таблицам в справочной литературе [46] определяется табличное значение критерия Стьюдента $t_{табл}$ при известном числе степеней свободы для двух выборок $f = n_y + n_э - 2$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$. Если в результате получаем $t_{расч} < t_{табл}$, то подтверждается гипотеза о несущественности различия средних значений скоростей изменения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН.

3.11 Выводы по третьей главе

1. Оперативное проведение оценки качества изготовления плёночных электронагревателей и влияния принимаемых технических решений на их долговечность невозможно без научно обоснованной методики прогнозирования надёжности этих нагревателей. Предложенная методика ускоренных испытаний плёночных электронагревателей, состоящая из рассмотренных основных этапов её проведения, позволяет устанавливать распределение ресурса элементов и его результирующего значения для всего нагревателя по результатам экспериментальных исследований.

2. Из разработанных типоразмеров плёночных электронагревателей при испытаниях наиболее целесообразным представляется использование применяемых в системах теплового комфорта для поросят-сосунов ПЛЭН 0,65x1,5 м, ~220 В, 50 Гц, 175 Вт, которые и выбраны в качестве образцов для исследования.

3. На основании анализа условий работы плёночных электронагревателей на свиноводческих фермах и источников научно-технической информации выявлены основные факторы, существенно влияющие на их ресурс: напряжение питания, относительная влажность воздуха, концентрация аммиака в воздухе и режим включения. Для оценки статистических характеристик эксплуатационных факторов необходимо воспользоваться соответствующей приведённой методикой.

4. Для воспроизведения эксплуатационных условий режимов работы нагревателей при ускоренных испытаниях необходимо исследовать происходящие процессы нагрева и охлаждения. Для этого наиболее результативна методика определения постоянных нагрева и охлаждения ПЛЭН по экспериментальным кривым. Расчёт указанных постоянных возможен по методу наименьших квадратов, для которого получено аналитическое выражение.

5. Исследование скорости старения изоляции плёночных электронагревателей проводится по предложенной методике планирования полного факторного эксперимента первого порядка для трёх основных случайных факторов.

6. Ускоренные испытания по определению скорости изменения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН от основных факторов в диапазонах их эксплуатационных значений проводятся на рассмотренной испытательной установке.

7. Разработанное техническое средство для установления состояния изоляции плёночных электронагревателей позволяет проводить их испытания без фрагментирования, так как включает устройство для определения пробивного напряжения листовых электроизоляционных материалов.

8. Обработка экспериментальных данных, полученных путём реализации матрицы планирования ускоренных испытаний, проводится по стандартной методике. Прогнозирование ресурса элементов ПЛЭН реализуется методом математического моделирования Монте-Карло, для которого приведён алгоритм выполнения на ЭВМ. Оценка сходимости результатов ускоренных испытаний и эксплуатационных наблюдений проводится с помощью t -критерия Стьюдента.

Глава 4 Результаты и анализ экспериментальных исследований

Первоначально производится обоснование значений параметров для выбранных основных эксплуатационных факторов. Для установления режима включения рассчитываются постоянные нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей. Определяются значения скоростей и показателей характера изменения пробивного напряжения элементов изоляции нагревателей. Обработка полученных экспериментальных данных проводится по методике, изложенной в третьей главе. Дается количественная оценка значений ресурса исследуемых ПЛЭН. И наконец, производится сопоставление полученных результатов с данными реальной эксплуатации, а также оценивается экономическая эффективность предлагаемой методики ускоренных испытаний.

4.1 Параметры основных эксплуатационных факторов, влияющих на долговечность плёночных электронагревателей в свиноводстве

В ходе работы была произведена оценка статистических характеристик фактора напряжения питания. В сельской местности наблюдаются значительные колебания напряжения. Экспериментальное исследование значений фазного напряжения проводилось на ЗАО «Зауральский» Щучанского района Курганской области. Замеры осуществлялись в течение 25 дней каждый час с 8:00 до 17:00 (приложение Б, таблица Б.1). Напряжение измеряли в каждой из фаз трёхфазной системы.

Для экспериментальных данных питающего фазного напряжения была проведена аппроксимация теоретическим законом распределения. По внешнему виду гистограмма распределения опытных данных имеет вид колокола, поэтому аппроксимацию проводили для нормального закона по методике, изложенной в п. 3.3 и справочной литературе [28,46,70].

Расчётные значения числа групп для объёма выборки 750 единиц по различным формулам составили [102]: Стёрджесса – 11; Скотта – 9; Фридмана-

Диакониса – 9. Было принято 9 равных интервалов. В результате имеющийся статистический ряд был разбит на соответствующие равные интервалы (рисунок 4.1) для проверки соответствия нормальному закону распределения.

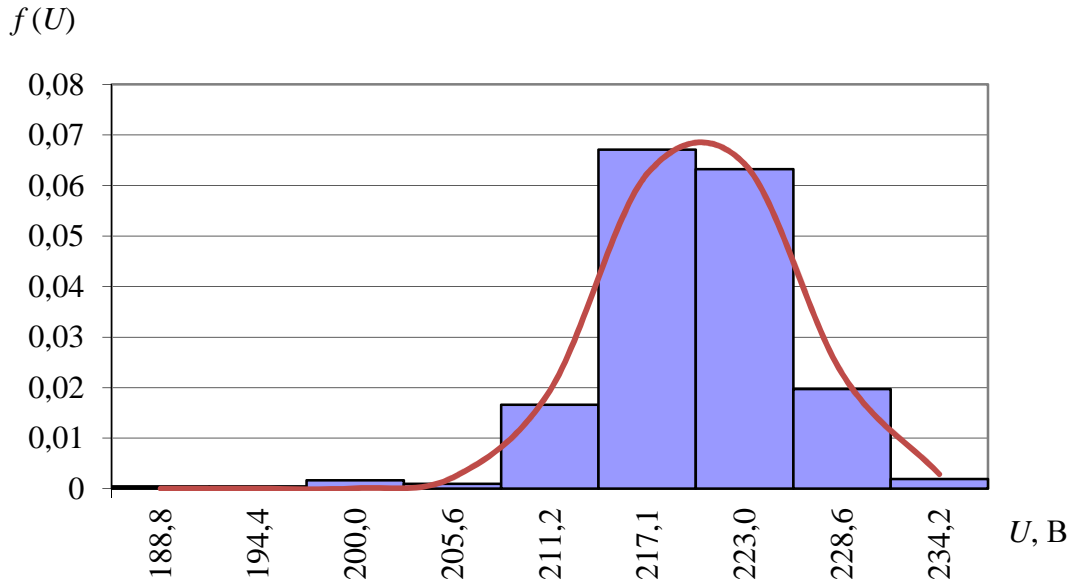


Рисунок 4.1 – Плотность распределения питающего фазного напряжения

Результаты расчётов для проверки статистической гипотезы о принадлежности опытного распределения фазного напряжения нормальному закону для наглядности сведены в таблицу Б.2 приложения Б, а расчёт теоретических частот нормального распределения для исходного ряда приведён в таблице Б.3 приложения Б.

В результате полученное расчётное значение критерия Пирсона $\chi^2_{расч} = 9,83$. Табличное же значение критерия Пирсона $\chi^2_{табл}$ при числе степеней свободы $m-3=6$ [46] и уровне значимости 0,05 равно 12,59. Так как $\chi^2_{расч} < \chi^2_{табл}$, значит экспериментальные данные не противоречат теоретическому распределению нормального закона с принятой вероятностью.

Проверка с помощью критерия Б. С. Ястремского показала то же

$$l = \frac{9,83 - 9}{\sqrt{2 \cdot 9 + 4 \cdot 0,6}} = |0,18| < 3.$$

Таким образом, подтверждается гипотеза о распределения фазного напряжения по нормальному закону. Значения статистических характеристик фазного напряжения были проверены в специализированном пакете обработки данных SPSS Statistics 17.0 [22,150].

Полученные данные распределения согласуются с приведёнными в диссертационной работе М. С. Швецова [145] исследованиями напряжения на катушке магнитных пускателей в процессе эксплуатации в условиях животноводства. Для них напряжение распределено по нормальному закону со следующими статистическими характеристиками: математическое ожидание $\bar{U} = 220,37$ В; среднее квадратическое отклонение $\sigma_U = 6,08$ В.

Таким образом, полученные значения статистических характеристик напряжения питания можно использовать для планирования многофакторного эксперимента:

- выборочная средняя $\bar{x}_B = 220,2$ В;
- выборочное среднее квадратическое отклонение $\sigma_B = 5,5$ В.

Сведения о факторах окружающей среды в сельскохозяйственных помещениях по данным источников научно-технической информации отличаются некоторой разрозненностью. В диссертации Р. В. Банина [4] проведена обработка имеющихся данных значений воздействующих факторов для различных видов помещений, эти данные систематизированы и дополнены. По данным этой работы для сырых помещений сельскохозяйственного производства численные значения статистических характеристик относительной влажности составили: математическое ожидание $\bar{W} = 86,0$ %; среднее квадратическое отклонение $\sigma_W = 2,8$ %. Соответственно для концентрации аммиака: математическое ожидание $\bar{Q} = 0,036$ г/м³; среднее квадратическое отклонение $\sigma_Q = 0,012$ г/м³.

Ранее В. А. Буторин [21] была проведена проверка распределения параметра относительной влажности в свиарниках по нормальному закону и получены следующие характеристики: математическое ожидание $\bar{W} = 84,0$ %; среднее квадратическое отклонение $\sigma_W = 5,3$ %. Также у данного автора [14] приводятся

следующие параметры концентрации аммиака в животноводческих помещениях с нормальным распределением: $\bar{Q} = 0,021 \text{ г/м}^3$; $\sigma_Q = 0,005 \text{ г/м}^3$.

Предельно-допустимая концентрация аммиака в воздухе рабочей зоны для людей согласно действующего ГОСТ 12.1.005-88 составляет 20 мг/м^3 [49]. Согласно зоотехническим требованиям к содержанию свиней относительная влажность воздуха в помещениях должна быть 50-75 %, концентрация аммиака не должна превышать $21,3 \text{ мг/м}^3$ [56]. Исходя из зоогигиенических требований и основных параметров микроклимата для свиней допустимая концентрация аммиака по справочным данным 20 мг/м^3 [78,134]. С учётом того, что в источниках научной информации приведены данные параметров микроклимата, превышающие соответствующие зоотехнические нормы для помещений, производится уточнение исходных данных для ускоренных испытаний. Сводные данные по статистическим характеристикам рассматриваемых случайных факторов сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Статистические характеристики основных эксплуатационных факторов ПЛЭН

| Наименование фактора, единица измерения | Кодовое обозначение | Статистические характеристики | |
|--|------------------------|-------------------------------|---|
| | | Среднее значение \bar{X} | Среднее квадратическое отклонение σ_x |
| Напряжение питания U , В | x_1 | 220,2 | 5,5 |
| Относительная влажность воздуха W , % | x_2 | 84 | 5,3 |
| Концентрация аммиака Q , г/м^3 | x_3 | 0,015 | 0,005 |

В результате установлено, что основные варьируемые эксплуатационные факторы для проведения ускоренных испытаний распределены по нормальному закону. Тогда уровни их интервалов варьирования для ускоренных испытаний бу-

дут находиться в пределах $\bar{X} \pm 3\sigma_x$ [46]. Значения этих уровней приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Уровни варьирования основных факторов при проведении ускоренных испытаний ПЛЭН

| Наименование фактора, единица измерения | Кодовое обозначение | Уровень варьирования | | | |
|--|------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | нижний (-1) | основной (0) | верхний (+1) | интервал (1) |
| Напряжение питания U , В | x_1 | 205 | 220 | 235 | 15 |
| Относительная влажность воздуха W , % | x_2 | 70 | 85 | 100 | 15 |
| Концентрация аммиака Q , г/м ³ | x_3 | 0 | 0,015 | 0,030 | 0,015 |

Неварьируемым эксплуатационным фактором при проведении ускоренных испытаний является режим включения. Для установления режима включения необходимо определить постоянные нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей (п. 4.2).

4.2 Определение постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей

В ходе работы над диссертацией в лаборатории кафедры ЭМЭЭСХ ЧГАА проведены экспериментальные замеры зависимости температуры (τ , °С) от времени нагрева (t , мин) ПЛЭН при температуре окружающей среды 22 °С, что соответствует условиям эксплуатации. Измерения проводились с помощью современной аппаратуры. Были подключены четыре датчика термопары для фиксации температуры в месте измерения, а также проводился замер общей температуры в помещении. Длительность интервалов измерения задавалась при помощи устройства управления, сигналы с которого передавались непосредственно на персо-

нальный компьютер с последующим выводом полученных результатов в виде электронной базы данных. Для расчёта брались средние значения по замерам для наиболее прогретой зоны, так как от месторасположения исследуемых точек на поверхности нагревателя постоянные нагрева и охлаждения не зависят.

Включение нагревателей производилось при температуре изоляции равной температуре окружающей среды. В процессе нагрева ПЛЭН температура окружающего воздуха изменялась незначительно. Полученные экспериментально данные процесса нагрева плёночных электронагревателей представлены в таблице В.1 приложения В. На основании проведённых опытов была снята зависимость (рисунки 4.2, 4.3) в виде температуры ПЛЭН в месте расположения токопроводящей ленты. По экспериментальным данным, сглаженным методом наименьших квадратов, построена кривая нагрева. В дальнейшем по построенной кривой была определена постоянная времени нагрева ПЛЭН графическим и численным методами.

Вытянутость кривой нагрева вдоль асимптоты установившегося значения температуры объясняется присутствием отдачи тепла в окружающую среду практически сразу после включения плёночного электронагревателя. Поэтому и появляется задержка времени до достижения установившейся температуры.

Установившееся значение температуры $\tau_{уст}$ определено графическим методом согласно существующей методике [3] и представлено на рисунке 4.2. Температура изоляции в различных точках даже для одного нагревателя может колебаться из-за неодинаковой ширины резистивной ленты на отдельных участках. Например, для электрических машин в качестве постоянной времени нагрева принимается постоянная наиболее ответственной её части, отражающая общий тепловой режим работы. Установлено, что для рассмотренного участка токопроводящей ленты исследуемого ПЛЭН установившееся значение температуры $\tau_{уст} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$.

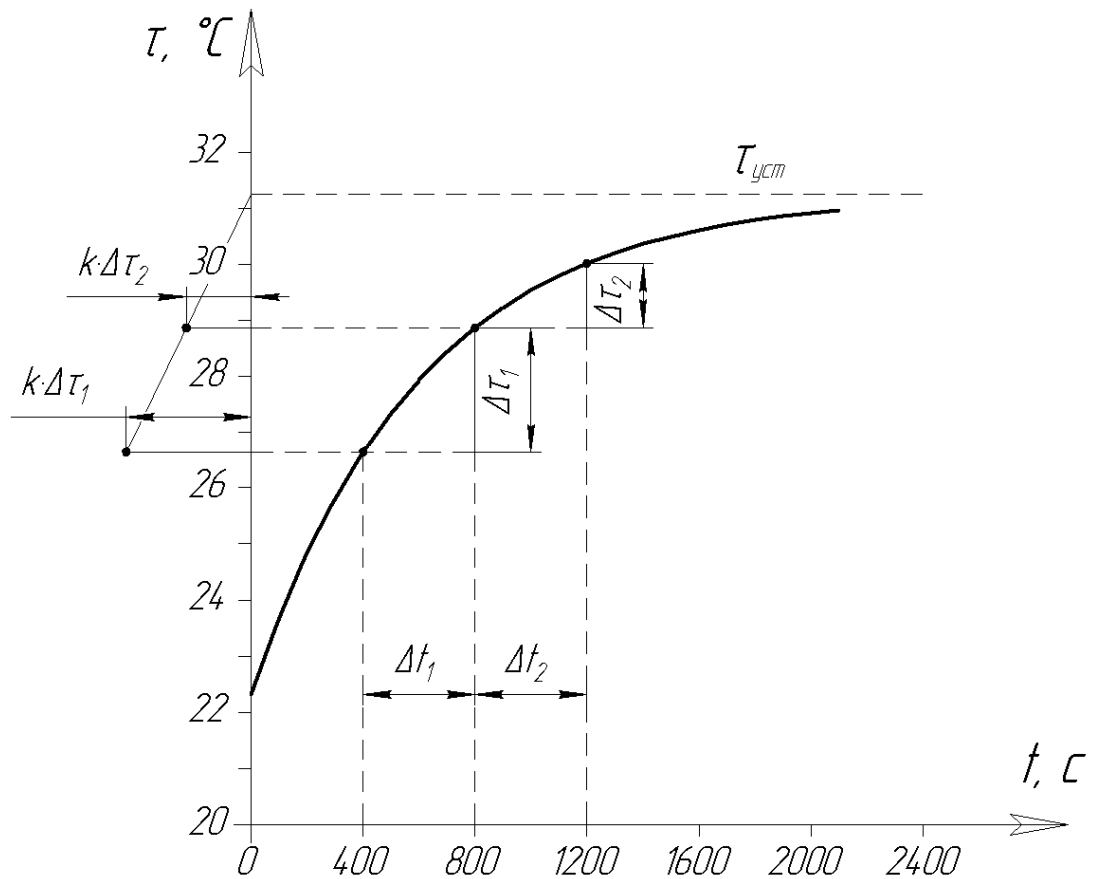


Рисунок 4.2 – Графическое определение установившейся температуры нагрева ПЛЭН

Расчёт коэффициента b_1 произведён методом наименьших квадратов аналогично формуле (2.25) для определения показателя α , по методике п. 3.4 с использованием табличного редактора Excel пакета Microsoft Office [1,24]. Результаты расчёта представлены в таблице В.2 приложения В. По полученному значению b_1 вычисляем значение постоянной времени нагрева ПЛЭН

$$T_H = \frac{1}{b_1} = \frac{1}{1,195 \cdot 10^{-3}} = 837 \text{ с.} = 14 \text{ мин.}$$

Также производилась проверка полученного значения графическим методом трёх касательных по методике, изложенной в п. 3.4 (рисунок 4.3). Значение постоянной времени нагрева, вычисленное по формуле (3.13)

$$T_H = \frac{589 + 610 + 604}{3} = 601 \text{ с.} = 10 \text{ мин.}$$

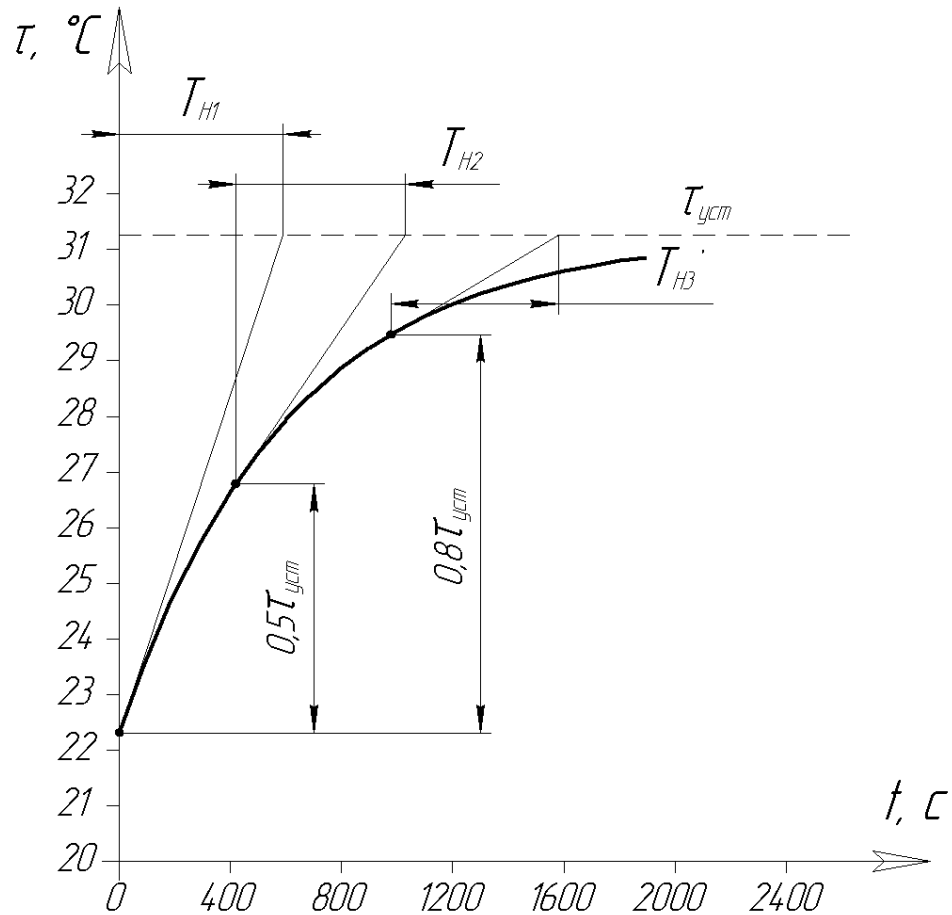


Рисунок 4.3 – Определение постоянной времени нагрева ПЛЭН методом трёх касательных на кривой нагрева

Расхождение значений постоянной времени нагрева, определённых графическим и аналитическим способами, имеет место из-за принципа расчёта. Для определения постоянной нагрева графическим методом использовались данные, обработанные методом наименьших квадратов [2,10,47] для исключения ошибок эксперимента и получения адекватной кривой. Между тем, аналитический метод хотя и является более трудозатратным, но в то же время более точен, и предпочтителен для последующего анализа. Так как условия теплоотдачи при нагреве и охлаждении ПЛЭН одинаковы, то принимаем $T_H = T_O = 14$ мин.

