

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АПК**

Коллективная монография

**МОСКВА 2022**

**УДК 21.31:63**  
**ББК 40.76**  
**А 17**

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Российского государственного аграрного университета  
– МСХА имени К.А. Тимирязева*

**Научный редактор**

доктор технических наук,  
профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических  
процессов имени академика И.Ф. Бородина  
Сторчевой Владимир Фёдорович

**Рецензенты:**

д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный  
университет имени И.Т. Трубилина», Нормов Дмитрий Александрович  
д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Иванов Юрий Григорьевич

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АПК:** коллективная монография. – Москва: РГАУ –  
МСХА, 2022. – 288 с. – ISBN 978-5-9675-1976-5

В коллективную монографию включены материалы выступлений участников круглого стола «Развитие электроснабжения и применения электроэнергии в АПК», проведенного в институте механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева 11 октября 2022 года и посвящённого обсуждению вопросов повышения качества и надежности электроснабжения объектов агропромышленного комплекса, а также эффективного использования электроэнергии в сельскохозяйственных производственных процессах.

В докладах участников круглого стола содержатся материалы, отражающие результаты научных исследований в области генерации, передачи и использования электрической энергии, вопросы использования возобновляемых источников энергии, совершенствования распределительных электросетей, воздействия электромагнитных полей на семена и растения, использования электротехнологических приемов для повышения сохранности сельскохозяйственной продукции, а также прогрессивные технические решения по повышению эффективности сельскохозяйственного производства.

Коллективная монография предназначена для научных работников, аспирантов, магистрантов, и специалистов в области электрификации сельского хозяйства, интересующихся современными научными достижениями в электроснабжении и использовании электрической энергии.

©РГАУ- МСХА имени К.А. Тимирязева

## Содержание

Коллектив авторов.....	5
Введение.....	7
Современные проблемы использования электрической и оптической энергии для электротехнологических процессов в апк (Сторчевой В.Ф.).....	9
Модель очистки воздуха электрофильтром (Кабдин Н.Е., Белов М.И., Селезнева Д.М.).....	13
Концепция сельских электрических сетей 0,4 кв с управляемой конфигурацией (Виноградов А.В., Виноградова А.В., Лансберг А.А.).....	52
Расчет локальных электрообогревателей для молодняка (Растимешин С.А., Тихомиров Д.А., Трунов С.С.).....	63
Модели технико-технологических решений электрического повреждения нежелательных растительных объектов (Ляпин В.Г.).....	89
Управление Продуктивностью меристемных растений энергоэффективными световыми технологиями (Большин Р.Г.).....	102
Сельскохозяйственная кибернетика (Анашин Д.В.).....	115
Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева (Просвирякова М.В., Горячева Н.Г., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Уманский П.М.).....	130
Автоматический контроль зрелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла (Судник Ю.А., Махмуд А. Абделхамид).....	146
Технологии применения электрической энергии в процессе хранения корнеплодов и динамического мониторинга их качества (Занфирова Л.В., Чистова Я.С.).....	152
Энергетическая оценка технологий (Сторчевой В.Ф., Сучугов С.В.).....	165
Особенности применения комбинированного облучения в АПК (Овсянникова Е.А.).....	167
Интеграция систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока (Меликов А.В.).....	177
Интервальные синтез и анализ систем автоматического управления	

(Судник Ю.А.).....	194
Эксплуатация солнечных сетевых фотоэлектрических установок потребителей системы централизованного электроснабжения (Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И.).....	205
Влияние работы электроактиватора воды на содержание животных в критических условиях (Кравченко В.Н.).....	215
Влияние зарядного напряжения на снижение ёмкости свинцово- кислотных аккумуляторных батарей (Карлаков Д.С., Лештаев О.В., Стушкина Н.А.).....	220
Использование ионисторов в блоках питания слаботочных электропотребителей (Андреев С.А., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е.).....	227
Заключение.....	264
Список литературы.....	266

## Коллектив авторов

Данная монография подготовлена коллективом авторов:

Д.т.н., профессор Сторчевой Владимир Федорович (Современные проблемы использования электрической и оптической энергии для электротехнологических процессов в АПК); к.т.н., доцент Кабдин Николай Егорович, д.т.н., профессор Белов Михаил Иванович, ст. преподаватель Селезнева Дарья Михайловна (Модель очистки воздуха электрофильтром); д.т.н., профессор Виноградов Александр Владимирович, к.т.н., Виноградова Алина Васильевна, Лансберг Александр Александрович (Концепция сельских электрических сетей 0,4 кв с управляемой конфигурацией); д.т.н., профессор Растимешин Сергей Андреевич, д.т.н., профессор Тихомиров Дмитрий Анатольевич, к.т.н., доцент Трунов Станислав Семенович (Расчет локальных электрообогревателей для молодняка); к.т.н., доцент Навроцкая Людмила Васильевна, Навроцкая Светлана Романовна (Экологически чистая стимуляция и улучшение технологических качеств семян); к.т.н., доцент Ляпин Виктор Григорьевич (Модели технико-технологических решений электрического повреждения нежелательных растительных объектов); к.т.н., доцент Большин Роман Геннадьевич (Управление продуктивностью меристемных растений энергоэффективными световыми технологиями); ст. преподаватель Анашин Дмитрий Викторович (Сельскохозяйственная кибернетика); д.т.н., доцент Просвирякова Марьяна Валентиновна, к.т.н., Горячева Наталья Геннадьевна, д.т.н., профессор Михайлова Ольга Валентиновна, д.т.н., профессор Новикова Галина Владимировна, Уманский Петр Михайлович (Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева); д.т.н., профессор Судник Юрий Александрович, к.т.н. Махмуд А. Абдельхамид (Автоматический контроль зрелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла); к.п.н., доцент Занфирова Лариса Вячеславовна, к.п.н., доцент Чистова Яна Сергеевна

(Технологии применения электрической энергии в процессе хранения корнеплодов и динамического мониторинга их качества); д.т.н., профессор Сторчевой Владимир Федорович, к.т.н., доцент Сучугов Сергей Васильевич (Энергетическая оценка технологий); ст. преподаватель Овсянникова Елена Александровна (Особенности применения комбинированного облучения в АПК); к.т.н., доцент Меликов Алексей Владимирович (Интеграция систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока); д.т.н., профессор Судник Юрий Александрович (Интервальные синтез и анализ систем автоматического управления); ст. преподаватель Лештаев Олег Валерьевич, к.т.н., доцент Стушкина Наталья Алексеевна, д.т.н., профессор Загинайлов Владимир Ильич (Эксплуатация солнечных сетевых фотоэлектрических установок потребителей системы централизованного электроснабжения); к.т.н., доцент Кравченко Владимир Николаевич (Влияние работы электроактиватора воды на содержание животных в критических условиях); Карлаков Дмитрий Сергеевич, ст. преподаватель Лештаев Олег Валерьевич, к.т.н., доцент Стушкина Наталья Алексеевна (Влияние зарядного напряжения на снижение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей); к.т.н., доцент Андреев Сергей Андреевич, д.т.н., профессор Сторчевой Владимир Федорович, к.т.н., доцент Кабдин Николай Егорович (Использование ионисторов в блоках питания слаботочных электропотребителей); Семикин Степан Дмитриевич, к.т.н., доцент Белов Сергей Иванович, ст. преподаватель Цедяков Андрей Александрович (Программная реализация определения оптимального местоположения реклоузера на воздушной линии 10 кВ); к.т.н., доцент Кравченко Владимир Николаевич, к.т.н., доцент Филонов Роман Федорович (Оптимизация выпаса скота на основе применения солнечной энергии в электроизгородях).

## Введение

Современное сельское хозяйство является интенсивно развивающейся отраслью народного хозяйства РФ. Развитие сельского хозяйства сопровождается увеличивающимся потреблением энергии, в общем балансе которой значительную роль играет электрическая энергия. Электрическая энергии легко транспортируется, преобразуется и используется в различных отраслях АПК. Каждый год появляются новые способы генерации электроэнергии, прогрессивные приемы ее передачи и оборудование для ее высокоэффективного использования.

Развитие сельской электрификации определяет высокую восприимчивость сельскохозяйственного производства к достижениям научно-технического прогресса. Электроэнергия дала жизнь многим сельским профессиям. Отходит в прошлое профессия доярки, пастуха, исполнителя трудоемких полевых работ. Уже сегодня трудно представить сушку, мелиорацию, поддержание искусственного микроклимата, выращивание растений в условиях защищенного грунта, приготовление корма и многие другие процессы без применения электрической энергии.