Из результатов исследования процессов нагрева и охлаждения рассматриваемых нагревателей в логовах для поросят-сосунов следует, что они в процессе работы не достигают установившейся температуры. Работа плёночных электронагревателей в этом случае составляет в холодные периоды на территории Челябинской области около 40 % общего времени при общей температуре в свиарни-

ке $10\div 14$ °С. При этом период охлаждения превышает период работы. Так как в этом случае процессы, влияющие на старение изоляции, не приводят к дальнейшему усилению их влияния – нет необходимости выдерживать реальное время простоя при ускоренных испытаниях, и за счёт этого сократить время их проведения. На основании определённого значения T_H согласно (3.12) время достижения ПЛЭН требуемой температуры при эксплуатации составляет 15 мин. Таким образом, при ускоренных испытаниях время включения и отключения плёночных электронагревателей принято равным 15 мин.

4.3 Определение показателей изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей в зависимости от наработки

До момента проведения настоящих исследований в источниках научно-технической информации отсутствовали данные о характере изменения параметра состояния изоляции плёночных электронагревателей – пробивного напряжения от наработки. В данной работе показатель процесса изнашивания α , определяющий характер изменения пробивного напряжения в зависимости от наработки, определялся по результатам ускоренных испытаний. По методике, изложенной в п. 2.3, основные эксплуатационные факторы поддерживались на одном уровне.

В результате предварительных исследований были установлены три участка наибольшего снижения пробивного напряжения изоляции плёночных электронагревателей: с токопроводящей лентой (ТПЛ), перегиба токопроводящей ленты (ПТПЛ), контакта токопроводящей ленты с питающими проводами (КТПЛ). Поэтому в работе эти участки рассматриваются как основные элементы нагревателя, определяющие ресурс ПЛЭН.

Через определённые периоды времени проводились замеры пробивного напряжения изоляции ПЛЭН. В результате эксперимента на испытательной установке были получены численные значения изменения пробивного напряжения основных элементов изоляции плёночных электронагревателей от наработки.

В ходе замеров были выявлены явные выпадения значений пробивного напряжения ПЛЭН в начале характеристики. По графической зависимости оказалось возможным визуальное определение точки перегиба кривой $U = f(t)$, разделяющей начальный период стабилизации от периода нормального изменения параметра. Анализ экспериментальной кривой изменения пробивного напряжения элементов изоляции от наработки (рисунок 4.4) на примере ТПЛ показал наличие точки перегиба. Это свидетельствует о наличии периода стабилизации пробивного напряжения, который составил 5 тыс. часов для данного электрооборудования.

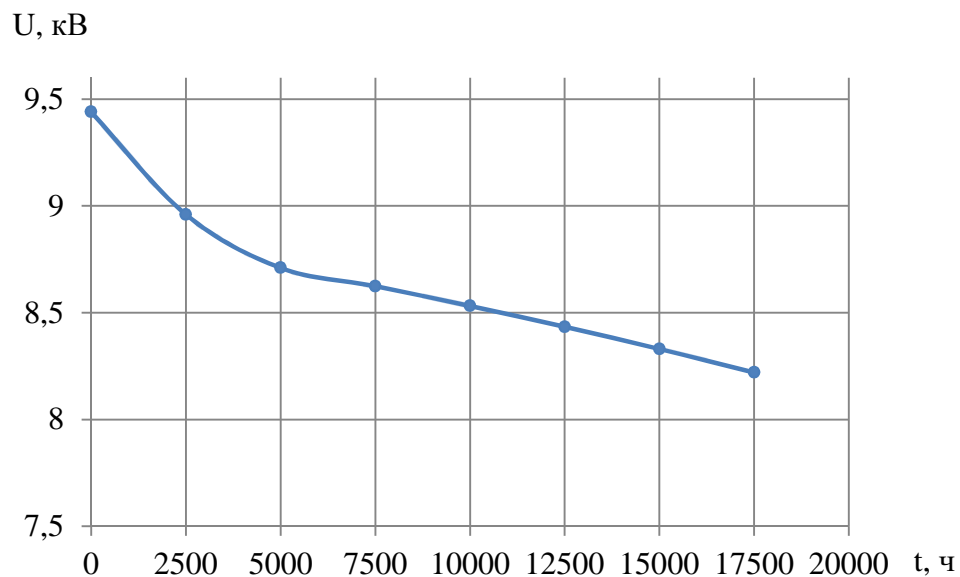
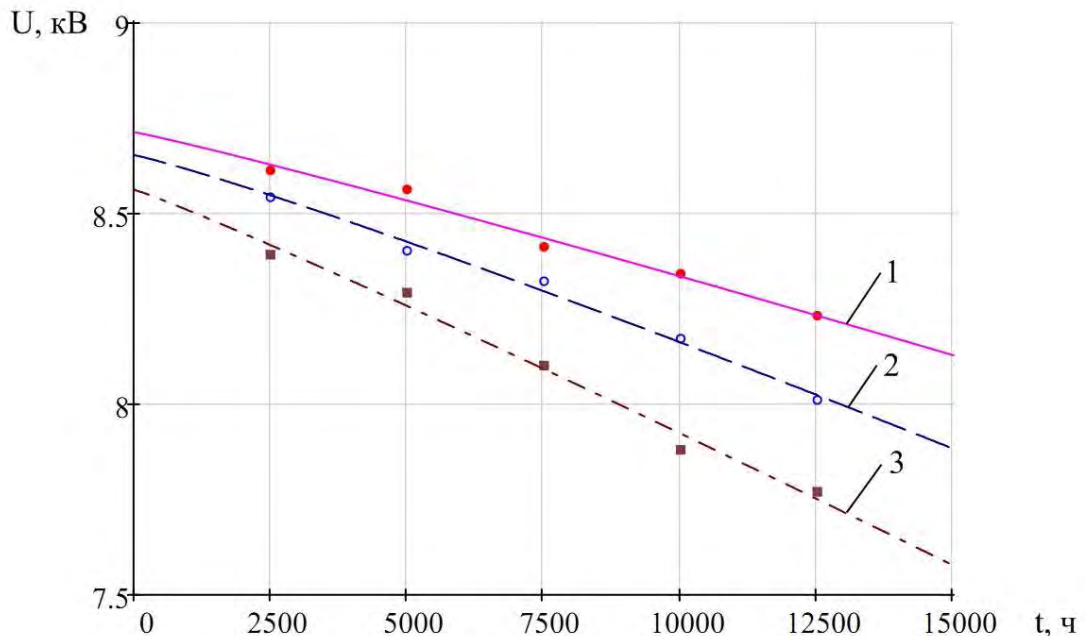


Рисунок 4.4 – Характер изменения пробивного напряжения элемента изоляции ПЛЭН с токопроводящей лентой в зависимости от наработки

По полученным данным были построены кривые [16] изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН, кВ, в зависимости от наработки, ч (рисунок 4.5). Точками изображены экспериментальные данные, а линиями – кривые зависимости на основании исходного выражения (2.1). Расчёт значений показателя α произведён методом наименьших квадратов согласно ранее изложенной методике п. 2.3 по формуле (2.25) с использованием табличного редактора Excel пакета Microsoft Office [1,24]. Результаты расчёта представлены в приложении Г, таблицы Г.1–Г.3. На основании полученных значений $\alpha > 1$ можем сделать вывод,

что абсолютная величина скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН при постоянных условиях испытаний будет расти с увеличением наработки.



1 – ТТЛ ($\alpha_1 = 1,05$); 2 – ПТТЛ ($\alpha_2 = 1,08$); 3 – КТТЛ ($\alpha_3 = 1,12$)

Рисунок 4.5 – Характер изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН после периода стабилизации

Элементы изоляции контакта токопроводящей ленты с питающими проводами имеют наибольший прирост скорости старения при увеличении наработки. Вследствие этого, существующая практика изготовления ПЛЭН с большим количеством паяных соединений, наряду с уменьшением трудозатрат и себестоимости, с точки зрения эксплуатации имеет отрицательные последствия в виде уменьшения надёжности нагревателей, по сравнению с применением цельных материалов.

4.4 Аналитическая зависимость скорости старения элементов изоляции плёночных электронагревателей от действующих на них факторов

При реализации матрицы планирования эксперимента, представленной в п. 3.5, получены результаты скорости изменения пробивного напряжения элемен-

тов изоляции ПЛЭН от действующих факторов для трёх её основных элементов (приложение Д, таблицы Д.1–Д.3) с помощью технических средств, изложенных в пп. 3.6–3.7. Период стабилизации ПЛЭН был взят равным 5 тыс. часов. Контрольные значения пробивного напряжения для вычисления скорости его изменения проводились после 750 часов работы нагревателей.

На основании методики, изложенной в п. 3.8, разработана программа обработки экспериментальных данных в математическом пакете MathCAD для полного факторного эксперимента типа 2^3 (приложение Е). При составлении программы обработки результатов использовались принятые обозначения и существующие методы решения поставленных задач в данном программном пакете символьной математики [64,86,87,104,111]. Обработка данных содержит: проверку воспроизводимости опытов по критерию Кохрена, расчёт коэффициентов уравнений регрессии, проверку их значимости по величине доверительного интервала с использованием критерия Стьюдента и проверку адекватности полученной модели по критерию Фишера. Результаты статистической обработки экспериментальных данных ускоренных испытаний по определению скорости старения элементов изоляции ПЛЭН приведены в таблице Е.1 приложения Е. В данном месте и далее расчёты приведены для абсолютных значений $y(t=1)$ с последующей подстановкой в итоговый результат знака «минус».

В результате обработки экспериментальных данных ускоренных испытаний в пакете MathCAD получены следующие аналитические зависимости скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН $y(t=1)$ по выражению (2.28), В/ч:

- с токопроводящей лентой

$$y_1(t=1) = - (10,24 + 2,07 \cdot x_2 + 1,41 \cdot x_3 + 0,41 \cdot x_2 \cdot x_3) \cdot 10^{-2}, \quad (4.1)$$

- перегиба токопроводящей ленты

$$y_2(t=1) = - (9,17 + 1,72 \cdot x_2 + 1,04 \cdot x_3 + 0,27 \cdot x_2 \cdot x_3) \cdot 10^{-2}, \quad (4.2)$$

- контакта токопроводящей ленты с питающими проводами

$$y_3(t=1) = - (8,11 + 2,25 \cdot x_2 + 1,09 \cdot x_3 + 0,38 \cdot x_2 \cdot x_3) \cdot 10^{-2}. \quad (4.3)$$

Анализ уравнений регрессии (4.1)...(4.3) показывает, что факторы имеют разную степень влияния на старение элементов ПЛЭН. Основное влияние оказывает относительная влажность воздуха, затем – концентрация аммиака в окружающей среде, и в последнюю очередь – взаимное влияние влажности и агрессивности среды. Фактор напряжения питания в рассматриваемых пределах не значим.

Данные выводы подтверждаются фактом, что в процессе работы температура изоляции существенно ниже предельно-допустимой. Поэтому данная изоляция имеет хороший запас теплостойкости при номинальных режимах работы ПЛЭН, что обеспечивает их надёжность. Отказ изоляции плёночных электронагревателей в системах теплового комфорта наиболее вероятен из-за увлажнения в период простоя и воздействия агрессивной аммиачной среды.

Переход от зависимостей с факторами в кодированном виде (4.1)...(4.3) к моделям с натуральными значениями проводится с помощью выражения (3.15) с учётом уровней их варьирования (таблица 4.2). Раскодирование выражений (4.1)...(4.3) проводилось по формулам

$$x_1 = \frac{U - 220}{15}, \quad (4.4)$$

$$x_2 = \frac{W - 85}{15}, \quad (4.5)$$

$$x_3 = \frac{Q - 0,015}{0,015}. \quad (4.6)$$

В результате подстановки и последующих преобразований получаем следующие уравнения $y(t=1)$ для соответствующих элементов, В/ч:

$$y_1(t=1) = - (-0,572 + 0,111 \cdot W - 61,67 \cdot Q + 1,83 \cdot W \cdot Q) \cdot 10^{-2}, \quad (4.7)$$

$$y_2(t=1) = - (-0,083 + 0,097 \cdot W - 33,15 \cdot Q + 1,20 \cdot W \cdot Q) \cdot 10^{-2}, \quad (4.8)$$

$$y_3(t=1) = - (-3,561 + 0,124 \cdot W - 72,04 \cdot Q + 1,70 \cdot W \cdot Q) \cdot 10^{-2}. \quad (4.9)$$

На основании полученных полиномиальных зависимостей и данных таблицы 4.2 можно перейти к оценке ресурса элементов ПЛЭН.

4.5 Оценка ресурса плёночных электронагревателей по результатам ускоренных испытаний

Так как уравнения (4.1)...(4.3) содержат коэффициенты взаимодействий, то мы не можем применять формулы (2.36), (2.37) для определения параметров математического ожидания и среднего квадратического отклонения скорости изменения пробивного напряжения. Поэтому будет нецелесообразно использовать методику, изложенную в п. 2.2. В данном случае для расчёта ресурса плёночных электронагревателей необходимо использовать методику п. 2.6.

На основе принятого порядка обработки экспериментальных данных [126] оценка ресурса ПЛЭН включает в себя этапы:

- 1) моделирование распределений факторов с помощью генератора случайных чисел;
- 2) вычисление значений ресурса и получение его статистического ряда;
- 3) определение среднего значения и среднего квадратического отклонения;
- 4) проверка информации на выпадающие точки;
- 5) построение гистограмм распределения ресурса;
- 6) построение полученных графических характеристик дифференциальной плотности распределения ресурса элементов $f_i(t)$, вероятности безотказной работы отдельных элементов $P_i(t)$ и нагревателя в целом $P(t)$;
- 7) вычисление средних значений ресурса элементов ПЛЭН и его параметров, а также расчёт ресурса плёночных электронагревателей в целом.

Первоначальным этапом статистического моделирования является определение объёма выборки ΣN . При $\alpha \leq 0,2$ и $\Sigma N \geq 80$ из формулы $\varepsilon_\alpha \approx \sqrt{-1/2 \ln(\alpha/2)} / \sqrt{\Sigma N}$ можно выразить значение необходимого объёма выборки [105]

$$\Sigma N \approx \sqrt{-1/2 \ln(\alpha/2)} / \varepsilon_\alpha^2, \quad (4.10)$$

где α – уровень значимости, $\alpha = 0,05$;

$$\varepsilon_\alpha = d_\alpha / \sqrt{\Sigma N} \text{ – относительная точность (ошибка), } \varepsilon_\alpha = 0,05;$$

d_α – критическое значение статистики Колмогорова при уровне значимости α .

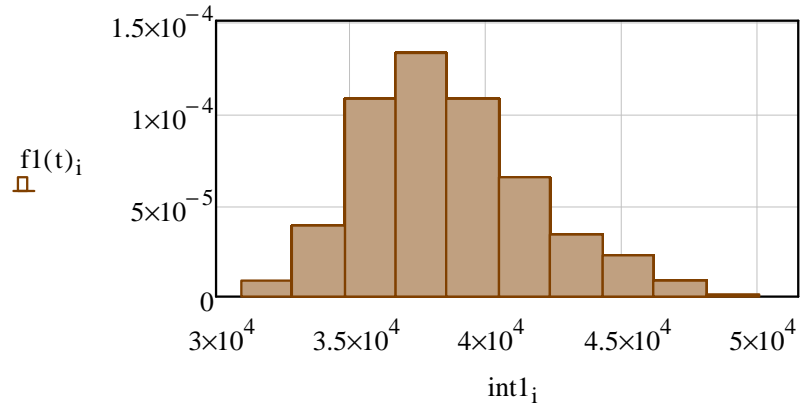
Для указанных значений объём выборки равен

$$\Sigma N \approx \sqrt{-1/2 \ln(0,05/2)} / 0,05^2 = 738.$$

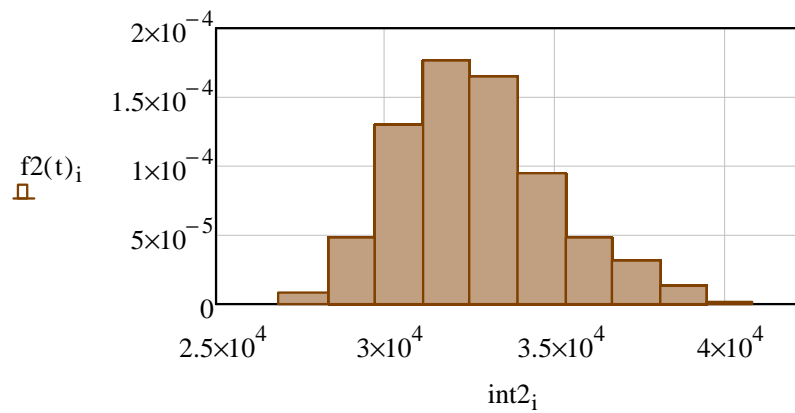
При большом количестве изделий статистическая оценка вероятности безотказной работы практически совпадает с вероятностью $P(t)$ [84]. Выборки значений факторов для нормального распределения получены с помощью встроенного генератора случайных чисел математического пакета MathCAD [64,86,87,104,111]. По разработанной схеме алгоритма статистического моделирования (рисунок 3.11) в математическом пакете MathCAD проведён расчёт и определение статистических характеристик параметров распределения ресурса элементов ПЛЭН. В результате статистического моделирования были получены гистограммы распределения ресурса элементов ПЛЭН, приведённые на рисунке 4.6 [28,46].

После стабилизации работы ПЛЭН значение пробивного напряжения изоляции на различных элементах отличалось незначительно. При расчётах начальное значение пробивного напряжения изоляции ПЛЭН после периода стабилизации для всех элементов принято $U_{0cp} = 8,7$ кВ.

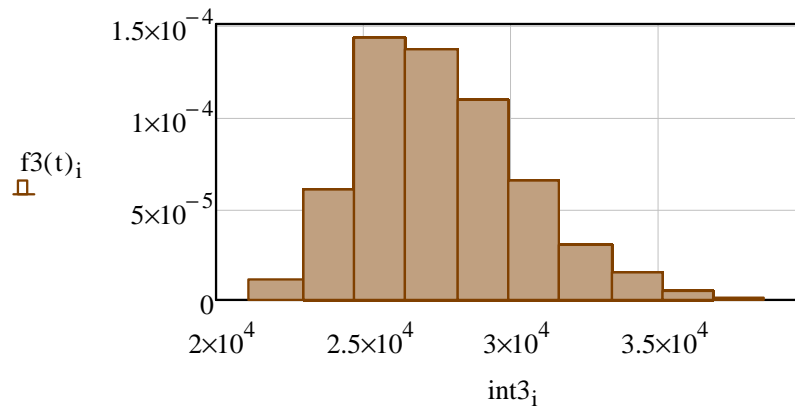
Также получены графики плотности распределения ресурса $f_i(t)$ элементов ПЛЭН (рисунок 4.7). Графики функции вероятности безотказной работы (ВБР) $P_i(t)$ для различных элементов ПЛЭН получены из функций распределения $F_i(t)$ как $P_i(t) = 1 - F_i(t)$ в пакете MathCAD (рисунок 4.8).

Ресурс t_1 , ч

а)

Ресурс t_2 , ч

б)

Ресурс t_3 , ч

в)

а – ТПЛ $f_1(t)$; б – ПТПЛ $f_2(t)$; в – КТПЛ $f_3(t)$

Рисунок 4.6 – Гистограммы плотности распределения ресурса отдельных элементов ПЛЭН

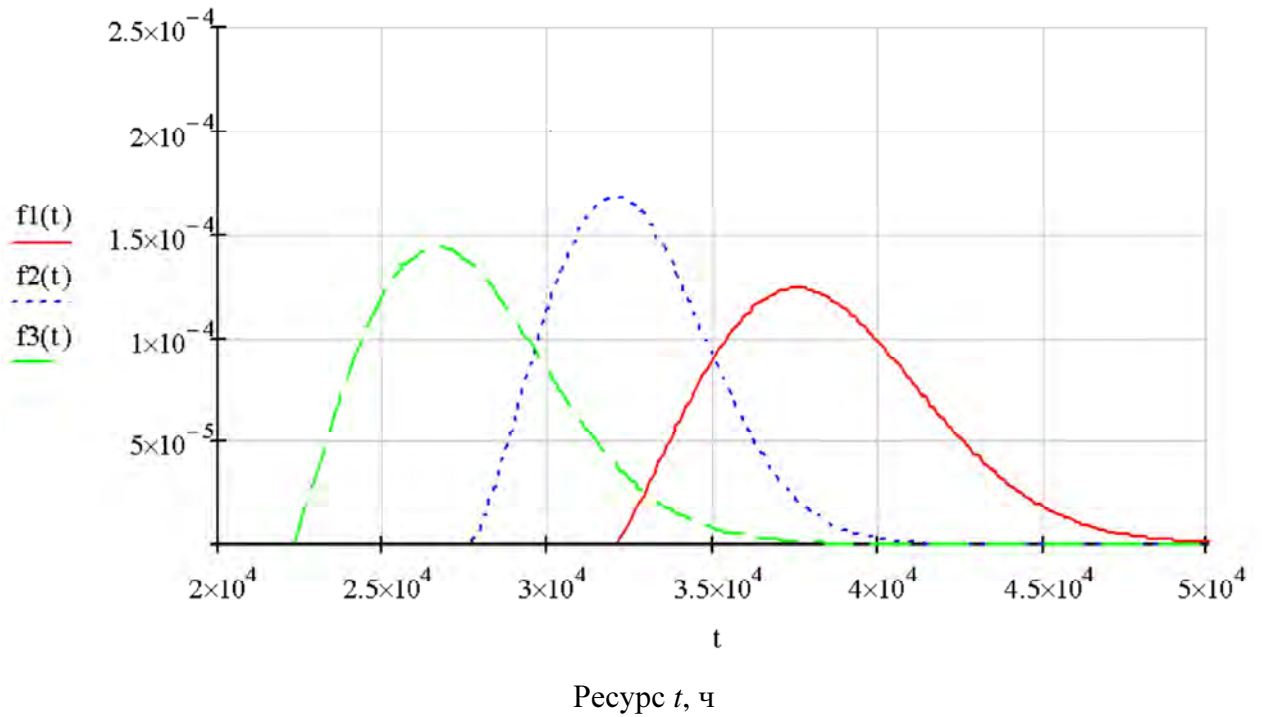


Рисунок 4.7 – Плотности распределения ресурса $f_i(t)$ отдельных элементов ПЛЭН

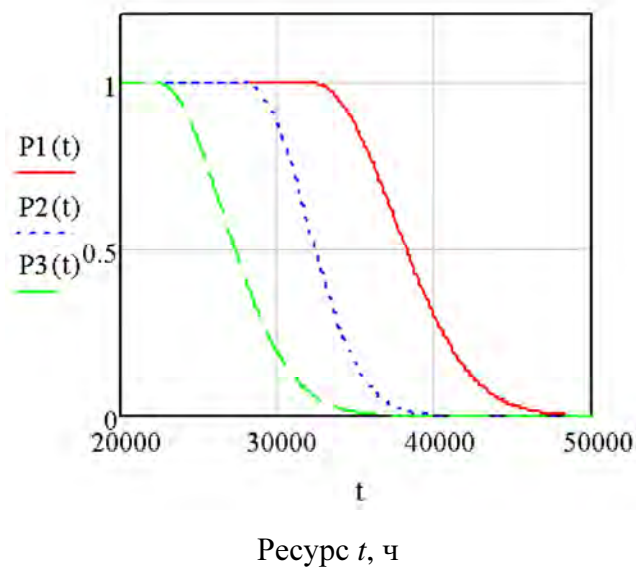


Рисунок 4.8 – Вероятности безотказной работы $P_i(t)$ отдельных элементов ПЛЭН без учёта периода стабилизации

Таким образом, на основании полученных результатов по интегральной формуле (2.23) получены следующие значения среднего ресурса элементов изо-

ляции ПЛЭН без учёта периода стабилизации: ТПЛ – 38,5 тыс. ч.; ПТПЛ – 32,6 тыс. ч.; КТПЛ – 27,6 тыс. ч. С учётом периода стабилизации 5 тыс. ч. значения среднего ресурса элементов ПЛЭН соответственно составляют: 43,5, 37,6 и 32,6 тыс. ч.

Для вычисления надёжности плёночный электронагреватель можно представить в виде следующих блоков: изоляционная плёнка, резистивная ленточная токонагревательная полоса, алюминиевая фольга для направленного излучения, провода питания. В свою очередь блоки делятся на узлы, которые с точки зрения физической структуры и функционирования представляют автономную единицу [84]. Изоляцию нагревателя представляем в виде цепи из различных элементов: с токопроводящей лентой, перегиба токопроводящей ленты, контакта токопроводящей ленты с питающими проводами. При расчёте надёжность однотипных элементов принимается одинаковой.

Отказ возникает при пробое изоляции, то есть приложении напряжения, превышающем электрическую прочность. При статистическом моделировании искомое значение ресурса получается при предельном состоянии изоляции ПЛЭН. В этом случае наиболее вероятен выход из строя элемента изоляции, имеющего наименьшую диэлектрическую прочность, что согласуется с исследованиями О. Д. Гольдберга статорных обмоток асинхронных двигателей.

Надёжность ПЛЭН в целом, состоящим из последовательно соединённых элементов, в рассматриваемом нами случае на основании формулы (2.19) будет определяться следующим образом

$$P_{\text{ПЛЭН}}(t) = [P_1(t)]^{r_1} \cdot [P_2(t)]^{r_2} \cdot [P_3(t)]^{r_3}. \quad (4.11)$$

где $P_1(t)$, r_1 – ВБР и количество элементов ТПЛ, $r_1=16$;

$P_2(t)$, r_2 – ВБР и количество элементов ПТПЛ, $r_2=30$;

$P_3(t)$, r_3 – ВБР и количество элементов КТПЛ, $r_3=2$.

Был получен график функции результирующей вероятности безотказной работы $P(t)$ ПЛЭН (рисунок 4.9) без учёта периода стабилизации. Расчёт ресурса T ПЛЭН произведён в пакете MathCAD (приложение Ж).

После изготовления элементы ПЛЭН имеют высокое пробивное напряжение, и вероятность безотказной работы близка к единице. Однако в результате старения электроизоляционного материала пробивное напряжение изоляции снижается и, соответственно, уменьшается вероятность безотказной работы рассматриваемого ПЛЭН. Данная зависимость нашла отображение на приведённых графиках. В конечном итоге оценивается вероятность того, что приложенное к изоляции напряжение превысит пробивное в различные моменты времени.

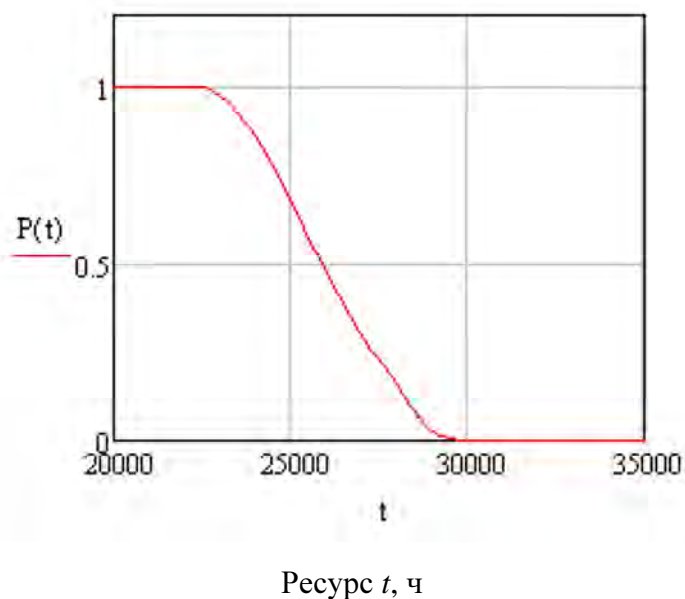


Рисунок 4.9 – Функция вероятности безотказной работы $P(t)$ ПЛЭН без учёта периода стабилизации

Средний ресурс T ПЛЭН в целом по результатам исследований без учёта периода стабилизации по формуле (2.23) составил 26,0 тыс. ч. Средний ресурс в целом близок к значению этого ресурса для наиболее подверженного старению элемента ПЛЭН. Это вполне справедливо, так как надёжность технического изделия определяется по наиболее «слабому» элементу.

На основании полученных данных можно определить и другой показатель долговечности: «гамма-процентный ресурс» – ресурс, в течение которого изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах [61]. Рассчитаны соответствующие основные значения γ -процентного ресурса

ПЛЭН (таблица 4.3) с учётом периода стабилизации 5 тыс. ч. в пакете MathCAD на основании формулы (2.24) для заданных значений вероятности безотказной работы.

Таблица 4.3 – Численные значения гамма-процентного ресурса ПЛЭН с учётом периода стабилизации

| Статистическая характеристика ресурса | Гамма-процентный ресурс T_γ , тыс. ч. | | | | |
|---------------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | $\gamma=99,9$ | $\gamma=90$ | $\gamma=80$ | $\gamma=50$ | $\gamma=0,1$ |
| Числовое значение | 27,4 | 28,7 | 29,4 | 31,0 | 34,9 |

Полученные значения гамма-процентного ресурса ПЛЭН наглядно в числовом виде отображают статистические характеристики ресурса рассматриваемых плёночных электронагревателей в свиноводстве.

4.6 Сопоставление результатов ускоренных и эксплуатационных испытаний плёночных электронагревателей

Сопоставление результатов ускоренных и эксплуатационных испытаний проводится на основании данных, полученных в ходе исследований в лаборатории и на производственном комплексе по выращиванию свиней. Эксплуатационные испытания плёночных электронагревателей проводились с 2006 г. на базе Уральской государственной академии ветеринарной медицины (г. Троицк, Челябинская область) в учебно-опытном хозяйстве. Сравнение осуществляется по средним значениям скоростей изнашивания ПЛЭН, так как средний ресурс данных нагревателей при нормальных неагрессивных условиях работы достаточно велик и может достигать величины 50 тыс. ч., что может составить 40 лет при режиме включения для логова поросят-сосунов. Такой период времени является нецелесообразным с точки зрения значительности периода получения результатов, которые могут оказаться уже ненужными и будут носить исторический характер.

Проверка соответствия результатов ускоренных и эксплуатационных испытаний проводится по методике, описанной в п. 3.10 настоящей работы, и результаты сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение средних скоростей изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН при проведении ускоренных и эксплуатационных испытаний

| Элемент изоляции ПЛЭН | Ускоренные испытания | | Эксплуатационные испытания | |
|---|----------------------|-------------|----------------------------|---------------|
| | u_y , В/ч | s_y , В/ч | $u_{э}$, В/ч | $s_{э}$, В/ч |
| с токопроводящей лентой | -0,102 | 0,026 | -0,109 | 0,029 |
| перегиба токопроводящей ленты | -0,092 | 0,021 | -0,101 | 0,025 |
| контакта токопроводящей ленты с питающими проводами | -0,081 | 0,026 | -0,089 | 0,031 |

План определительных эксплуатационных испытаний на надёжность выбран согласно рекомендации Приложения 3 РД 50-690-89 [124]. Далее по таблице 6 Приложения 4 определён необходимый объём испытаний для оценки показателя надёжности для ресурса, предельной относительной ошибке $\varepsilon = 0,10$ и доверительной вероятности $q = 0,80$. Таким образом, количество ПЛЭН для эксплуатационных испытаний составляет 13 образцов, а для ускоренных испытаний, согласно плану многофакторного эксперимента, равно 24.

Проверка существенности различий средних значений скоростей изменения параметра состояния изоляции ПЛЭН проводилась по t -критерию Стьюдента по выражению (3.30) с помощью встроенных функций табличного редактора Excel пакета Microsoft Office. Полученные расчётные значения $t_{расч}$ для сравниваемых данных соответственно равны: ТПЛ – 0,64; ПТПЛ – 1,11; КТПЛ – 0,80.

Табличное значение критерия Стьюдента $t_{табл}$ для числа степеней свободы $f = 24 + 13 - 2 = 35$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$ равно 2,03 [46]. Поскольку рассчитанные значения статистики t не попадают в критическую область ($t_{расч} < t_{табл}$), то

принимается нулевая гипотеза несущественности различия средних значений. То есть можно считать, что средние значения скоростей изменения пробивного напряжения изоляции ПЛЭН при ускоренных и эксплуатационных испытаниях равны с вероятностью больше чем 0,95.

Проведённые расчёты указывают на однородность полученных результатов ускоренных и эксплуатационных испытаний плёночных электронагревателей. Таким образом, использовавшаяся методика может быть рекомендована для определения ресурса ПЛЭН по результатам ускоренных испытаний.

4.7 Технико-экономическая эффективность ускоренных испытаний плёночных электронагревателей

Основным источником получения самой достоверной информации о ресурсе изделия являются данные, полученные в ходе эксплуатации исследуемого объекта. Это сопряжено с большой длительностью и соответствующими потерями времени и затратами материальных средств при отсутствии конкретных представлений о искомом ресурсе. Другим методом являются ускоренные испытания, при которых значительно сокращается время испытаний и, соответственно, высвобождаются человеческие и материальные ресурсы. При этом за короткие сроки можно с приемлемой точностью определить ресурс изделия и даже возможно быстрое внесение необходимых поправок в технологический процесс изготовления ПЛЭН.

Необходимо отметить, что отсутствие знаний о ресурсе нового оборудования лишает возможности грамотного проведения его обслуживания, оценки текущего состояния и необходимости проведения работ, а также безопасности его эксплуатации. В связи с этим возможны затраты, величину которых даже трудно предположить из-за вероятностного характера их проявлений.

При расчёте экономической эффективности рассмотренной в данной работе методики ускоренных испытаний плёночных электронагревателей за базовую модель принимается методика эксплуатационных испытаний. Порядок расчёта эко-

номической эффективности принят в соответствии с существующими методиками [32,33,34,91].

Экономический эффект капитальных вложений определяется на основе приведённых затрат. Годовой экономический эффект [33]

$$\mathcal{E}_z = [(Z_э + E_n K_э) - (Z_y + E_n K_y)] A_y, \quad (4.12)$$

где $Z_э, Z_y$ – затраты соответственно при эксплуатационных и ускоренных испытаниях в расчёте на один цикл работы, руб.;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_n=0,15$);

$K_э, K_y$ – капитальные вложения на осуществление соответственно эксплуатационных и ускоренных испытаний на один цикл работы, руб.;

A_y – годовое количество ускоренных испытаний.