Полная электрификация приведет к росту производительности труда и повышению технического оснащения сельского хозяйства. А это позволит превратить сельскохозяйственный труд в разновидность индустриального и послужит одним из средств преодоления существенных различий между городом и деревней.

Прогрессивные виды технологии используют электроэнергию, где с ее помощью работают электрофильтры, в электрических полях окрашиваются различные изделия, осуществляется сепарирование и предпосевная обработка семян, проводятся опыты по электроактивации жидкостей и воды. Уместно вспомнить сушку, нагрев, дезинсекцию, металлизацию изделий распылением.

Сюда же относятся переработка фруктов и овощей, мяса, молока и других сельскохозяйственных продуктов. Без электроэнергии не обходится искусственное освещение и вентиляция производственных помещений, невозможно осуществить ультрафиолетовое облучение молодняка и инфракрасный обогрев.

Преподаватели, аспиранты, магистранты и студенты института механики и энергетики имени В.П.Горячкина принимают участие в различных формах научно-исследовательских работ, обогащая современные знания новыми приемами генерации, передачи и эффективного использования электрической энергии в сельском хозяйстве. Проводимый круглый стол «Развитие электроснабжения и применения электроэнергии в АПК» ставит своей задачей обмен информацией, подводящей итоги научно-исследовательских работ вопросов повышения качества и надежности электроснабжения объектов агропромышленного комплекса, а также эффективного использования электроэнергии в сельскохозяйственных производственных процессах. В процессе работы круглого стола планируется обсудить наиболее значимые результаты исследований, помочь ученым скоординировать свою деятельность, привлечь к научному труду молодое поколение и популяризировать успехи наших коллег.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АПК**

**(Сторчевой В.Ф.)**

Эффективность сельскохозяйственного производства находится в прямой зависимости от использования передовых электротехнологий. Эти электротехнологии основаны на многогранном воздействии разночастотных электромагнитных факторов на сельскохозяйственные объекты. Для успешной разработки новых электротехнологий необходим детальный анализ наиболее существенных направлений исследований, проводимых нашими научными коллективами.

В качестве материала анализа использованы отчеты последних лет об учебной и научно-исследовательской работе кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф.Бородина. При выполнении анализа применялись методы научного обобщения известных фактов и абстрагирования.

Эффективность современного сельскохозяйственного производства во многом определяется широким использованием передовых технологий, среди которых особое место принадлежит приемам и способам воздействия на материальные объекты различных видов электрической энергии. Объединяемые понятием электротехнологии эти способы, а также технические средства для их реализации являются предметом пристального внимания сотрудников кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф.Бородина. Коллектив кафедры на протяжении сорока лет ведет научно-исследовательские работы по совершенствованию известных и созданию новых электротехнологий. Эти электротехнологии направлены на увеличение производительности аграрного труда, улучшение его условий, повышение качества производимой продукции и снижение отрицательного воздействия на окружающую среду.

Современные электротехнологии характеризуются чрезвычайно широким спектром параметров используемой электроэнергии, одним из которых является ее частота. Коллективом кафедры исследуются разнообразные формы электротехнологического воздействия на сырье и продукты сельскохозяйственного производства в диапазоне частот от нуля до сотен гигагерц. В этот интервал входит электроэнергия промышленной частоты, электроэнергия радиодиапазона, микроволновая энергия, а также энергия инфракрасного, оптического и ультрафиолетового спектров.

Таким образом, электротехнология и светотехника в АПК сегодня – это производственное использование электрической и оптической энергии в виде электромагнитных полей, электрического тока, светового потока и излучения, электрических зарядов и импульсов в технологических процессах с целью получения высококачественной продукции.

Использование электроэнергии в сельском хозяйстве позволяет:

- электрофизическими методами благотворно воздействовать на живые организмы животных и птиц, растительные объекты, продукты и материалы;

- воздействовать на обрабатываемый объект различными видами энергии (тепловой, электромагнитной, световой, и др.) без применения рабочих органов;

- облегчить и ускорить автоматизацию сельского хозяйства и т. д.