Затраты на один цикл испытаний рассматриваемого вида электрооборудования определяются следующим образом [34]

$$Z = ЗП + A_o + Z_{ТО} + C_э + Z_{пр}, \quad (4.13)$$

где $ЗП$ – заработная плата обслуживающего персонала, руб.;

A_o – амортизационные отчисления, руб.;

$Z_{ТО}$ – затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание, руб.;

$C_э$ – стоимость израсходованной электроэнергии, руб.;

$Z_{пр}$ – прочие расходы (1 % капитальных затрат), руб.

Зарплата обслуживающего персонала с начислениями [Там же]

$$ЗП = N_o \cdot M_o \cdot \kappa_\partial \cdot \kappa_y \cdot \kappa_{нз} \cdot n_{раб}, \quad (4.14)$$

где N_o – численность обслуживающего персонала, чел.;

M_o – месячный оклад, руб.;

κ_∂ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату труда (для электромонтеров $\kappa_\partial = 1,4$);

κ_y – уральский коэффициент ($\kappa_y = 1,15$);

$\kappa_{нз}$ – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату ($\kappa_{нз} = 1,3$);

$n_{раб}$ – количество месяцев работы, мес.

Так как при эксплуатационных и ускоренных испытаниях заранее не известны ни величина изменения параметра состояния ПЛЭН, ни его ресурс, то необходимо постоянное присутствие наблюдателя-исследователя (научного сотрудника). Также требуется периодическое дополнительное привлечение техника-электрика (электромонтёра 4 разряда) на 0,25 ставки рабочего времени для проведения обслуживания и контроля параметра состояния изоляции плёночных электронагревателей – пробивного напряжения.

Месячный оклад работников рассчитывается в соответствии с действующим Положением об оплате труда, разработанным по существующим нормативным документам, с учётом повышающих коэффициентов к минимальным базовым окладам [112,113]

$$M_o = O_m \cdot ПКД \cdot ППК, \quad (4.15)$$

где O_m – минимальный базовый оклад профессионально-квалификационной группы, руб.;

ПКД – повышающий коэффициент по должности;

ППК – персональный повышающий коэффициент.

Месячный оклад научного сотрудника

$$M_{o_{нс}} = 6343 \cdot 1,25 \cdot 1,0 = 7928,75 \text{ руб.}$$

Месячный оклад электромонтёра 4 разряда

$$M_{o_{эм}} = 5493 \cdot 1,02 \cdot 1,0 = 5602,86 \text{ руб.}$$

Время проведения одного опыта при ускоренных испытаниях составляет 750 часов. Для проведения опытов в распоряжении имеются две климатические камеры. Периодичность включения определяет работу нагревателей в половину от общего времени. При наработке в каждом из 8 опытов с трёхкратной повторностью (согласно таблице 3.1 п. 3.5) по 750 часов в двух камерах общее время испытаний $8 \cdot 3 \cdot 750 \cdot 2/2 = 18$ тыс. ч. или 25 месяцев. Таким образом, длительность ускоренных испытаний составляет 2,1 лет.

Заработная плата обслуживающего персонала при ускоренных испытаниях

$$\begin{aligned} ЗП_y &= 1 \cdot 7928,75 \cdot 1,4 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot 25 + 1 \cdot 5602,86 \cdot 1,4 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot (25 \cdot 0,25) = \\ &= 488164 \text{ руб.} \end{aligned}$$

При аналогичной наработке и режиме работы во включенном состоянии четверть от общего времени (25 %) длительность эксплуатационных испытаний составляет $13 \cdot 750 \cdot 4 = 39$ тыс. ч. При условиях сезонной работы только в холодное время года длительность цикла 7 месяцев или 5,04 тыс. ч. Таким образом, длительность испытаний составляет 7,7 лет при 7 месяцах работы в год и 5 месяцах простоя. Общее количество времени работы персонала получается 54 месяца. Тогда заработная плата обслуживающего персонала при эксплуатационных испытаниях

$$\begin{aligned} ЗП_y &= 1 \cdot 7928,75 \cdot 1,4 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot 54 + 1 \cdot 5602,86 \cdot 1,4 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot (54 \cdot 0,25) = \\ &= 1054435 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Например, для подобных условий достижение ПЛЭН среднего ресурса 31,0 тыс. ч. потребовало бы $31,0 \cdot 4 = 124$ тыс. ч. При цикличности 5,04 тыс. ч. в год испытания составят 24,6 лет, что в 12 раз больше ускоренных испытаний.

Капитальные вложения на осуществление эксплуатационных и ускоренных испытаний рассчитываются по формуле [34]

$$K = C_o \cdot \kappa_{mm}, \quad (4.16)$$

где C_o – цена приобретения оборудования, руб.;

κ_{mm} – суммарный коэффициент, учитывающий затраты на монтаж и наладку, транспортно-складские расходы и наценки снабжающих организаций (накладные расходы).

$$\kappa_{mm} = 1 + \kappa_m + \kappa_n, \quad (4.17)$$

где κ_m и κ_n – коэффициенты, учитывающие соответственно затраты на монтаж и транспортно-складские расходы с наценками ($\kappa_m = 0,30$; $\kappa_n = 0,10$).

$$\kappa_{mm} = 1 + 0,3 + 0,1 = 1,4.$$

Стоимость оборудования для эксплуатационных и ускоренных испытаний определяется в текущих ценах по прайс-листам [136,137] исходя из необходимого перечня с занесением в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Стоимость оборудования для эксплуатационных и ускоренных испытаний ПЛЭН

| № п/п | Наименование, тип, марка | Единица измерения | Цена за единицу, руб. | Эксплуатационные испытания | | Ускоренные испытания | |
|-------|---|-------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | | | Количество | Стоимость, руб. | Количество | Стоимость, руб. |
| 1 | ПЛЭН 0,65x1,5 м, ~220 В, 50 Гц (ООО «ЭСБ-Технологии») | м ² | 1200 | 0 | 0 | 24 | 28800 |
| 2 | Выключатель автоматический ВА-47-29 ЗР 16 А («ИЭК») | шт. | 138 | 0 | 0 | 1 | 138 |
| 3 | Амперметр Э365 | шт. | 750 | 0 | 0 | 1 | 750 |
| 4 | Вольтметр Э365 | шт. | 750 | 0 | 0 | 1 | 750 |
| 5 | Регулятор напряжения однофазный РНО-250-5 | шт. | 17680 | 0 | 0 | 1 | 17680 |
| 6 | Универсальный газоанализатор УГ-2 с индикаторами | шт. | 7000 | 0 | 0 | 1 | 7000 |
| 7 | Гигрометр психрометрический ВИТ-2 | шт. | 200 | 0 | 0 | 1 | 200 |
| 8 | Климатическая камера | шт. | 7138 | 0 | 0 | 1 | 7138 |
| 9 | Камера влажности | шт. | 4592 | 0 | 0 | 1 | 4592 |
| 10 | Устройство для определения эл. прочности листовых материалов | шт. | 800 | 1 | 800 | 1 | 800 |
| 11 | Система электродов для определения эл. прочности полос | шт. | 5600 | 1 | 5600 | 1 | 5600 |
| 12 | Аппарат испытания диэлектриков АИД-70М | шт. | 160000 | 1 | 160000 | 1 | 160000 |
| 13 | Кабель для подключения к объектам испытаний установок СКВИЛ-70 без наконечников | м. | 1300 | 6 | 7800 | 6 | 7800 |
| 14 | Киловольтметр электростатический С196 | шт. | 37524 | 1 | 37524 | 1 | 37524 |
| 15 | Перчатки диэлектрические | пара | 320 | 1 | 320 | 1 | 320 |
| | Итого: | – | – | – | 212050 | – | 279092 |

Стоимость изделий, изготовленных самостоятельно, рассчитывается как сумма затрат на приобретение материалов и затрат труда на их изготовление и сборку. Капитальные вложения при эксплуатационных испытаниях на покупку ПЛЭН отсутствуют, так как испытываемые образцы приобретены предприятием и находятся на его балансе, выполняя работу согласно их назначению.

Капитальные вложения эксплуатационных испытаний плёночных электронагревателей

$$K_{\text{э}} = 212050 \cdot 1,4 = 296870 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения ускоренных испытаний ПЛЭН

$$K_{\text{у}} = 279092 \cdot 1,4 = 390729 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления

$$A_o = K \cdot \frac{a}{100}, \quad (4.18)$$

где a – годовая норма амортизационных отчислений, % ($a = 11,6$ % [34]).

Для рассматриваемого случая получим:

$$A_{o_{\text{э}}} = 296870 \cdot \frac{11,6}{100} = 34437 \text{ руб.};$$

$$A_{o_{\text{у}}} = 390729 \cdot \frac{11,6}{100} = 45325 \text{ руб.}$$

Расходы на ремонт и техническое обслуживание

$$Z_{\text{ТО}} = K \cdot \frac{ч}{100}, \quad (4.19)$$

где $ч$ – годовая норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание, % ($ч = 5,0$ % [Там же]).

Подставляем расчётные данные:

$$Z_{\text{ТО}_{\text{э}}} = 296870 \cdot \frac{5}{100} = 14844 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{ТО}_{\text{у}}} = 390729 \cdot \frac{5}{100} = 19536 \text{ руб.}$$

Стоимость электроэнергии рассчитывается только для ускоренных испытаний, так как при эксплуатационных электроснабжение оплачивается эксплуатирующей организацией. Расчёт производится по формуле

$$C_{\text{э}} = P \cdot t_p \cdot D_z \cdot T_{\text{э}}, \quad (4.20)$$

где P – мощность электрооборудования, кВт;

t_p – время фактической работы оборудования в сутки, ч;

D_z – число дней работы в году;

$T_{\text{э}}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч.

Для приравненных к населению категорий потребителей Челябинской области на 2014 год тарифы на электрическую энергию установлены в размере: 2,41 руб./кВт·ч (с учетом НДС) с 01.01.2014 г. по 30.06.2014 г. [115]. Стоимость электроэнергии для ускоренных испытаний рассчитывается для условия, что каждый из 24-х ПЛЭН мощностью 175 Вт наработал по 750 часов

$$C_{\text{э},y} = 0,175 \cdot 24 \cdot 750 \cdot 2,41 = 7592 \text{ руб.}$$

Прочие расходы определяются как 1 % от капитальных затрат

$$Z_{np} = 0,01 \cdot K. \quad (4.21)$$

При подстановке значений получается:

$$Z_{np, \text{э}} = 0,01 \cdot 296870 = 2969 \text{ руб.};$$

$$Z_{np, y} = 0,01 \cdot 390729 = 3907 \text{ руб.}$$

Затраты на один цикл соответственно эксплуатационных и ускоренных испытаний ПЛЭН:

$$Z_{\text{э}} = 1054435 + 34437 + 14844 + 0 + 2969 = 1106684 \text{ руб.};$$

$$Z_y = 488164 + 45325 + 19536 + 7592 + 3907 = 564524 \text{ руб.}$$

Удельные годовые затраты

$$Z_{\text{э}} = \frac{Z}{t_{\text{исн}}}, \quad (4.22)$$

где $t_{\text{исн}}$ – время одного цикла эксплуатационных и ускоренных испытаний, лет.

Для проведения одного цикла ускоренных испытаний требуется 25 месяцев, то на год приходится 0,48 цикла. Тогда можно рассчитать годовой экономический эффект

$$\mathcal{E}_z = [(1106684 + 0,15 \cdot 296870) - (564524 + 0,15 \cdot 390729)] \cdot 0,48 = 253479 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений ускоренных испытаний

$$T = \frac{K_{cm}}{\mathcal{E}_z}; \quad (4.23)$$

$$T = \frac{390729}{253479} = 1,54 \text{ лет, что ниже нормативного для сельскохозяйственного}$$

производства $T_n = 6,7$ лет.

Расчётные значения показателей экономической эффективности испытаний сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Показатели экономической эффективности эксплуатационных и ускоренных испытаний ПЛЭН

| № п/п | Показатели | Единица измерения | Эксплуатационные испытания | Ускоренные испытания |
|-------|--|-------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | Заработная плата | руб. | 1054435 | 488164 |
| 2 | Капитальные вложения | руб. | 296870 | 390729 |
| 3 | Амортизационные отчисления | руб. | 34437 | 45325 |
| 4 | Расходы на ремонт и техническое обслуживание | руб. | 14844 | 19536 |
| 5 | Стоимость электроэнергии | руб. | – | 7592 |
| 6 | Прочие расходы | руб. | 2969 | 3907 |
| 7 | Общие затраты | руб. | 1106684 | 564524 |
| 8 | Удельные годовые затраты | руб. | 55334 | 141131 |
| 9 | Годовой экономический эффект | руб. | – | 253479 |
| 10 | Срок окупаемости капитальных вложений | лет | – | 1,5 |

При проведении ускоренных испытаний ПЛЭН значительно сокращается время испытаний по сравнению с эксплуатационными (в 4–12 раз), что приводит к значительному сокращению затрат, несмотря на большие капитальные вложения. При этом появляется положительный годовой экономический эффект 253 тыс. руб. в текущих ценах при сроке окупаемости капитальных вложений 1,5 года. Таким образом, проведённые расчёты показывают на высокую экономическую эффективность предлагаемой методики ускоренных испытаний и, следовательно, целесообразность её применения на практике для определения ресурса плёночных электронагревателей.

4.8 Выводы по четвертой главе

1. Обработанные данные экспериментальных исследований подтвердили гипотезу о распределении питающего фазного напряжения по нормальному закону, для которого значения статистических характеристик составили: выборочная средняя $\bar{U} = 220,2$ В; выборочное среднее квадратическое отклонение $\sigma_U = 5,5$ В. На основании данных о законах распределения и их параметров для основных эксплуатационных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на ресурс плёночных электронагревателей в свиноводстве, составлены уровни их варьирования при проведении ускоренных испытаний.

2. На основании полученных в ходе исследований экспериментальных данных построена кривая нагрева плёночного электронагревателя. При процессах нагрева и охлаждения условия теплоотдачи ПЛЭН не изменяются, поэтому их постоянные времени равны. Для установления режима включения исследуемого ПЛЭН при проведении испытаний определены аналитическим методом наименьших квадратов и графическим, с помощью трёх касательных, постоянные их времени нагрева и охлаждения, значения которых составили $T_H = T_O = 14$ мин.

3. По результатам ускоренных испытаний получены значения показателя α , определяющего характер изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей в зависимости от наработки. Значения этого

показателя составили для основных элементов ПЛЭН: с токопроводящей лентой – 1,05; перегиба токопроводящей ленты – 1,08; контакта токопроводящей ленты с питающими проводами – 1,12. Абсолютная величина скорости изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН при постоянных условиях испытаний будет расти с увеличением наработки.

4. В результате статистической обработки экспериментальных данных ускоренных испытаний получены аналитические полиномиальные зависимости скорости старения элементов плёночных электронагревателей от действующих на них основных эксплуатационных факторов. Основное влияние на старение элементов ПЛЭН в свиноводстве оказывает относительная влажность воздуха, затем – концентрация аммиака в окружающей среде, и в последнюю очередь – взаимное влияние влажности и агрессивности среды. Фактор напряжения питания в рассматриваемых пределах не значим для изучаемых закономерностей.

5. На основании полученных аналитических полиномиальных зависимостей определены плотности распределения ресурса $g_i(t)$, вероятности безотказной работы отдельных элементов $P_i(t)$ и нагревателя в целом $P(t)$, а также произведён расчёт гамма-процентного ресурса T_γ ПЛЭН. Значения среднего ресурса с учётом периода стабилизации составили для отдельных элементов ПЛЭН: с токопроводящей лентой – 43,5 тыс. ч.; перегиба токопроводящей ленты – 37,6 тыс. ч.; контакта токопроводящей ленты с питающими проводами – 32,6 тыс. ч. Средний ресурс T ПЛЭН в целом с учётом периода стабилизации составил 31,0 тыс. ч.

6. Различия между средними значениями скоростей изменения пробивного напряжения изоляции, полученными по результатам ускоренных и эксплуатационных испытаний ПЛЭН, можно считать несущественными на основании проверки по t -критерию Стьюдента.

7. Технико-экономический анализ показал высокую экономическую эффективность применения ускоренных испытаний для определения ресурса плёночных электронагревателей по разработанной методике в сравнении с эксплуатационными и годовой экономический эффект составил 253 тыс. руб. в текущих ценах.

Основные выводы

На основании теоретических и экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Для оценки эффективности мероприятий, направленных на повышение качества изготовления и эксплуатации плёночных электронагревателей, необходима научно обоснованная методика ускоренного определения долговечности этих нагревателей.

2. Установлено, что разработанная вероятностная модель и алгоритм статистического моделирования ресурса элементов плёночных электронагревателей по изменению величины параметра состояния их изоляции – пробивного напряжения, а также обоснованная функция результирующей надёжности этих нагревателей позволяют производить оценку их долговечности.

3. Разработанная в результате исследований методика ускоренных испытаний плёночных электронагревателей позволяет по скорости изменения пробивного напряжения, полученной на основании результатов активного планирования эксперимента, и показателя α характера изменения параметра состояния с использованием статистического моделирования устанавливать распределение ресурса элементов и его результирующего значения для всего нагревателя.

4. Выявлено, что разработанное техническое средство для установления состояния изоляции плёночных электронагревателей, включающее устройство для определения пробивного напряжения листовых электроизоляционных материалов, обеспечивает проведение их испытания без фрагментирования.

5. В результате экспериментальных исследований установлена закономерность температуры нагрева плёночных электронагревателей от времени работы, определены постоянные нагрева T_H и охлаждения T_O ПЛЭН, значения которых равны 14 мин, служащие для установления режима включения при проведении испытаний.

6. В результате ускоренных испытаний выявлен характер изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей от

наработки. Значения показателя α для основных элементов ПЛЭН составили: с токопроводящей лентой – 1,05; перегиба токопроводящей ленты – 1,08; контакта токопроводящей ленты с питающими проводами – 1,12.

7. Доказано, что основное влияние на старение основных элементов ПЛЭН в свиноводстве оказывает относительная влажность воздуха (A_2), затем – концентрация аммиака в окружающей среде (A_3), и в последнюю очередь – взаимное влияние влажности и агрессивности среды (A_{23}). Так для контакта токопроводящей ленты с питающими проводами значения этих коэффициентов равны: $A_2 = -2,25 \cdot 10^{-2}$; $A_3 = -1,09 \cdot 10^{-2}$; $A_{23} = -0,38 \cdot 10^{-2}$. Фактор напряжения питания в исследуемом диапазоне не оказывает существенного влияния на рассматриваемый процесс.

8. Впервые, с помощью разработанной методики ускоренных испытаний, получены все возможные значения γ -процентного ресурса элементов плёночных электронагревателей. Значение ресурса T_{50} с учётом периода стабилизации для элемента ПЛЭН с токопроводящей лентой составило 43,5 тыс. ч., перегиба токопроводящей ленты – 37,6 тыс. ч., контакта токопроводящей ленты с питающими проводами – 32,6 тыс. ч. Результирующее значение ресурса T_{50} ПЛЭН в целом с учётом периода стабилизации равно 31,0 тыс. ч.

9. Проверка гипотезы о соответствии результатов ускоренных испытаний плёночных электронагревателей с данными их эксплуатационных наблюдений по t -критерию Стьюдента указывает на их достаточную сходимость. Такое соответствие подтверждает целесообразность применения разработанной методики для оценки ресурса ПЛЭН.

Список литературы

1. Агапова Е. Г., Битехтина Е. А. Обработка экспериментальных данных в MS Excel. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. 32 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
3. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. М.-Л: Госэнергоиздат, 1963. 772 с.
4. Банин Р. В. Прогнозирование трудоёмкости обслуживания и резерва запасных частей при эксплуатации электроприводов в птицеводстве: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 2002. 182 с.
5. Баранов Л. А., Епишков Н. Е. Использование электрообогрева в сельских жилых домах и коттеджах // Вестник ЧГАУ. 2005. Т. 44. С. 20-22.
6. Бардасов С. А. Оптимальное число интервалов гистограммы // «Актуальное состояние и тенденции развития физико-математических наук и информационных технологий»: материалы междунар. заочной науч.-практ. конф. Новосибирск, 2012. С. 54-62.
7. Басов А. М., Быков В. Г., Лаптев А. В., Файн В. Б. Электротехнология: Учебник для высш. сельскохозяйственных учеб. заведений. М.: Агропромиздат, 1985. 256 с.
8. Басов А. М., Шаповалов А. Т., Кожевников С. А. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1972. 344 с.
9. Белоглазов Н. С. [и др.]. Методические рекомендации МР151-85. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки безотказности и долговечности восстановленных деталей по результатам стендовых испытаний. М.: Госстандарт, ВНИИНМАШ, 1985. 56 с.
10. Блохин В. Г. [и др.]. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов. М.: Радио и связь, 1997. 232 с.

11. Большаков А. А. Исследование влияния среды животноводческих ферм на основные характеристики изоляции электрических двигателей: автореф. дис.. канд. техн. наук. Челябинск: ЧИМЭСХ, 1968. 25 с.
12. Большаков А. А. Причины выхода из строя электродвигателей в сельскохозяйственном производстве // Вопросы эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве: тр. ЧИМЭСХ. 1981. № 169. С. 26-32.
13. Борисов Ю. С., Некрасов А. А. Прогнозирование сопротивления и ресурса изоляции обмоток электродвигателей // Техника в сельском хозяйстве. 2010. № 3. С. 10-13.
14. Буторин В. А., Бекузаров А. Б. Исследование среды, окружающей электродвигатели, эксплуатирующиеся в животноводстве // Повышение надёжности работы электроустановок в сельском хозяйстве: науч. труды ЧИМЭСХ. 1982. С. 59–63.
15. Буторин В. А., Ложкин В. А. Факторы, определяющие ресурс подшипниковых узлов электродвигателей в животноводстве // Вопросы эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве: труды ЧИМЭСХ. 1981. № 169. С. 55–59.
16. Буторин В. А., Ткачев А. Н. Определение ресурса изоляции плёночных электронагревателей // Техника в сельском хозяйстве. 2014. № 1. С. 10.
17. Буторин В. А., Царев И. Б., Ткачев А. Н. Теоретическая оценка плотности распределения ресурса плёночных электронагревателей // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 01. С. 79–80.
18. Буторин В. А. Модель процесса изнашивания деталей при форсированном испытании // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1998. № 1. С. 28–29.
19. Буторин В. А. Обеспечение работоспособности электрооборудования сельскохозяйственных предприятий: дис. ... докт. техн. наук. Челябинск. 2002. 292 с.
20. Буторин В. А. Оценка послеремонтной долговечности деталей электрооборудования // Вестник ЧГАУ. 1999. Т. 28. С. 164–168.

21. Буторин В. А. Прогнозирование ресурса подшипниковых узлов электродвигателей по результатам стендовых испытаний: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 1980. 196 с.
22. Бююль А., Цёфель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. СПб.: ООО «ДиаСофтЮЛ», 2005. 608 с.
23. Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 150 с.
24. Васильев А. Н. Научные вычисления в Microsoft Excel. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 512 с.
25. Васин В. М. Электрический привод. М.: Высшая школа, 1984. 231 с.
26. Венецкий И. Г. Теория вероятностей и математическая статистика. 3-е изд. М.: Статистика, 1975. 264 с.
27. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
28. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. М.: АCADEMIA, 2003. 458 с.
29. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техніка, 1975. 168 с.
30. Вишневецкий С. Л., Тарг С. М. Моделирование // В кн.: Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. Т. 3. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. 672 с.
31. Вовденко К. П. Прогнозирование долговечности осветительных приборов со светодиодами для условий защищённого грунта: автореф. дис.. канд. техн. наук. Челябинск. 2013. 22 с.
32. Водяников В. Т. [и др.]. Практикум по экономике сельского хозяйства: Учебное пособие для вузов. М.: КолосС, 2008. 232 с.
33. Водяников В. Т. [и др.]. Экономика сельского хозяйства. М.: КолосС, 2008. 390 с.

34. Водяников В. Т. Экономическая оценка проектных решений в энергетике АПК: Учебное пособие. М.: КолосС, 2008. 263 с.
35. Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. Мн.: Современная школа, 2005. 608 с.
36. Воробьев В. Е., Кучер В. Я. Прогнозирование срока службы электрических машин. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
37. Воробьев Г. А. [и др.]. Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие. Томск: Издательство ТПУ, 2003. 244 с.
38. Воробьев Г. А., Еханин С. Г., Несмелов Н. С. Электрический пробой твёрдых диэлектриков // Физика твёрдого тела. 2005. Т. 47. № 6. С. 1048–1052.
39. Воробьев Н. П. [и др.]. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 261–269.
40. Воскресенский В. Ф. Испытания изоляции электрооборудования до 35 кВ повышенным напряжением. М.: Энергия, 1972. 80 с.
41. Газоанализатор универсальный УГ-2: паспорт 09К.095.00.000 ПС. 24 с.
42. Гайдук В. Н., Шмигель В. Н. Практикум по электротехнологии: Учебник для студентов высш. учеб. заведений. М.: Агропромиздат, 1989. 175 с.
43. Герасимов В. Г. [и др.]. Электротехнический справочник. В 4 томах. Том 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы. 9-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2003. 440 с.
44. Герасимович Л. С. Разработка научно-технических основ низкотемпературного поверхностно-распределенного электронагрева в сельском хозяйстве: дис. ... докт. техн. наук. Минск. 1981. 368 с.
45. Гиберт Д. П. Надёжность электрической изоляции. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 61 с.
46. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. 9-е изд. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
47. Гольдберг О. Д., Хелемская С. П. Надёжность электрических машин. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.

48. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. М. 1988. 30 с.

49. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М. 2006. 49 с.

50. ГОСТ 12.1.014-84 (2001). Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Метод измерения концентраций вредных веществ индикаторными трубками. М. 2001. 8 с.

51. ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. М. 2010. 23 с.

52. ГОСТ 24234-80. Плёнка полиэтилентерефталатная. Технические условия. М. 1980. 18 с.

53. ГОСТ 27905.1-88. Системы электрической изоляции электрооборудования. Оценка и классификация. М. 1988. 36 с.

54. ГОСТ 27905.2-88. Системы электрической изоляции. Оценка эксплуатационных характеристик, механизма старения и методы диагностики. М. 1988. 15 с.

55. ГОСТ 27905.3-88. Системы электрической изоляции. Методы многофакторных функциональных испытаний. М. 1988. 12 с.

56. ГОСТ 28839-90. Свиньи. Зоотехнические требования к содержанию на откорме. М. 1991. 4 с.

57. ГОСТ 6433.3-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении. М. 1994. 21 с.

58. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. М. 1993. 6 с.

59. ГОСТ ИЕС 60335-2-96-2012. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-96. Частные требования к гибким листовым нагревательным элементам для обогрева жилых помещений. М. 2013. 32 с.

60. ГОСТ МЭК 60335-1-2008. Бытовые и аналогичные электрические приборы. Безопасность. Часть 1. Общие требования. М. 2014. 113 с.
61. ГОСТ Р 27.002-2009. Надёжность в технике. Термины и определения. М. 2010. 32 с.
62. ГОСТ Р 51180-98. Материалы электроизоляционные. Требования безопасности и методы испытаний. М. 1998. 11 с.
63. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. М. 1999. 63 с.
64. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в Mathcad 12. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
65. Гухман А. А. Введение в теорию подобия: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
66. Девятков В. Д. Прогнозирование ресурса контактно-щеточных узлов капитально отремонтированных генераторов мобильных сельскохозяйственных машин: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 2003. 159 с.
67. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. М.: Мир, 1981. 520 с.
68. Дружинин Г. В. Надёжность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.
69. Евдокимов Ю. А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 227 с.
70. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики. 5-е изд. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с.
71. Епишков Е. Н. Электрифицированная система теплового комфорта поросят-сосунов в условиях неотапливаемого свинарника-маточника: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 2013. 22 с.
72. Епишков Н. Е. Лучистая система теплового комфорта для молодняка сельскохозяйственных животных в условиях неотапливаемых помещений (на

примере поросят) // Инновационный потенциал Челябинской области / Сельское хозяйство и пищевая промышленность. URL: <http://www.chelreg-innov.ru> (дата обращения: 28.10.2009).

73. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике (вводный курс). СПб.: С.-Петербургский гос. ун-т, 2009. 192 с.

74. Ермолин Н. П., Жерихин И. П. Надёжность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.

75. Изаков Ф. Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных. Челябинск: ЧГАУ, 2003. 104 с.

76. Ильин Ю. П. Диагностика и повышение эксплуатационной надёжности обмоток электродвигателей, используемых в животноводстве: автореф. дис.. канд. техн. наук. Челябинск. 1987. 19 с.

77. Кабатов С. В. Физиологическое состояние поросят в подсосный период в условиях лучистой системы теплового комфорта: автореферат дис. ... канд. биол. наук. Троицк. 2008. 23 с.

78. Кирсанов В. В. [и др.]. Механизация и технология животноводства. М.: ИНФРА-М, 2013. 585 с.

79. Кислякова Е. В. Механизмы пробоя твёрдых диэлектриков с неоднородной структурой // Молодой учёный. 2013. № 3. С. 1-4.

80. Коварский Е. М., Янко Ю. И. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

81. Колесов С. Н., Колесов И. С. Материаловедение и технология конструкционных материалов. М.: Высшая школа, 2004. 519 с.

82. Котеленец Н. Ф., Акимова Н. А., Антонов М. В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 384 с.

83. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А. Электрический нагрев и электротехнология. М.: Колос, 1975. 384 с.

84. Кузнецов Н. Л. Надёжность электрических машин: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.

85. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Об устойчивости и мощности критериев проверки однородности средних // Измерительная техника. 2008. № 9. С. 23–28.
86. Макаров Е. Г. Mathcad: Учебный курс. СПб.: Питер, 2009. 384 с.
87. Макаров Е. Г. Инженерные расчёты в Mathcad. Учебный курс. СПб.: Питер, 2005. 448 с.
88. Марьин С. С. Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: автореф. дис.. канд. техн. наук. Томск. 2007. 22 с.
89. Матвиенко Д. А., Новичкова Ю. В. Испытание изоляции электрооборудования импульсным напряжением // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003. № 4. С. 10–11.
90. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, Ленингр. отделение, 1980. 168 с.
91. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. М.: МСХиП РФ, ВНИЭСХ, 1998. 220 с.
92. Методы оценки долговечности изоляции электрических машин. Справочное пособие. Выпуск ВВС №5515. Люберцы: 13 ГНИИ МО РФ, 1986. 52 с.
93. Михлин В. М. Управление надёжностью сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1984. 334 с.
94. Мишуров Н. П., Кузьмина Т. Н. Энергосберегающее оборудование для обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях: Научный аналитический обзор. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. URL: <http://www.complexdoc.ru> (дата обращения: 10.03.2014).
95. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Изд. центр «Академия», 2007. 368 с.
96. Мурзин В. К. Локальный электрообогрев поросят-сосунов: дис. ... докт. техн. наук. Полтава. 1987. 401 с.
97. Мякинин Е. Г. [и др.]. Проверка гипотезы о нормальном распределении характеристик изоляции электрических машин // Вопросы эксплуатации и повышения надёжности электрооборудования: труды ЧИМЭСХ. 1976. № 111. С. 33-37.

98. Мякинин Е. Г., Рыжков С. А. Исследование увлажнения изоляции электрических машин в различных ее состояниях // Вопросы эксплуатации и повышения надежности электрооборудования: тр. ЧИМЭСХ. 1975. № 91. С. 10-18.
99. Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.
100. Немировский А. Е. Исследование и повышение влагостойкости изоляции электродвигателей в животноводческих помещениях: автореф. дис.. канд. техн. наук. Челябинск. 1977. 20 с.
101. Новикова С. Ю. Физика диэлектриков: электронное издание. М.: НИУ МЭИ, 2007. 81 с. URL: <http://ctl.mpei.ru/DocHandler.aspx?p=pubs/phd/title.html> (дата обращения: 08.04.2014).
102. Онлайн калькулятор: Формула Стерджесса и другие способы определения числа групп при построении гистограммы: [сайт]. URL: <http://planetcalc.ru/481> (дата обращения: 27.11.2012).
103. Острейковский В. А. Теория надёжности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
104. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD: Учебное пособие. 2-е изд. СПб.: Лань, 2008. 352 с.
105. Петрович М. Л., Давидович М. И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1989. 191 с.
106. Письменный Д. Т. Конспект лекций по теории вероятностей и математической статистике. М.: Айрис-пресс, 2004. 256 с.
107. Плёночный электронагреватель: пат. 2321188 Рос. Федерация. № 2006142921/09; заявл. 04.12.2006; опубл. 27.03.2008.
108. Плёночный электронагреватель: пат. 84660 Рос. Федерация. № 2009106508/22; заявл. 24.02.2009; опубл. 10.07.2009.
109. ПЛЭН Сервис. Новая рациональная система отопления ПЛЭН: [сайт]. URL: <http://www.plenservis.ru> (дата обращения: 06.10.2014).
110. ПЛЭН. Плёночный электронагреватель ТУ 3468-001-9928 1352-2008. Паспорт изделия.

111. Половко А. М., Ганичев И. В. Mathcad для студента. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 336 с.
112. Положение об оплате труда работников Челябинской государственной агроинженерной академии. Версия 3.0. Челябинск. 2012. 49 с. URL: <http://www.csaa.ru> (дата обращения: 25.11.2013).
113. Положение об оплате труда работников Челябинской государственной агроинженерной академии. Изменение №3. Версия 1.0. Челябинск. 2013. 3 с. URL: <http://www.csaa.ru> (дата обращения: 25.11.2013).
114. Постановление Госстандарта России № 36 «О Правилах проведения сертификации электрооборудования и электрической энергии» от 16 июля 1999 года. М. 1999.
115. Постановление Государственного комитета «Единый тарифный орган Челябинской области» от 19 декабря 2012 года № 54/1. «Об установлении тарифов на электрическую энергию, поставляемую ОАО «Челябэнергосбыт» населению и приравненным к нему категориям потребителей на территории Челябинской области». URL: <http://www.tarif74.ru> (дата обращения: 15.03.2014).
116. Проников А. С. Надёжность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
117. Проников А. С. Параметрическая надёжность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.
118. Пыхтин В. В. Исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на надёжность обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. Томск. 1979. 230 с.
119. Пястолов А. А., Большаков А. А., Петров Г. А. Факторы, влияющие на надёжность работы электродвигателей в сельском хозяйстве // Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве: тр. V Всесоюзной конф. по автоматизированному электроприводу. Т. 4: Электропривод в химической, бумажной и легкой промышленности и в сельском хозяйстве. 1971. С. 194-195.
120. Пястолов А. А., Хомутов О. И. Условия эксплуатации электродвигателей серии 4А на животноводческих комплексах // Вопросы эксплуатации и по-

вышения надёжности электрооборудования: труды ЧИМЭСХ. 1977. № 123. С. 7–9.

121. Растимешин С. А. Обоснование параметров локальных электрообогревателей для молодняка сельскохозяйственных животных: автореф. дис.. докт. техн. наук. Москва. 1996. 40 с.

122. РД 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. М.: Концерн Химнефтемаш, 1991. 96 с.

123. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 256 с.

124. РД 50-690-89. Методические указания. Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным. М. 1989. 136 с.

125. Рязанов В., Орлов А. Защита электрооборудования свинарников-откормочников от коррозии // Техника в сельском хозяйстве. 1975. № 8. С. 12–13.

126. Селиванов А. И., Артемьев Ю. Н. Теоретические основы ремонта и надёжности сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1978. 248 с.

127. Сизова Т. М. Статистика: Учебное пособие. СПб.: СПб ГУИТМО, 2005. 190 с.

128. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий. М.: Агропромиздат, 1987. 191 с.

129. Соболев И. Б. Метод Монте-Карло. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1978. 64 с.

130. Соляник А. В., Лещина С. Е. Продуктивность поросят-отъемышей в зависимости от температурно-влажностного режима помещений // Зоотехния. 2009. № 1. С. 26-27.

131. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. 28 с.

132. Спири́н Н. А., Лавро́в В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 257 с.
133. Справочник азотчика. 2-е изд. М.: Химия, 1987. 464 с.
134. Справочник врача ветеринарной медицины. Беларусь. 2006. 1496 с.
135. Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А. Техника высоких напряжений: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов. 2-е изд. Мн.: Вышэйшая школа, 1982. 367 с.
136. Товары и услуги Челябинска. Информационная система для Челябинска и области: [сайт]. URL: <http://www.price74.ru> (дата обращения: 11.03.2014).
137. Торговая площадка Пульс Цен в Челябинске: [сайт]. URL: <http://www.chel.pulscen.ru> (дата обращения: 11.03.2014).
138. Устройство для определения электрической прочности листовых материалов: пат. 103932 Рос. Федерация. № 2010147762/28; заявл. 23.11.2010; опубл. 27.04.2011.
139. Федеральный закон Российской Федерации № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 июля 2008 года. М. 2008.
140. Федеральный закон Российской Федерации № 347-ФЗ «Технический регламент о безопасности низковольтного оборудования» от 27 декабря 2009 г. (с изм. от 28.12.2010). М. 2009.
141. Хвостов В. С. Электрические машины: Машины постоянного тока: Учебник для студ. электромеханических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1988. 336 с.
142. Ходасевич Г. Б. Планирование эксперимента (электронное пособие). СПб.: СПбГУТ, 2007. URL: http://opds.sut.ru/electronic_manuals/pe/index.htm#z5 (дата обращения: 20.06.2011).
143. Царёв И. Б. Прогнозирование резерва запасных элементов специализированных предприятий районного уровня по ремонту электродвигателей в АПК: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 2009. 152 с.