В настоящее время среди основных направлений реализации научной деятельности по кафедре автоматизации и роботизации технологических процессов имени И.Ф.Бородина можно назвать: «Электротехнологии и электрооборудование» (научные руководители: д.т.н., профессор Сторчевой В.Ф., д.т.н., доцент Просвирякова М.В., к.т.н., доцент Кабдин Н.Е.) и «Автоматизация и роботизация технологических процессов» (научные руководители: д.т.н. Судник Ю.А., к.т.н., доцент Андреев С.А.).

Научное направление: «Электротехнологии и электрооборудование» включает совокупность исследований микроволновых технологий и имеет

целью разработку и внедрение СВЧ-установок, обеспечивающих: измельчение, обезвоживание и термообработку непищевых и боенских отходов в непрерывном режиме. К этому направлению также относятся разработка технологии и обоснование параметров работы комбинированной установки для облучения молодняка сельскохозяйственных животных и птицы с улучшенной равномерностью зоны ИК и УФ облучения, разработка технологии и оборудования для обеззараживания молока от патогенной микрофлоры при пастеризации и сепарировании и разработка электротехнологии и оборудования озонирования и ионизации воздушной среды в закрытых помещениях для содержания животных и птицы.

Научное направление «Автоматизация и роботизация технологических процессов» включает исследования интеллектуально-роботизированных технологий экологического земледелия на базе самопередвигающихся платформ, позволяющих проводить автоматический экспресс-контроль (мониторинг) качества (плодородия) почв и физиологического состояния агрокультур, а также и технологические операции обработки почвы и возделывания отдельных агрокультур. В рамках обозначенного направления осуществляется подготовка инженерных кадров в области практической роботизации (разработка программного обеспечения и проектирование аппаратных средств) экологического земледелия на базе универсальных тренажеров (компьютерных эмуляторов) НПО «Андроидная робототехника».

Кроме того, направление включает разработку новых методов и средств дистанционного автоматического экспресс-контроля плодородия почв, разработку принципов интервального анализа и синтеза автоматических систем, проектирование новых технических систем, технологии технического творчества студентов (работа студенческого кружка по техническому творчеству), совершенствование управления электропривода сельскохозяйственных машин, а также разработку электротехнологических способов и технических средств ресурсо-энергосбережения в производственных процессах АПК.

В настоящее время ряд проектов коллектива кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф.Бородина реализован в установках, внедренных в производство. Техническая новизна решений защищена патентами на изобретения. Для части разработок изготовлена техническая документация. Материалы исследований изложены в монографиях и нашли отражение в учебниках и учебных пособиях. Научная работа последних лет отмечена двумя золотыми и тремя серебряными медалями.

## **МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОМ (КАБДИН Н.Е., БЕЛОВ М.И., СЕЛЕЗНЕВА Д.М.)**

Двухзонный электростатический фильтр (ЭФ) предназначен для очистки воздуха от пыли путем зарядки и улавливания частиц пыли в двух зонах: зоне зарядки (ионизаторе) и зоне осаждения (осадителе) [1], [2], [3].

Воздушный поток, нагнетаемый осевым вентилятором, захватывает частицы пыли и направляет их в ионизатор. В ионизаторе частицы пыли приобретают заряд, двигаясь в электрическом поле между коронирующим и заземленным коллекторным электродами [4]. При этом некоторые частицы пыли осаждаются на пластине коллекторного электрода. Частицы пыли, заряженные в ионизаторе, потоком воздуха направляются в зону осаждения, двигаясь в секциях между пластиной электрода под напряжением и параллельной пластиной коллекторного заземленного электрода. ЭФ улавливает частицу пыли, если при движении ее между электродами траектория частицы пересекает пластину коллекторного электрода в зоне ионизации или осаждения [5], [6].

Исследуемый объект – частица пыли, движущаяся в электростатическом фильтре (ЭФ). Предмет исследования – движение заряженной частицы пыли в зонах ионизации и осаждения ЭФ. Целью исследования является повышение эффективности очистки воздуха от пыли и других аэрозолей при использовании двухзонного ЭФ.