144. Чекалин Н. А., Полухина Г. Н., Тугуши Г. Г. Охрана труда в электротехнической промышленности. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.
145. Швецов М. С. Оценка послеремонтной надёжности магнитных пускателей в животноводстве методом ускоренного определения коммутационного ресурса их контактов: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 2001. 169 с.
146. Шеметов А. Н. Надёжность электроснабжения. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. 141 с.
147. Шкеле А. Э. Повышение эффективности электрических систем обогрева порослят: дис. ... докт. техн. наук. Улброка. 1988. 411 с.
148. ЭСБ-Технологии: [сайт]. URL: <http://www.estechology.ru> (дата обращения: 17.10.2012).
149. Cochran W. G. The χ^2 test of goodness of fit // The Annals of Mathematical Statistics. 1952. Vol. 23. No. 3. pp. 315-345.
150. Field A. P. Discovering Statistics Using SPSS. 2nd ed. London: Sage Publications Ltd, 2005. 816 pp.
151. Hyndman R. J. The problem with Sturges' rule for constructing histograms. Clayton: Monash University, 5 July 1995. pp. 1-2.
152. Scott D. W. On optimal and data-based histograms // Biometrika. 1979. Vol. 66. pp. 605-610.

Приложение А

Расчёт количества испарившегося аммиака с открытой ёмкости, установленной в климатической камере

Масса паров жидкости m , испарившейся с поверхностей открытых емкостей

$$m = W \cdot F_u \cdot T, \quad (A1)$$

где W – интенсивность испарения, кг/(с·м²);

F_u – площадь испарения, м²;

T – продолжительность поступления газов и паров жидкостей в объем помещения, с.

Площадь испарения равна

$$F_u = \pi D^2 / 4,$$

где D – диаметр отверстия ёмкости с испаряющейся жидкостью, м.

$$F_u = \pi \cdot 0,012^2 / 4 = 0,000113 \text{ м}^2.$$

Для не нагретых выше расчётной температуры (окружающей среды) жидкостей интенсивность испарения W определяется по формуле

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \sqrt{M} \cdot P_n, \quad (A2)$$

где η – коэффициент, принимаемый по таблице А.2¹ в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения, $\eta=1$;

P_n – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости t_p , определяемое по справочным данным, кПа;

M – молярная масса, кг/кмоль.

Давление насыщенного пара при температуре 20 °С $P_n = 11,706$ кПа для 10 %-ного раствора аммиака².

Молярная масса аммиака

$$M (NH_3) = 14,00674 + 1,00794 \cdot 3 = 17,03056 \approx 17,03 \text{ г/моль} = 17,03 \text{ кг/кмоль}.$$

¹ СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. 28 с.

² Справочник азотчика. 2-е изд. М.: Химия, 1987. 464 с.

Тогда интенсивность испарения

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{17,03 \text{ кг/кмоль} \cdot 11,706 \text{ кПа}} = 0,00004831 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2\text{)}.$$

Масса 10 %-ного раствора аммиака (1 флакон 40 мл.)

$$m(\text{NH}_3) = \rho \cdot V,$$

где $\rho = 0,9575 \text{ г/см}^3$ – плотность 10 %-ного раствора аммиака (при $20 \text{ }^\circ\text{C}$)³;

V – объём раствора, см^3 .

$$m(\text{NH}_3) = 0,9575 \text{ г/см}^3 \cdot 4 \text{ см}^3 = 3,83 \text{ г}.$$

Время, за которое испарится аммиак из одного флакона

$$T = m / (WF_u).$$

$$T = 0,00383 \text{ кг} / (0,00004831 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2) \cdot 0,000113 \text{ м}^2) = 701342 \text{ с} = 8,12 \text{ суток}.$$

За 7 суток испарится аммиака из одного флакона

$$m = WF_u T.$$

$$m = 0,00004831 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2) \cdot 0,000113 \text{ м}^2 \cdot 604800 \text{ с} = 3,30 \text{ г}.$$

³ Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. Мн.: Современная школа, 2005. 608 с.

Приложение Б

Определение статистических параметров распределения фазного напряжения в сельском хозяйстве

Таблица Б.1 – Данные измерений фазного питающего напряжения

| Время | Показания вольтметра, В | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C |
| 8:00 | 225 | 225 | 226 | 225 | 224 | 225 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 222 | 221 | 223 |
| 9:00 | 220 | 220 | 221 | 221 | 220 | 221 | 202 | 198 | 186 | 220 | 221 | 221 | 220 | 221 | 221 |
| 10:00 | 213 | 215 | 215 | 203 | 198 | 193 | 202 | 199 | 188 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 11:00 | 210 | 210 | 213 | 206 | 203 | 203 | 202 | 198 | 193 | 220 | 219 | 218 | 222 | 221 | 221 |
| 12:00 | 225 | 225 | 226 | 219 | 219 | 220 | 220 | 221 | 221 | 221 | 222 | 222 | 220 | 221 | 220 |
| 13:00 | 220 | 220 | 221 | 218 | 218 | 219 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 222 | 229 | 229 |
| 14:00 | 214 | 217 | 217 | 218 | 218 | 218 | 215 | 215 | 217 | 218 | 218 | 219 | 221 | 222 | 221 |
| 15:00 | 218 | 218 | 215 | 220 | 220 | 221 | 220 | 219 | 219 | 218 | 218 | 219 | 221 | 222 | 221 |
| 16:00 | 218 | 217 | 217 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 219 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 |
| 17:00 | 219 | 222 | 221 | 223 | 222 | 223 | 220 | 220 | 220 | 221 | 222 | 222 | 220 | 220 | 220 |
| 8:00 | 219 | 221 | 225 | 217 | 217 | 219 | 211 | 209 | 211 | 217 | 217 | 219 | 215 | 219 | 223 |
| 9:00 | 216 | 219 | 222 | 218 | 218 | 219 | 211 | 210 | 211 | 218 | 218 | 219 | 216 | 219 | 223 |
| 10:00 | 216 | 218 | 221 | 216 | 217 | 219 | 214 | 210 | 213 | 216 | 217 | 219 | 214 | 217 | 219 |
| 11:00 | 217 | 218 | 219 | 218 | 218 | 219 | 211 | 209 | 209 | 218 | 218 | 219 | 218 | 218 | 220 |
| 12:00 | 216 | 219 | 219 | 218 | 217 | 221 | 214 | 213 | 213 | 218 | 217 | 221 | 219 | 217 | 221 |
| 13:00 | 216 | 216 | 222 | 216 | 216 | 219 | 211 | 210 | 211 | 216 | 216 | 219 | 216 | 218 | 222 |
| 14:00 | 215 | 213 | 219 | 218 | 218 | 219 | 212 | 210 | 212 | 212 | 210 | 213 | 215 | 217 | 219 |
| 15:00 | 216 | 218 | 221 | 217 | 217 | 219 | 213 | 211 | 214 | 213 | 211 | 214 | 216 | 217 | 221 |
| 16:00 | 217 | 221 | 224 | 218 | 217 | 219 | 212 | 210 | 211 | 212 | 210 | 212 | 216 | 219 | 222 |
| 17:00 | 221 | 223 | 225 | 219 | 219 | 220 | 217 | 217 | 219 | 212 | 210 | 211 | 221 | 223 | 223 |

Окончание таблицы Б.1

| Время | Показания вольтметра, В | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C |
| 8:00 | 223 | 225 | 228 | 225 | 226 | 227 | 225 | 224 | 225 | 221 | 220 | 220 | 226 | 225 | 225 |
| 9:00 | 211 | 209 | 211 | 221 | 221 | 223 | 221 | 220 | 221 | 221 | 220 | 220 | 221 | 221 | 220 |
| 10:00 | 212 | 211 | 212 | 221 | 221 | 220 | 219 | 217 | 215 | 220 | 220 | 220 | 220 | 222 | 219 |
| 11:00 | 210 | 209 | 211 | 223 | 222 | 223 | 220 | 221 | 221 | 218 | 219 | 220 | 221 | 220 | 221 |
| 12:00 | 213 | 212 | 213 | 221 | 220 | 220 | 224 | 223 | 223 | 221 | 221 | 221 | 220 | 220 | 220 |
| 13:00 | 212 | 212 | 213 | 220 | 220 | 221 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 224 | 225 | 222 |
| 14:00 | 211 | 210 | 213 | 220 | 222 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 |
| 15:00 | 212 | 210 | 211 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 | 221 | 221 | 221 | 220 | 221 | 221 | 221 |
| 16:00 | 212 | 211 | 211 | 221 | 221 | 223 | 220 | 220 | 220 | 222 | 223 | 221 | 220 | 220 | 221 |
| 17:00 | 216 | 217 | 219 | 225 | 225 | 226 | 221 | 222 | 222 | 230 | 230 | 230 | 224 | 226 | 223 |
| 8:00 | 229 | 231 | 228 | 228 | 229 | 228 | 228 | 229 | 229 | 228 | 229 | 229 | 226 | 226 | 227 |
| 9:00 | 222 | 221 | 222 | 222 | 223 | 222 | 223 | 221 | 221 | 221 | 222 | 221 | 223 | 221 | 221 |
| 10:00 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 | 221 | 221 | 222 | 220 | 220 | 220 | 221 | 221 | 222 |
| 11:00 | 220 | 221 | 220 | 221 | 220 | 220 | 220 | 219 | 220 | 220 | 221 | 221 | 223 | 222 | 223 |
| 12:00 | 221 | 221 | 221 | 224 | 223 | 224 | 224 | 225 | 224 | 225 | 226 | 224 | 225 | 226 | 226 |
| 13:00 | 228 | 228 | 227 | 220 | 220 | 220 | 228 | 226 | 228 | 228 | 228 | 229 | 223 | 223 | 221 |
| 14:00 | 223 | 223 | 221 | 220 | 220 | 220 | 223 | 223 | 223 | 220 | 220 | 221 | 221 | 222 | 221 |
| 15:00 | 220 | 221 | 221 | 220 | 221 | 220 | 221 | 221 | 220 | 220 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 16:00 | 223 | 222 | 224 | 220 | 220 | 220 | 223 | 221 | 223 | 222 | 224 | 222 | 221 | 221 | 221 |
| 17:00 | 228 | 227 | 227 | 225 | 227 | 225 | 230 | 229 | 230 | 230 | 230 | 230 | 225 | 225 | 226 |
| 8:00 | 231 | 230 | 231 | 223 | 224 | 223 | 222 | 221 | 222 | 233 | 237 | 235 | 230 | 230 | 230 |
| 9:00 | 225 | 226 | 226 | 220 | 221 | 220 | 222 | 224 | 222 | 222 | 229 | 229 | 221 | 221 | 222 |
| 10:00 | 223 | 221 | 221 | 220 | 220 | 221 | 220 | 220 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| 11:00 | 222 | 220 | 221 | 230 | 230 | 230 | 220 | 220 | 220 | 221 | 222 | 221 | 219 | 220 | 218 |
| 12:00 | 224 | 223 | 224 | 222 | 221 | 222 | 230 | 230 | 230 | 230 | 229 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| 13:00 | 230 | 229 | 229 | 220 | 220 | 220 | 222 | 224 | 222 | 225 | 225 | 227 | 220 | 221 | 220 |
| 14:00 | 221 | 222 | 222 | 220 | 220 | 220 | 221 | 221 | 222 | 222 | 221 | 222 | 219 | 220 | 218 |
| 15:00 | 220 | 220 | 221 | 221 | 220 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 | 221 | 219 | 220 | 218 |
| 16:00 | 221 | 221 | 221 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 221 | 223 | 223 | 220 | 220 | 219 |
| 17:00 | 228 | 225 | 227 | 223 | 222 | 223 | 231 | 232 | 232 | 231 | 232 | 232 | 231 | 231 | 233 |

Таблица Б.2 – Проверка статистической гипотезы о принадлежности опытного распределения фазного напряжения к нормальному закону

| № интервала i | Интервал U , В | | Среднее значение, x_i | Частота, n_i | $x_i n_i$ | Частость, ω_i | $\omega_i x_i^2$ | Плотность частоты, f | \tilde{n}_i | $n_i - \tilde{n}_i$ | $\frac{(n_i - \tilde{n}_i)^2}{\tilde{n}_i}$ |
|--------------------|------------------|-------|----------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|------------------|------------------------|---------------|---------------------|---|
| 1 | 186,0 | 191,6 | 188,8 | 2 | 377,6 | 0,003 | 95,1 | 0,0005 | 0,00006 | 0 | } 0,21 |
| 2 | 191,6 | 197,2 | 194,4 | 2 | 388,8 | 0,003 | 100,8 | 0,0005 | 0,01 | 0 | |
| 3 | 197,2 | 202,8 | 200,0 | 7 | 1400,2 | 0,009 | 373,4 | 0,0017 | 0,61 | 0 | |
| 4 | 202,8 | 208,4 | 205,6 | 4 | 822,5 | 0,005 | 225,5 | 0,0010 | 12,72 | 1,66 | |
| 5 | 208,4 | 214,1 | 211,2 | 70 | 14787,2 | 0,093 | 4164,9 | 0,0166 | 95,40 | -25,40 | 6,76 |
| 6 | 214,1 | 220,2 | 217,1 | 308 | 66869,9 | 0,411 | 19357,5 | 0,0671 | 290,27 | 17,73 | 1,08 |
| 7 | 220,2 | 225,8 | 223,0 | 266 | 59311,4 | 0,355 | 17633,3 | 0,0632 | 253,11 | 12,89 | 0,66 |
| 8 | 225,8 | 231,4 | 228,6 | 83 | 18972,6 | 0,111 | 5782,5 | 0,0197 | 86,56 | -3,56 | 0,15 |
| 9 | 231,4 | 237,0 | 234,2 | 8 | 1873,6 | 0,011 | 585,0 | 0,0019 | 11,32 | -3,32 | 0,97 |
| Σ | – | – | – | 750 | 164803,7 | 1 | 48318,0 | – | 750 | $\chi^2_{наб} =$ | 9,83 |

Критерий Б. С. Ястремского:

$$l = \frac{9,83 - 9}{\sqrt{2 \cdot 9 + 4 \cdot 0,6}} = |0,18| < 3.$$

Таблица Б.3 – Расчёт теоретических частот нормального распределения для статистического ряда фазного напряжения

| № интервала i | Границы интервала U , В | | Частота, n_i | $x_i - \bar{x}^*$ | $x_{i+1} - \bar{x}^*$ | Границы интервала | | $\Phi(z_i)$ | $\Phi(z_{i+1})$ | p_i | \tilde{n}_i |
|-----------------|---------------------------|-----------|----------------|-------------------|-----------------------|--|--|-------------|-----------------|------------|---------------|
| | x_i | x_{i+1} | | | | $z_i = \frac{x_i - \bar{x}^*}{\sigma^*}$ | $z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}^*}{\sigma^*}$ | | | | |
| 1 | 186,0 | 191,6 | 2 | – | -28,1 | $-\infty$ | -5,1 | -0,50000000 | -0,49999981 | 0,00000008 | 0,00006 |
| 2 | 191,6 | 197,2 | 2 | -28,1 | -22,5 | -5,1 | -4,1 | -0,49999 | -0,49998 | 0,00001 | 0,01 |
| 3 | 197,2 | 202,8 | 7 | -22,5 | -16,9 | -4,1 | -3,1 | -0,49998 | -0,4989 | 0,0008 | 0,61 |
| 4 | 202,8 | 208,4 | 4 | -16,9 | -11,3 | -3,1 | -2,0 | -0,4989 | -0,4793 | 0,0170 | 12,72 |
| 5 | 208,4 | 214,1 | 70 | -11,3 | -5,7 | -2,0 | -1,0 | -0,4793 | -0,3477 | 0,1272 | 95,40 |
| 6 | 214,1 | 220,2 | 308 | -5,7 | 0,4 | -1,0 | 0,1 | -0,3477 | 0,0311 | 0,3870 | 290,27 |
| 7 | 220,2 | 225,8 | 266 | 0,4 | 6,0 | 0,1 | 1,1 | 0,0311 | 0,3623 | 0,3375 | 253,11 |
| 8 | 225,8 | 231,4 | 83 | 6,0 | 11,7 | 1,1 | 2,1 | 0,3623 | 0,4823 | 0,1154 | 86,56 |
| 9 | 231,4 | 237,0 | 8 | 11,7 | – | 2,1 | $+\infty$ | 0,4823 | 0,5000 | 0,0151 | 11,32 |
| Σ | – | – | 750 | | | | | | | 1 | 750 |

Приложение В

Определение постоянных нагрева и охлаждения плёночных электронагревателей

Таблица В.1 – Зависимость температуры нагрева τ ПЛЭН от времени работы

| t , мин.:с. | τ , °С | t , мин.:с. | τ , °С | t , мин.:с. | τ , °С | t , мин.:с. | τ , °С |
|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| 00:00 | 22,31 | 09:00 | 29,43 | 18:00 | 30,27 | 27:00 | 30,62 |
| 00:20 | 22,51 | 09:20 | 29,49 | 18:21 | 30,25 | 27:20 | 30,57 |
| 00:40 | 22,94 | 09:40 | 29,56 | 18:40 | 30,25 | 27:39 | 30,61 |
| 01:01 | 23,43 | 10:05 | 29,59 | 18:59 | 30,25 | 28:00 | 30,63 |
| 01:21 | 23,99 | 10:21 | 29,63 | 19:21 | 30,25 | 28:21 | 30,64 |
| 01:40 | 24,51 | 10:40 | 29,69 | 19:40 | 30,25 | 28:40 | 30,68 |
| 02:00 | 24,95 | 11:01 | 29,69 | 20:01 | 30,30 | 29:00 | 30,66 |
| 02:21 | 25,45 | 11:20 | 29,75 | 20:22 | 30,34 | 29:21 | 30,67 |
| 02:41 | 25,90 | 11:41 | 29,75 | 20:41 | 30,40 | 29:40 | 30,70 |
| 03:00 | 26,28 | 12:00 | 29,81 | 21:00 | 30,42 | 30:00 | 30,70 |
| 03:20 | 26,63 | 12:21 | 29,86 | 21:20 | 30,44 | 30:21 | 30,69 |
| 03:40 | 26,91 | 12:40 | 29,88 | 21:41 | 30,44 | 30:40 | 30,70 |
| 04:01 | 27,22 | 13:01 | 29,94 | 22:00 | 30,44 | 31:01 | 30,69 |
| 04:19 | 27,49 | 13:20 | 29,97 | 22:21 | 30,44 | 31:20 | 30,70 |
| 04:40 | 27,70 | 13:41 | 29,99 | 22:41 | 30,44 | 31:41 | 30,69 |
| 05:00 | 27,89 | 14:00 | 30,06 | 23:00 | 30,44 | 32:00 | 30,69 |
| 05:21 | 28,08 | 14:20 | 30,07 | 23:21 | 30,45 | 32:21 | 30,69 |
| 05:41 | 28,23 | 14:41 | 30,07 | 23:40 | 30,49 | 32:40 | 30,69 |
| 06:00 | 28,42 | 15:00 | 30,07 | 24:00 | 30,50 | 33:01 | 30,70 |
| 06:20 | 28,61 | 15:20 | 30,10 | 24:21 | 30,50 | 33:20 | 30,71 |
| 06:41 | 28,77 | 15:41 | 30,09 | 24:41 | 30,50 | 33:40 | 30,70 |
| 07:01 | 28,91 | 16:01 | 30,07 | 25:00 | 30,52 | 34:01 | 30,69 |
| 07:20 | 29,02 | 16:20 | 30,13 | 25:20 | 30,54 | 34:20 | 30,69 |
| 07:40 | 29,10 | 16:40 | 30,13 | 25:41 | 30,54 | 34:40 | 30,74 |
| 08:00 | 29,21 | 17:00 | 30,13 | 26:01 | 30,60 | 35:00 | 30,75 |
| 08:21 | 29,25 | 17:21 | 30,21 | 26:20 | 30,63 | | |
| 08:41 | 29,32 | 17:41 | 30,23 | 26:40 | 30,62 | | |