Задачи исследования состоят в следующем:

- 1) разработка математической модели движения частицы пыли в зонах ионизации и осаждения ЭФ;
- 2) обоснование показателей эффективности очистки воздуха от пыли;
- 3) исследование влияния потенциала коронирующего электрода на максимальную и среднюю напряженность электрического поля в зоне ионизации и зарядку частиц;

4) исследование влияния количества зон осаждения на показатели эффективности очистки воздуха;

5) исследование влияния скорости воздушного потока на показатели эффективности очистки воздуха;

6) исследование влияния многократного прохода воздуха через электрофильтр на показатели эффективности очистки воздуха.

Можно отметить два направления исследования движения аэрозольных частиц в зонах ионизации и осаждения: «детерминированный» и «вероятностный». В первом случае заряженная частица представляется сферой и определяется ее дрейф между электродами в зоне осаждения при действии на частицу механических и электрических сил [7], [8], [9]. Во втором случае наряду с динамической рассматривается вероятностная модель движения частицы, в которой учитываются соударения частиц между собой. Вероятностная модель эффективна при моделировании турбулентных потоков. Однако, можно считать, что аэрозольные частицы практически не сталкиваются между собой, если вентилятор ЭФ обеспечивает ламинарный воздушный поток [10]. Поэтому при постановке задачи соударения заряженных частиц пыли между собой принято не рассматривать. Ввиду неопределенности начального положения и размера частицы в момент входа в зону ионизации начальное положение и размер частицы рассматривались как независимые случайные величины. Таким образом, задача о движении заряженной частицы пыли заданного размера между электродами двузонного ЭФ представляет вторую задачу динамики точки со случайными начальными условиями. Предполагалось, что при входе в зону ионизации положение частицы между электродами (расстояние от пластины коллекторного электрода до частицы) подчиняется равномерному закону распределения [11], [12]. При этом эффективность очистки воздуха от пыли определялась по статистике решений второй задачи динамики точки, в которых траектория частицы пересекает пластину коллекторного электрода.

Приняты следующие допущения:

- 1) частица пыли – твердое тело сферической формы;
- 2) скорость частицы воздушного потока в каждой точке проходного сечения между электродами постоянна и направлена перпендикулярно проволочным коронирующим электродам и параллельно пластинам коллекторных электродов;
- 3) влиянием веса частицы пыли на движение ее в воздушном потоке можно пренебречь [13];
- 4) движением заряженной частицы в направлении, параллельном пластинам электродов и перпендикулярном направлению потока воздуха, можно пренебречь;
- 5) влиянием электрического ветра коронирующего разряда на эффективность ЭФ можно пренебречь [14].

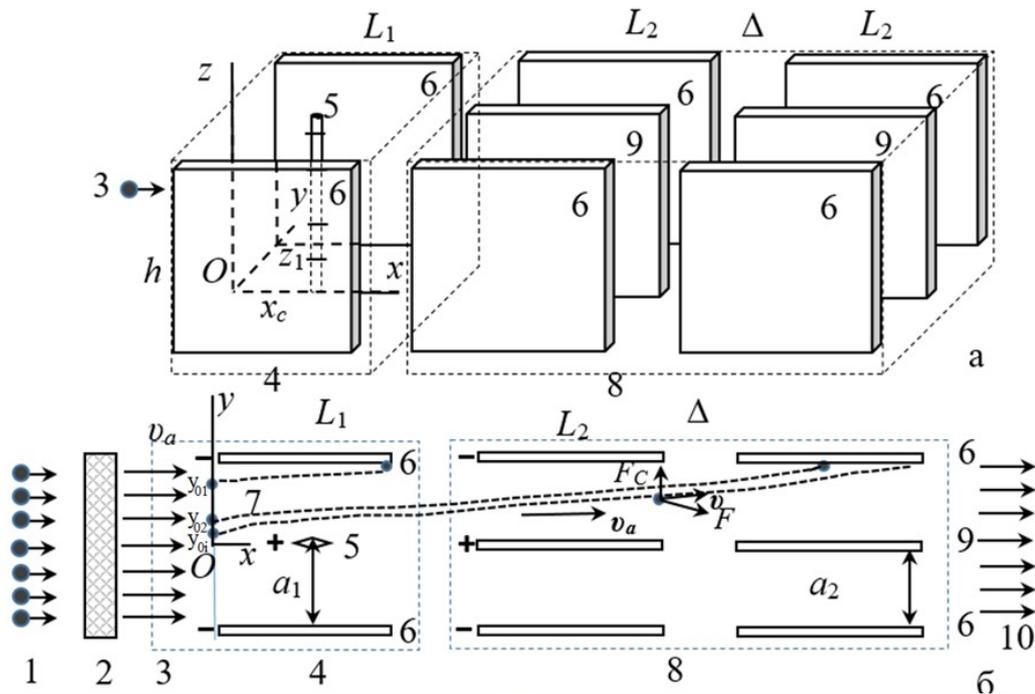


Рисунок 1. – Электростатический фильтр (а) и движение частиц пыли между электродами в секции зоны ионизации и секциях двух зон осаждения (б). 1, 3 – входной воздушный поток с пылью; 2 – предварительный фильтр для улавливания крупноразмерной пыли; 4 – зона ионизации; 5 – коронирующий игольчатый электрод; 6 – пластина коллекторного заземленного электрода; 7 – траектории частицы пыли; 8 – зоны осаждения; 9 – пластина электрода под напряжением; 10 – выходной воздушный поток

Обозначения (Рисунок 1):

$t$  – время, с;

$Oxyz$  – прямоугольная система декартовых координат с осью  $Ox$ , проходящей через конец коронирующего электрода и направленной перпендикулярно коронирующим электродам и параллельно пластинам коллекторных электродов, осью  $Oy$ , перпендикулярной пластинам коллекторных электродов, и осью  $Oz$ , параллельной коронирующим электродам;

$x, y$  – координаты частицы пыли (центра масс пылинки), м;

$y_0$  – координата частицы пыли по оси  $Oy$  при входе в секцию зоны ионизации, м;

$L_1, L_2$  – длина коллекторной пластины в зоне ионизации и зоне осаждения соответственно, м;

$x_c$  – расстояние между осью  $Oz$  и коронирующим электродом ( $x_c = L_1/2$ ), м;

$h$  – высота коронирующего электрода и пластин коллекторных электродов, м;

$a_1$  – расстояние между коронирующим и коллекторным электродами в зоне ионизации, м;

$a_2$  – расстояние между электродом под напряжением и коллекторным электродом в зоне осаждения, м;

$D$  – диаметр сферической частицы пыли, м;

$n_b$  – число частиц пыли диаметром  $D$ ;

$n_L$  – число зон осаждения;

$v_a, v_{ax}, v_{ay}$  – величина и соответственно координаты по осям  $Ox$ ,  $Oy$  скорости частицы воздушного потока, м/с;

$v_x, v_y$  – координаты по осям  $Ox, Oy$  скорости частицы пыли, м/с;

$q$  – заряд частицы пыли, Кл;

$q_k$  – заряд коронирующего электрода, Кл;

$q_c$  – заряд пластины электрода в зоне осаждения, Кл;

- $R$  – радиус цилиндрического провода коронирующего электрода, м;
- $e$  – элементарный заряд,  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- $T$  – температура воздуха по абсолютной шкале Кельвина,  $T = 293$  К;
- $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;
- $N_0$  – средняя концентрация ионов в воздухе,  $N_0 = 5 \cdot 10^{14}$  1/м<sup>3</sup>;
- $v_c$  – среднеквадратическая скорость ионов,  $v_c = 239$  м/с ;
- $v_z$  – подвижность ионов воздуха,  $v_z = 1.4 \cdot 10^{-4}$  (м/с)/(В/м);
- $E_i, E_{ix}, E_{iy}$  – величина и соответственно координаты по осям  $Ox, Oy$  вектора напряженности электрического поля, В/м;
- $U_K$  – потенциал коронирующего электрода, В;
- $U_c$  – потенциал пластины электрода под напряжением в зоне осаждения, В;
- $E_K$  – максимальная напряженность в зоне ионизации, В/м;
- $E_C$  – средняя напряженность в зоне ионизации, В/м;
- $C_C$  – коэффициент Милликена;
- $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па с;
- $\rho_a$  – плотность воздуха,  $\rho_a = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>;
- $\rho$  – плотность частицы пыли,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, единица емкости,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/(Н·м<sup>2</sup>);
- $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы пыли,  $\epsilon = 3$ ;
- $F_{sx}, F_{sy}$  – координаты по осям  $Ox, Oy$  силы Стокса, действующей на частицу пыли со стороны воздушного потока, Н;
- $F_{kx}, F_{ky}$  – координаты по осям  $Ox, Oy$  силы Кулона, действующей на заряженную частицу пыли, Н;
- $Q_b$  – производительность вентилятора электрофильтра, м<sup>3</sup>/с;
- $P_D$  – показатель очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр;
- $P_D$  – показатель очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр;

$P_{DT}$  – показатель очистки воздуха при многократном проходе через электрофильтр;

$T, T_1$  – время работы электрофильтра и время, за которое через электрофильтр проходит воздух в помещении некоторого объема, с.