Таблица В.2 – Определение коэффициента $b_1 = 1/T_H$ уравнения нагрева плёночных электронагревателей методом наименьших квадратов

| № опыта | $x_i = t_i, \text{ с}$ | $\tau_i, \text{ }^\circ\text{C}$ | $y_i = \ln \frac{\tau_{\text{ycm}} - \tau_0}{\tau_{\text{ycm}} - \tau_i}$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|---------|------------------------|----------------------------------|---|---------|-----------|
| 1 | 0 | 22,31 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 20 | 22,51 | 0,02 | 400 | 0 |
| 3 | 40 | 22,94 | 0,07 | 1600 | 3 |
| 4 | 61 | 23,43 | 0,13 | 3721 | 8 |
| 5 | 81 | 23,99 | 0,21 | 6561 | 17 |
| 6 | 100 | 24,51 | 0,28 | 10000 | 28 |
| 7 | 120 | 24,95 | 0,35 | 14400 | 42 |
| 8 | 141 | 25,45 | 0,43 | 19881 | 61 |
| 9 | 161 | 25,90 | 0,51 | 25921 | 82 |
| 10 | 180 | 26,28 | 0,59 | 32400 | 106 |
| 11 | 200 | 26,63 | 0,66 | 40000 | 132 |
| 12 | 220 | 26,91 | 0,72 | 48400 | 159 |
| 13 | 241 | 27,22 | 0,79 | 58081 | 192 |
| 14 | 259 | 27,49 | 0,86 | 67081 | 224 |
| 15 | 280 | 27,70 | 0,92 | 78400 | 258 |
| 16 | 300 | 27,89 | 0,98 | 90000 | 293 |
| 17 | 321 | 28,08 | 1,03 | 103041 | 332 |
| 18 | 341 | 28,23 | 1,08 | 116281 | 370 |
| 19 | 360 | 28,42 | 1,15 | 129600 | 413 |
| 20 | 380 | 28,61 | 1,22 | 144400 | 462 |
| 21 | 401 | 28,77 | 1,28 | 160801 | 512 |
| 22 | 421 | 28,91 | 1,34 | 177241 | 564 |
| 23 | 440 | 29,02 | 1,39 | 193600 | 610 |
| 24 | 460 | 29,10 | 1,42 | 211600 | 654 |
| 25 | 480 | 29,21 | 1,47 | 230400 | 708 |
| 26 | 501 | 29,25 | 1,49 | 251001 | 748 |
| 27 | 521 | 29,32 | 1,53 | 271441 | 797 |
| 28 | 540 | 29,43 | 1,59 | 291600 | 857 |
| 29 | 560 | 29,49 | 1,62 | 313600 | 908 |
| 30 | 580 | 29,56 | 1,66 | 336400 | 964 |
| 31 | 605 | 29,59 | 1,68 | 366025 | 1014 |
| 32 | 621 | 29,63 | 1,70 | 385641 | 1056 |
| 33 | 640 | 29,69 | 1,74 | 409600 | 1113 |
| 34 | 661 | 29,69 | 1,74 | 436921 | 1149 |
| 35 | 680 | 29,75 | 1,78 | 462400 | 1210 |
| 36 | 701 | 29,75 | 1,78 | 491401 | 1247 |
| 37 | 720 | 29,81 | 1,82 | 518400 | 1312 |

Продолжение таблицы В.2

| № опыта | $x_i = t_i, \text{ с}$ | $\tau_i, \text{ }^\circ\text{C}$ | $y_i = \ln \frac{\tau_{\text{ycm}} - \tau_0}{\tau_{\text{ycm}} - \tau_i}$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|---------|------------------------|----------------------------------|---|---------|-----------|
| 38 | 741 | 29,86 | 1,85 | 549081 | 1374 |
| 39 | 760 | 29,88 | 1,87 | 577600 | 1418 |
| 40 | 781 | 29,94 | 1,91 | 609961 | 1493 |
| 41 | 800 | 29,97 | 1,94 | 640000 | 1549 |
| 42 | 821 | 29,99 | 1,95 | 674041 | 1604 |
| 43 | 840 | 30,06 | 2,01 | 705600 | 1689 |
| 44 | 860 | 30,07 | 2,02 | 739600 | 1735 |
| 45 | 881 | 30,07 | 2,02 | 776161 | 1778 |
| 46 | 900 | 30,07 | 2,02 | 810000 | 1816 |
| 47 | 920 | 30,10 | 2,04 | 846400 | 1881 |
| 48 | 941 | 30,09 | 2,04 | 885481 | 1917 |
| 49 | 961 | 30,07 | 2,02 | 923521 | 1939 |
| 50 | 980 | 30,13 | 2,07 | 960400 | 2030 |
| 51 | 1000 | 30,13 | 2,06 | 1000000 | 2065 |
| 52 | 1020 | 30,13 | 2,07 | 1040400 | 2113 |
| 53 | 1041 | 30,21 | 2,14 | 1083681 | 2231 |
| 54 | 1061 | 30,23 | 2,16 | 1125721 | 2290 |
| 55 | 1080 | 30,27 | 2,20 | 1166400 | 2373 |
| 56 | 1101 | 30,25 | 2,18 | 1212201 | 2402 |
| 57 | 1120 | 30,25 | 2,18 | 1254400 | 2443 |
| 58 | 1139 | 30,25 | 2,18 | 1297321 | 2485 |
| 59 | 1161 | 30,25 | 2,18 | 1347921 | 2533 |
| 60 | 1180 | 30,25 | 2,18 | 1392400 | 2574 |
| 61 | 1201 | 30,30 | 2,23 | 1442401 | 2677 |
| 62 | 1222 | 30,34 | 2,28 | 1493284 | 2785 |
| 63 | 1241 | 30,40 | 2,34 | 1540081 | 2904 |
| 64 | 1260 | 30,42 | 2,37 | 1587600 | 2984 |
| 65 | 1280 | 30,44 | 2,39 | 1638400 | 3055 |
| 66 | 1301 | 30,44 | 2,39 | 1692601 | 3105 |
| 67 | 1320 | 30,44 | 2,39 | 1742400 | 3151 |
| 68 | 1341 | 30,44 | 2,39 | 1798281 | 3201 |
| 69 | 1361 | 30,44 | 2,39 | 1852321 | 3248 |
| 70 | 1380 | 30,44 | 2,39 | 1904400 | 3294 |
| 71 | 1401 | 30,45 | 2,41 | 1962801 | 3371 |
| 72 | 1420 | 30,49 | 2,46 | 2016400 | 3487 |
| 73 | 1440 | 30,50 | 2,47 | 2073600 | 3551 |
| 74 | 1461 | 30,50 | 2,47 | 2134521 | 3603 |
| 75 | 1481 | 30,50 | 2,47 | 2193361 | 3652 |

Окончание таблицы В.2

| № опыта | $x_i = t_i, \text{ с}$ | $\tau_i, \text{ }^\circ\text{C}$ | $y_i = \ln \frac{\tau_{\text{ycm}} - \tau_0}{\tau_{\text{ycm}} - \tau_i}$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|----------|------------------------|----------------------------------|---|-----------|-----------|
| 76 | 1500 | 30,52 | 2,50 | 2250000 | 3746 |
| 77 | 1520 | 30,54 | 2,52 | 2310400 | 3828 |
| 78 | 1541 | 30,54 | 2,52 | 2374681 | 3881 |
| 79 | 1561 | 30,60 | 2,61 | 2436721 | 4073 |
| 80 | 1580 | 30,63 | 2,65 | 2496400 | 4180 |
| 81 | 1600 | 30,62 | 2,63 | 2560000 | 4213 |
| 82 | 1620 | 30,62 | 2,63 | 2624400 | 4266 |
| 83 | 1640 | 30,57 | 2,56 | 2689600 | 4203 |
| 84 | 1659 | 30,61 | 2,62 | 2752281 | 4349 |
| 85 | 1680 | 30,63 | 2,65 | 2822400 | 4444 |
| 86 | 1701 | 30,64 | 2,67 | 2893401 | 4542 |
| 87 | 1720 | 30,68 | 2,74 | 2958400 | 4705 |
| 88 | 1740 | 30,66 | 2,70 | 3027600 | 4691 |
| 89 | 1761 | 30,67 | 2,72 | 3101121 | 4794 |
| 90 | 1780 | 30,70 | 2,78 | 3168400 | 4943 |
| 91 | 1800 | 30,70 | 2,76 | 3240000 | 4973 |
| 92 | 1821 | 30,69 | 2,75 | 3316041 | 5006 |
| 93 | 1840 | 30,70 | 2,76 | 3385600 | 5084 |
| 94 | 1861 | 30,69 | 2,75 | 3463321 | 5116 |
| 95 | 1880 | 30,70 | 2,76 | 3534400 | 5194 |
| 96 | 1901 | 30,69 | 2,75 | 3613801 | 5226 |
| 97 | 1920 | 30,69 | 2,75 | 3686400 | 5278 |
| 98 | 1941 | 30,69 | 2,75 | 3767481 | 5336 |
| 99 | 1960 | 30,69 | 2,75 | 3841600 | 5388 |
| 100 | 1981 | 30,70 | 2,78 | 3924361 | 5501 |
| 101 | 2000 | 30,71 | 2,79 | 4000000 | 5582 |
| 102 | 2020 | 30,70 | 2,78 | 4080400 | 5609 |
| 103 | 2041 | 30,69 | 2,75 | 4165681 | 5611 |
| 104 | 2060 | 30,69 | 2,75 | 4243600 | 5663 |
| 105 | 2080 | 30,74 | 2,85 | 4326400 | 5927 |
| 106 | 2100 | 30,75 | 2,86 | 4410000 | 6016 |
| Σ | 111346 | – | 205,97 | 156653874 | 263771 |

$$b_1 = 1,195 \cdot 10^{-3}.$$

Приложение Г

Определение показателей изменения пробивного напряжения элементов изоляции плёночных электронагревателей методом наименьших квадратов

Таблица Г.1 – Определение показателя характера изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН с токопроводящей лентой

| № опыта | t_i , ч | $x_i = \lg(t_i)$ | $U_0 - U_i$, В | $y_i = \lg(U_0 - U_i)$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|----------|-----------|------------------|-----------------|------------------------|---------|-----------|
| 1 | 2500 | 3,398 | 90 | 1,95 | 11,55 | 6,64 |
| 2 | 5000 | 3,699 | 180 | 2,26 | 13,68 | 8,34 |
| 3 | 7500 | 3,875 | 280 | 2,45 | 15,02 | 9,48 |
| 4 | 10000 | 4,000 | 380 | 2,58 | 16,00 | 10,32 |
| 5 | 12500 | 4,097 | 490 | 2,69 | 16,78 | 11,02 |
| Σ | – | 19,069 | – | 11,93 | 73,03 | 45,81 |

$$\alpha_1 = 1,05.$$

Таблица Г.2 – Определение показателя характера изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН перегиба токопроводящей ленты

| № опыта | t_i , ч | $x_i = \lg(t_i)$ | $U_0 - U_i$, В | $y_i = \lg(U_0 - U_i)$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|----------|-----------|------------------|-----------------|------------------------|---------|-----------|
| 1 | 2500 | 3,398 | 110 | 2,04 | 11,55 | 6,94 |
| 2 | 5000 | 3,699 | 230 | 2,36 | 13,68 | 8,74 |
| 3 | 7500 | 3,875 | 350 | 2,54 | 15,02 | 9,86 |
| 4 | 10000 | 4,000 | 490 | 2,69 | 16,00 | 10,76 |
| 5 | 12500 | 4,097 | 630 | 2,80 | 16,78 | 11,47 |
| Σ | – | 19,069 | – | 12,44 | 73,03 | 47,76 |

$$\alpha_2 = 1,08.$$

Таблица Г.3 – Определение показателя характера изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН контакта токопроводящей ленты с питающими проводами

| № опыта | t_i , ч | $x_i = \lg(t_i)$ | $U_0 - U_i$, В | $y_i = \lg(U_0 - U_i)$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|----------|-----------|------------------|-----------------|------------------------|---------|-----------|
| 1 | 2500 | 3,398 | 140 | 2,15 | 11,55 | 7,29 |
| 2 | 5000 | 3,699 | 300 | 2,48 | 13,68 | 9,16 |
| 3 | 7500 | 3,875 | 470 | 2,67 | 15,02 | 10,35 |
| 4 | 10000 | 4,000 | 650 | 2,81 | 16,00 | 11,25 |
| 5 | 12500 | 4,097 | 850 | 2,93 | 16,78 | 12,00 |
| Σ | – | 19,069 | – | 13,04 | 73,03 | 50,06 |

$$\alpha_3 = 1,12.$$

Приложение Д

Результаты ускоренных испытаний элементов изоляции плёночных электронагревателей

Таблица Д.1 – Результаты ускоренных испытаний элементов изоляции плёночных электронагревателей с токопроводящей лентой

| № опыта | Скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН, В/ч | | | |
|---------|--|--------|--------|----------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_{cp} |
| 1 | -0,146 | -0,136 | -0,150 | -0,144 |
| 2 | -0,132 | -0,142 | -0,142 | -0,139 |
| 3 | -0,088 | -0,089 | -0,095 | -0,091 |
| 4 | -0,095 | -0,098 | -0,085 | -0,093 |
| 5 | -0,107 | -0,111 | -0,103 | -0,107 |
| 6 | -0,098 | -0,110 | -0,100 | -0,103 |
| 7 | -0,077 | -0,070 | -0,075 | -0,074 |
| 8 | -0,068 | -0,067 | -0,073 | -0,069 |

Таблица Д.2 – Результаты ускоренных испытаний элементов изоляции плёночных электронагревателей перегиба токопроводящей ленты

| № опыта | Скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН, В/ч | | | |
|---------|--|--------|--------|----------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_{cp} |
| 1 | -0,120 | -0,130 | -0,119 | -0,123 |
| 2 | -0,118 | -0,116 | -0,129 | -0,121 |
| 3 | -0,085 | -0,087 | -0,078 | -0,083 |
| 4 | -0,078 | -0,078 | -0,087 | -0,081 |
| 5 | -0,103 | -0,103 | -0,087 | -0,098 |
| 6 | -0,094 | -0,100 | -0,088 | -0,094 |
| 7 | -0,062 | -0,070 | -0,070 | -0,067 |
| 8 | -0,070 | -0,063 | -0,066 | -0,066 |

Таблица Д.3 – Результаты ускоренных испытаний элементов изоляции плёночных электронагревателей контакта токопроводящей ленты с питающими проводами

| № опыта | Скорость изменения пробивного напряжения элементов изоляции ПЛЭН, В/ч | | | |
|---------|--|--------|--------|----------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_{cp} |
| 1 | -0,120 | -0,126 | -0,112 | -0,119 |
| 2 | -0,118 | -0,110 | -0,124 | -0,117 |
| 3 | -0,069 | -0,061 | -0,064 | -0,065 |
| 4 | -0,062 | -0,069 | -0,069 | -0,067 |
| 5 | -0,088 | -0,084 | -0,095 | -0,089 |
| 6 | -0,093 | -0,089 | -0,084 | -0,089 |
| 7 | -0,050 | -0,053 | -0,054 | -0,052 |
| 8 | -0,048 | -0,052 | -0,052 | -0,051 |

Приложение Е

Результаты обработки экспериментальных данных

Программа обработки экспериментальных данных в математическом пакете
MathCAD для полного факторного эксперимента 2^3

ORIGIN := 1

$k := 3$ – число факторов

$m \equiv 3$ – количество повторностей

N := $2^k = 8$ – количество опытов

$n := 1..N$ – номер опыта

$$x1 := \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad x2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad x3 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Пробивное напряжение изоляции после периода стабилизации, кВ:

$U_{0cp} := \blacksquare$ кВ

Среднеарифметическое из m повторностей

$$уср \equiv \frac{1}{m} \cdot (y1 + y2 + y3)$$

Сумма квадратов отклонений

$$\Sigma \Delta y_n := (y1_n - уср_n)^2 + (y2_n - уср_n)^2 + (y3_n - уср_n)^2$$

Построчная дисперсия

$$S_n := \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \Sigma \Delta y_n}$$

Сумма построчных дисперсий

$$\sum_{n=1}^N (S_n)^2 = \blacksquare$$

Расчётное значение критерия Кохрена

$$G_{\max} := \frac{S_{\max}}{\sum_{n=1}^N (S_n)^2}$$

где наибольшее значение суммы построчных дисперсий

$$S_{\max} := \max[(S_1)^2, (S_2)^2, (S_3)^2, (S_4)^2, (S_5)^2, (S_6)^2, (S_7)^2, (S_8)^2] = \blacksquare$$

$$G_{\max} = \blacksquare$$

Табличное значение критерия Кохрена

$$G_{\text{табл}} := \blacksquare$$

Опыт воспроизводим в том случае, когда удовлетворяется условие

$G_{\max} \leq G_{\text{табл}}$ – условие выполняется, значит, опыт воспроизводим.