### **Взаимодействие частицы с воздушным потоком**

Между силой, действующей на частицу, и гидродинамическим давлением на нее со стороны жидкости (газа) при направленном движении частицы и газа имеет место такая связь:

$$F = c_D \rho (v_a - v)^2 \pi D^2 / 8;$$

Коэффициент сопротивления  $c_D$  в данной формуле зависит от числа Рейнольдса

$$\Re = (v_a - v) \rho D / \mu;$$

В диапазоне  $Re < 0,2$  сила, действующая на частицу со стороны газа, существенно зависит от вязкости газа, и формула записывается как закон Стокса:

$$F = 3\pi \mu D (v_a - v);$$

Когда размеры частиц становятся соизмеримыми с размерами молекул газа, эффект вязкости, лежащий в основе закона Стокса, снижается. Для сферических частиц пыли диаметром  $D$  не более 1 мкм закон Стокса записывается с поправкой Каннингема:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Sx} = \frac{3\pi\mu D \left( v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right)}{C_c} \\ F_{Sy} = \frac{3\pi\mu D \left( v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right)}{C_c} \end{array} \right. ; \quad (1)$$

где  $C_c$  – коэффициент Милликена, определяемый при средней длине свободного пробега молекул воздушного потока, равной 0,07 мкм, и

измерении  $D$  в мкм, по формуле:

$$C_c = 1 + \frac{0,14}{D} \zeta;$$

В том случае, когда движения частицы и воздушного потока не однонаправленны, величины  $v_a$ ,  $v$ ,  $F$  в формуле (1) следует рассматривать как векторы.

Выделим две фазы движения заряженной частицы. На первой фазе будем рассматривать движение частицы в секции зоны ионизации между проволочным коронирующим электродом и пластиной коллекторного электрода. На второй фазе – движение в секции зоны осаждения между пластиной отталкивающего электрода под напряжением положительной полярности и пластиной заземленного коллекторного электрода.

#### **Движение частицы в секции зоны ионизации**

Найдем силы, действующие на заряженную частицу в точке  $M$  с координатами  $x$ ,  $y$  в секции ионизатора (Рисунок 2). В соответствии с допущением 4 будем считать, что проекции сил на ось  $Oz$  можно не рассматривать.

Поместим в точку  $M$  пробный положительный единичный заряд.

Пусть  $r_1$  – расстояние от точки  $M$  до коронирующего электрода;  $r_2$  – расстояние от точки  $M$  до элемента коронирующего электрода элементарной длины  $dz_1$  на расстоянии  $z_1$  от плоскости  $Oxy$ ;  $dE$  – элементарная напряженность в точке  $M$  электрического поля заряда элемента коронирующего электрода;  $E_1$  – величина проекции вектора напряженности электрического поля в точке  $M$ , создаваемого одиночным коронирующим электродом, на плоскость  $Oxy$  (Рисунок 2а).