Расчётные коэффициенты регрессии:

$$A_0 := \frac{\sum_{n=1}^N y_{\text{ср}n}}{N} \quad A_1 := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{1n})}{N} \quad A_2 := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{2n})}{N}$$

$$A_3 := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{3n})}{N} \quad A_{12} := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{1n} \cdot x_{2n})}{N}$$

$$A_{13} := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{1n} \cdot x_{3n})}{N} \quad A_{23} := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{2n} \cdot x_{3n})}{N}$$

$$A_{123} := \frac{\sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} \cdot x_{1n} \cdot x_{2n} \cdot x_{3n})}{N}$$

Математическая модель процесса

$$y_n := (A_0 + A_1 x_{1n} + A_2 x_{2n} + A_3 x_{3n} + A_{12} x_{1n} x_{2n} + A_{13} x_{1n} x_{3n} + A_{23} x_{2n} x_{3n} + A_{123} x_{1n} x_{2n} x_{3n})$$

Генеральная дисперсия

$$S_{\text{ген}} := \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (S_n)^2}$$

$$S_{\text{ген}} = \blacksquare$$

$$(S_{\text{ген}})^2 = \blacksquare$$

Квадратичная ошибка определения коэффициентов регрессии

$$SA := \frac{S_{\text{ген}}}{\sqrt{N \cdot m}}$$

$$SA = \blacksquare$$

Дисперсия определения коэффициентов регрессии

$$(SA)^2 = \blacksquare$$

Коэффициент регрессии A значим в том случае, если выполняется условие

$$|A| > SA \cdot t$$

где t – критерий Стьюдента.

$$t := \blacksquare$$

$$SA \cdot t = \blacksquare \text{ - доверительный интервал } (\Delta A_i).$$

$d := 4$ – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Окончательно уравнение регрессии

$$y_n := (A_0 + A_2 \cdot x_{2n} + A_3 \cdot x_{3n} + A_{23} \cdot x_{2n} \cdot x_{3n})$$

Дисперсия адекватности

$$S_{\text{ад}} := \sqrt{\frac{1}{N-d} \cdot \sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}n} - y_n)^2}$$

$$(S_{\text{ад}})^2 = \blacksquare$$

Критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} := \frac{(S_{\text{ад}})^2}{S_{\text{ген}}^2}$$

$$F_{\text{расч}} = \blacksquare$$

Табличное значение критерия Фишера

$$F_{\text{табл}} := \blacksquare$$

Полученная математическая модель описывает процесс адекватно в том случае, когда выполняется условие

$$F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}} \text{ – условие выполняется, значит, полученная модель адекватна.}$$

Таблица Е.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных ускоренных испытаний изоляции плёночных электронагревателей

| Наименование параметра | Обозначение параметра | Результат расчёта | | |
|--|-------------------------|----------------------------------|--|--|
| | | Элементы с токопроводящей лентой | Элементы перегиба токопроводящей ленты | Элементы контакта токопроводящей ленты с питающими проводами |
| 1 Проверка воспроизводимости опытов | | | | |
| 1.1 Дисперсии параллельных опытов | S_1^2 | $5,20 \cdot 10^{-5}$ | $3,70 \cdot 10^{-5}$ | $4,93 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_2^2 | $3,33 \cdot 10^{-5}$ | $4,90 \cdot 10^{-5}$ | $4,93 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_3^2 | $1,43 \cdot 10^{-5}$ | $2,23 \cdot 10^{-5}$ | $1,63 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_4^2 | $4,63 \cdot 10^{-5}$ | $2,70 \cdot 10^{-5}$ | $1,63 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_5^2 | $1,60 \cdot 10^{-5}$ | $8,53 \cdot 10^{-5}$ | $3,10 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_6^2 | $4,13 \cdot 10^{-5}$ | $3,60 \cdot 10^{-5}$ | $2,03 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_7^2 | $1,30 \cdot 10^{-5}$ | $2,13 \cdot 10^{-5}$ | $4,33 \cdot 10^{-5}$ |
| | S_8^2 | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | $1,23 \cdot 10^{-5}$ | $5,33 \cdot 10^{-5}$ |
| 1.2 Сумма дисперсий параллельных опытов | $\sum_{n=1}^N S_n^2$ | $22,67 \cdot 10^{-5}$ | $29,03 \cdot 10^{-5}$ | $19,23 \cdot 10^{-5}$ |
| 1.3 Расчетное значение критерия Кохрена | $G_{\max \text{ расч}}$ | 0,229 | 0,294 | 0,256 |
| 1.4 Табличное значение критерия Кохрена | $G_{\max \text{ табл}}$ | 0,5157 | 0,5157 | 0,5157 |
| 1.5 Заключение о воспроизводимости опытов | | Воспроизводимы | Воспроизводимы | Воспроизводимы |
| 2 Расчет коэффициентов регрессии | | | | |
| 2.1 Коэффициенты регрессии | A_0 | $10,24 \cdot 10^{-2}$ | $9,17 \cdot 10^{-2}$ | $8,11 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_1 | $0,087 \cdot 10^{-2}$ | $0,029 \cdot 10^{-2}$ | $0,033 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_2 | $2,07 \cdot 10^{-2}$ | $1,72 \cdot 10^{-2}$ | $2,25 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_3 | $1,41 \cdot 10^{-2}$ | $1,04 \cdot 10^{-2}$ | $1,09 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_{12} | $0,15 \cdot 10^{-2}$ | $0,11 \cdot 10^{-2}$ | $0,025 \cdot 10^{-2}$ |

Окончание таблицы Е.1

| Наименование параметра | Обозначение параметра | Результат расчёта | | |
|--|-----------------------|---|--|--|
| | | Элементы с токопроводящей лентой | Элементы перегиба токопроводящей ленты | Элементы контакта токопроводящей ленты с питающими проводами |
| | A_{13} | $0,10 \cdot 10^{-2}$ | $-0,037 \cdot 10^{-2}$ | $0,067 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_{23} | $0,41 \cdot 10^{-2}$ | $0,27 \cdot 10^{-2}$ | $0,38 \cdot 10^{-2}$ |
| | A_{123} | $-0,071 \cdot 10^{-2}$ | $-0,0042 \cdot 10^{-2}$ | $-0,025 \cdot 10^{-2}$ |
| 3 Оценка значимости коэффициентов регрессии | | | | |
| 3.1 Дисперсия воспроизводимости (генеральная дисперсия) | S_y^2 | $2,83 \cdot 10^{-5}$ | $3,63 \cdot 10^{-5}$ | $2,40 \cdot 10^{-5}$ |
| 3.2 Дисперсия коэффициентов регрессии | $S_{A_i}^2$ | $1,18 \cdot 10^{-6}$ | $1,51 \cdot 10^{-6}$ | $1,00 \cdot 10^{-6}$ |
| 3.3 Квадратичная ошибка коэффициентов регрессии | S_{A_i} | $1,09 \cdot 10^{-3}$ | $1,23 \cdot 10^{-3}$ | $1,00 \cdot 10^{-3}$ |
| 3.4 Табличное значение критерия Стьюдента | $t_{табл}$ | 2,12 | 2,12 | 2,12 |
| 3.5 Доверительный интервал | ΔA_i | $0,23 \cdot 10^{-2}$ | $0,26 \cdot 10^{-2}$ | $0,21 \cdot 10^{-2}$ |
| 3.6 Заключение о значимости коэффициентов регрессии | | Коэффициенты $A_1, A_{12}, A_{13}, A_{123}$ незначимы | | |
| 4 Проверка адекватности модели, полученной по результатам испытаний | | | | |
| 4.1 Дисперсия адекватности | $S_{ад}^2$ | $9,13 \cdot 10^{-6}$ | $1,75 \cdot 10^{-5}$ | $3,05 \cdot 10^{-5}$ |
| 4.2 Расчетное значение критерия Фишера | $F_{расч}$ | 0,32 | 0,48 | 1,27 |
| 4.3 Табличное значение критерия Фишера | $F_{табл}$ | 3,01 | 3,01 | 3,01 |
| 4.4 Заключение об адекватности модели | | Адекватна | Адекватна | Адекватна |

Примечание – В таблице расчёты приведены для абсолютных значений y .

Приложение Ж

Программа расчёта ресурса плёночных электронагревателей методом статистического моделирования в пакете MathCAD

ORIGIN:=1

N := ■

Генераторы векторов чисел, распределенных по заданному закону

U := rnorm(N, ■, ■) W := rnorm(N, ■, ■) Q := rnorm(N, ■, ■)

(U) = ■ (W) = ■ (Q) = ■

Уравнения регрессии в раскодированном виде (без учёта отрицательного знака):

y1 := ■ y2 := ■ y3 := ■

Задаём известные значения:

α1 := ■ α2 := ■ α3 := ■

τ:=μ:=1

Uпр:=2500 В

Uo := ■ В

Средний ресурс

$$T1 := \left[\frac{-\alpha1 \cdot (U_{\text{пр}} - U_o)}{y1 \cdot \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha1}} \quad T2 := \left[\frac{-\alpha2 \cdot (U_{\text{пр}} - U_o)}{y2 \cdot \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha2}} \quad T3 := \left[\frac{-\alpha3 \cdot (U_{\text{пр}} - U_o)}{y3 \cdot \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha3}}$$

j := 1..N

Математическое ожидание случайной величины T

$$T1_{\text{ср}} := \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N T1_j = \bullet \quad T2_{\text{ср}} := \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N T2_j = \bullet \quad T3_{\text{ср}} := \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N T3_j = \bullet$$

Среднее квадратичное отклонение случайной величины T

$$\sigma T1 := \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T1_j - T1_{\text{ср}})^2} = \bullet \quad \sigma T2 := \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T2_j - T2_{\text{ср}})^2} = \bullet$$

$$\sigma T3 := \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T3_j - T3_{\text{ср}})^2} = \bullet$$

Асимметрия случайной величины T

$$sT1 := \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T1_j - T1_{cp})^3}{\sigma T1^3} = \blacksquare \quad sT2 := \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T2_j - T2_{cp})^3}{\sigma T2^3} = \blacksquare$$

$$sT3 := \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (T3_j - T3_{cp})^3}{\sigma T3^3} = \blacksquare$$

$$Sb(b) := \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{b}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) + 2\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)^3}{\left(\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)^2}\right)^3}$$

Расчет параметров функции плотности распределения ресурса отдельных элементов

$b := 1$

Given $Sb(b) = sT1$ $b1 := \text{Minerr}(b) = \blacksquare$

Given $Sb(b) = sT2$ $b2 := \text{Minerr}(b) = \blacksquare$

Given $Sb(b) = sT3$ $b3 := \text{Minerr}(b) = \blacksquare$

$$kb1 := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b1}\right) = \blacksquare \quad kb2 := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b2}\right) = \blacksquare \quad kb3 := \Gamma\left(1 + \frac{1}{b3}\right) = \blacksquare$$

$$cb1 := \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b1}\right) - kb1^2} = \blacksquare \quad cb2 := \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b2}\right) - kb2^2} = \blacksquare \quad cb3 := \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b3}\right) - kb3^2} = \blacksquare$$

$$a1 := \frac{\sigma T1}{cb1} = \blacksquare \quad a2 := \frac{\sigma T2}{cb2} = \blacksquare \quad a3 := \frac{\sigma T3}{cb3} = \blacksquare$$

$$c1 := T1_{cp} - a1 \cdot kb1 = \blacksquare \quad c2 := T2_{cp} - a2 \cdot kb2 = \blacksquare \quad c3 := T3_{cp} - a3 \cdot kb3 = \blacksquare$$

Плотность распределения ресурса отдельных элементов

$$f1(t) := \frac{b1}{a1} \cdot \left(\frac{t-c1}{a1}\right)^{b1-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-c1}{a1}\right)^{b1}} \quad f2(t) := \frac{b2}{a2} \cdot \left(\frac{t-c2}{a2}\right)^{b2-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-c2}{a2}\right)^{b2}}$$

$$f3(t) := \frac{b3}{a3} \cdot \left(\frac{t-c3}{a3}\right)^{b3-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-c3}{a3}\right)^{b3}}$$

Вероятность безотказной работы отдельных элементов

$$P1(t) := e^{-\left(\frac{t-c1}{a1}\right)^{b1}} \quad P2(t) := e^{-\left(\frac{t-c2}{a2}\right)^{b2}} \quad P3(t) := e^{-\left(\frac{t-c3}{a3}\right)^{b3}}$$

Вероятность безотказной работы ПЛЭН

$$P(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } t < c_3 \\ P_3(t)^2 & \text{if } \begin{cases} P_3(t) \neq 0 \\ c_3 \leq t < c_2 \end{cases} \\ P_3(t)^2 \cdot P_2(t)^{30} & \text{if } \begin{cases} P_3(t) \neq 0 \\ P_2(t) \neq 0 \\ c_2 \leq t < c_1 \end{cases} \\ P_3(t)^2 \cdot P_2(t)^{30} \cdot P_1(t)^{16} & \text{if } c_1 \leq t \end{cases}$$

Плотность распределения ресурса ПЛЭН

$$f(t) := \frac{d}{dt}(1 - P(t))$$

Средний ресурс ПЛЭН без учёта периода стабилизации

$$T_{\text{ср}} := \int_{c_3}^{\infty} t f(t) dt$$

Вычисление гамма-процентного ресурса с учётом периода стабилизации

$$R(t\gamma) := 1 - \int_0^{t\gamma} f(t) dt$$

$$t\gamma := 2600(\quad \text{часов})$$

$$\text{Given } 0.999 = R(t\gamma) \quad T_{99} := \text{Minerr}(t\gamma) + 5000 =$$

$$\text{Given } 0.90 = R(t\gamma) \quad T_{90} := \text{Minerr}(t\gamma) + 5000 = \blacksquare$$

$$\text{Given } 0.80 = R(t\gamma) \quad T_{80} := \text{Minerr}(t\gamma) + 5000 = \blacksquare$$

$$\text{Given } 0.001 = R(t\gamma) \quad T_{01} := \text{Minerr}(t\gamma) + 5000 = \blacksquare$$

Приложение И

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 103932

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Челябинская государственная агроинженерная академия" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010147762

Приоритет полезной модели **23 ноября 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **27 апреля 2011 г.**

Срок действия патента истекает **23 ноября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



Приложение К

Акты и справка внедрения результатов научно-исследовательской работы

УТВЕРЖДАЮ:

Директор НИИ МАСП

А.М. Бердышев

« 15 » 01 20 14 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НР ЧГАА

Н.С. Сергеев

« 20 » 01 20 14 г.



АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся: представители Научно-исследовательского института Механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства (НИИ МАСП) директор Бердышев А.М., инженер Епишков Е.Н. с одной стороны и представители ФГБОУ ВПО Челябинская ГАА докт. техн. наук, профессор Буторин В.А., ассистент Ткачев А.Н. с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Прогнозирование ресурса плёночных электронагревателей».

Результатом законченной научно-исследовательской работы является методика ускоренных испытаний плёночных электронагревателей, стенд для износных испытаний плёночных электронагревателей, устройства определения технического состояния изоляции плёночных электронагревателей. Внедряемая научно-исследовательская работа содержит сведения о патенте на полезную модель.

Разработка рекомендована к внедрению НИИ МАСП.

Элементы новизны закключаются в возможности ускоренной оценки ресурса плёночных электронагревателей.

Технический уровень разработки соответствует уровню лучших образцов.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы:

1. Приняты к использованию в НИИ МАСП при разработке отопления на объектах бытового, социального и сельскохозяйственного назначения с помощью плёночных лучистых электронагревателей (ПЛЭН).

2. Демонстрация на выставках, публикация в печати и т.д.

Технические средства испытания электрической прочности плёночных электронагревателей. – Вестник ЧГАУ. Т. 55. – Челябинск, 2009. – С. 23–25.

Система электродов для определения электрической прочности плёночных электронагревателей. – Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 5. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – №1. – С. 84–86.

Электрические схемы испытания электрической прочности плёночных электронагревателей. – Научное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы всероссийской научно-практической конференции в рамках XX Юбилейной специализированной выставки «АгроКомплекс-2010» (2-4 марта 2010 г.). Часть III. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – С. 121–123.

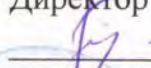
Прогнозирование ресурса плёночных электронагревателей. – Материалы II международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук, проф. Н. С. Сергеева. – Челябинск: ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 196–199.

3. Предложения о дальнейшем внедрении работы и другие замечания.

Предприятиям-изготовителям плёночных электронагревателей и другим заинтересованным организациям рекомендуется разработанная методика определения ресурса новых образцов ПЛЭН, стенд для ускоренных испытаний, устройства определения технического состояния изоляции, а также учёт полученных значений ресурса аналогичных исследуемым образцов ПЛЭН.

Представители предприятия,
ответственные за внедрение:

Директор

 /А.М. Бердышев/

Инженер

 /Е.Н. Елишков/

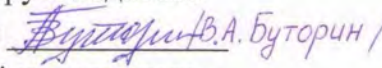
Гл. экономист

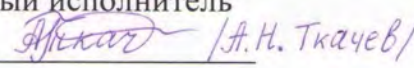


Представители ЧГАА:

Начальник НИС 

Инженер НИС _____

Зав. кафедрой, руководитель
подразделения 

Ответственный исполнитель
темы 

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «КВАНТ»

 Е.В. Овчинникова

« 03 » 02 20 14 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НР ЧГАА

 Н.С. Сергеев

« 03 » 02 20 14 г.

**АКТ****внедрения результатов научно-исследовательской работы**

Мы, нижеподписавшиеся: представители ООО «КВАНТ» директор Овчинникова Е.В., ведущий инженер Ваганова Е.И. с одной стороны и представители ФГБОУ ВПО Челябинская ГАА докт. техн. наук, профессор Буторин В.А., ассистент Ткачев А.Н. с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы «Прогнозирование ресурса плёночных электронагревателей».

Полученные результаты научно-исследовательской работы приняты к использованию при разработке технического задания и проектирования отопления на базе плёночных лучистых электронагревателей (ПЛЭН) на объектах бытового, социального и сельскохозяйственного назначения, а также АЗС.


Знание величины ресурса ПЛЭН является важным фактором грамотного проектирования лучистого электроотопления с их применением на различных объектах, исключает возможность экономических потерь от неверно предположенного ресурса данного вида электрооборудования и отражает его надёжность в общей системе разработанного технического решения.

Представители предприятия:

Директор

 Е.В. Овчинникова /

Ведущий инженер

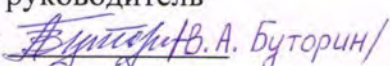
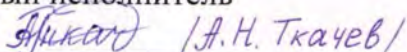
 /Е.И. Ваганова/

Гл. экономист

Представители ЧГАА:

Начальник НИС  /А.А. Солодовников/

Инженер НИС _____

Зав. кафедрой, руководитель подразделения  /В.А. Буторин/Ответственный исполнитель темы  /А.Н. Ткачев/

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по УР

Челябинской государственной
агроинженерной академии

К. А. Сазонов

«12» 02 2014 г.

**СПРАВКА**

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс**

Материалы теоретических и экспериментальных исследований, полученные аспирантом кафедры «Электрические машины и эксплуатация электрооборудования в сельском хозяйстве» Ткачевым А.Н. в ходе выполнения научно-исследовательской работы по теме «Прогнозирование долговечности плёночных электронагревателей» используются в курсе лекций по дисциплине «Эксплуатация электрооборудования» для студентов факультета «Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Зав. кафедрой ЭМЭЭСХ

докт. техн. наук, профессор

В.А. Буторин

05.02.2014г.