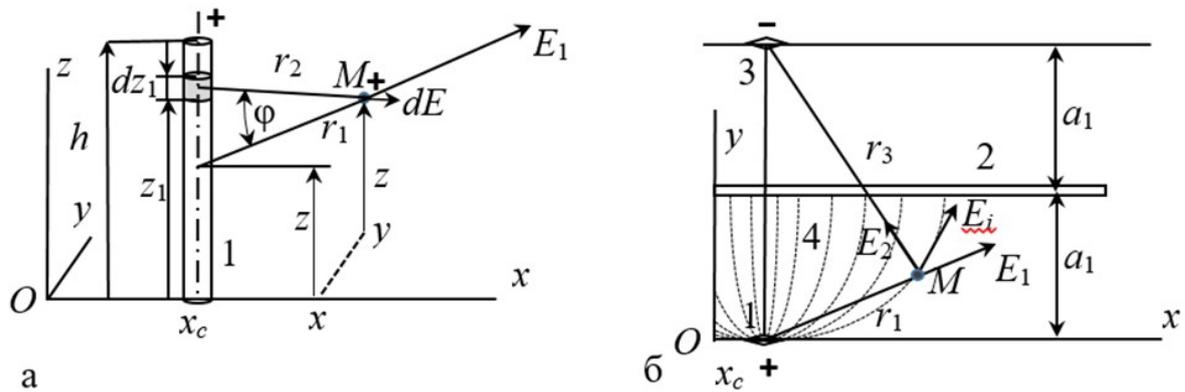


Рисунок 2. – К расчету напряженности электрического поля от коронирующего электрода (а) и между коронирующим электродом и пластиной коллекторного электрода (б)

1 – коронирующий проволочный электрод с положительным зарядом; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – фиктивный проволочный электрод с отрицательным зарядом; 4 – силовые линии электрического поля

По определению [15],

$$r_1 = \left[ (x - x_c)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$r_2^2 = r_1^2 + (z_1 - z)^2;$$

$$dE = (q_k/h) dz_1 / (4\pi \epsilon_0 r_2^2);$$

$$E_1 = \int_0^h \frac{r_1}{r_2} dE = \frac{q_k r_1}{4\pi \epsilon_0 h} \int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1;$$

Последнее равенство с учетом выражения для  $r_2$  перепишем так:

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \epsilon_0 h r_1} \left\{ z \left( z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h - z) \left[ (h - z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\};$$

В соответствии с допущением 4 будем рассматривать среднюю по координате  $z$  напряженность как функцию от  $x, y$  в таком виде:

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \epsilon_0 h r_1} \frac{1}{h} \int_0^h \left\{ z \left( z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h - z) \left[ (h - z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} dz;$$

или

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \varepsilon_0 h r_1} \frac{2(h^2 + r_1^2)^{\frac{1}{2}} - 2r_1}{h}; \quad (3)$$

В электрическом поле заряда коронирующего электрода на заземленной пластине коллекторного электрода индуцируется отрицательный заряд. Для учета электрического поля индуцированного заряда воспользуемся методом зеркальных отображений [15]: к полю заряда коронирующего электрода добавляется поле «фиктивного» коронирующего электрода с равным по величине отрицательным зарядом, расположенного симметрично относительно пластины коллекторного электрода (Рисунок 2б). Величину напряженности  $E_2$  в точке  $M$  поля, создаваемого зарядом «фиктивного» электрода, можно определить по формуле (3) с изменением величины  $r_1$ :

$$E_2 = \frac{q_k}{4\pi \varepsilon_0 h r_3} \frac{2(h^2 + r_3^2)^{\frac{1}{2}} - 2r_3}{h}; \quad (4)$$

где  $r_3$  – расстояние от точки  $M$  до фиктивного коронирующего электрода

$$r_3 = \left[ (x - x_c)^2 + (2a_1 - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

Координаты вектора напряженности электрического поля в точке  $M$  ионизатора по осям  $Ox$ ,  $Oy$  найдем как суммы соответствующих координат напряженностей величиной  $E_1$  и  $E_2$ :

$$E_{ix} = E_{1x} + E_{2x}; \quad E_{iy} = E_{1y} + E_{2y}; \quad (6)$$

$$E_{1x} = E_1 (x - x_c) r_1^{-1}; \quad E_{1y} = E_1 y r_1^{-1};$$

$$E_{2x} = -E_2 (x - x_c) r_3^{-1}; \quad E_{2y} = E_2 (2a_1 - y) r_3^{-1};$$

Можно убедиться, что поле напряженности в плоскости  $Oxy$  и параллельных плоскостях потенциальное.

Найдем заряд  $q_k$  коронирующего электрода для расчета

напряженности его электрического поля по формуле (6). Заряд распределен равномерно по поверхности электрода, включая боковые иглы. Рассмотрим силовую линию (отрезок) поля, перпендикулярную заземленной пластине, с одним концом на проводе с координатами  $x_c, R$  и вторым концом на пластине с координатами  $x_c, R + a_1$  по осям  $Ox, Oy$ . Как следует из формулы (6), координаты напряженности поля по оси  $Ox$  в точках этой линии равны нулю:

$$E_{1x} = E_{2x} = 0;$$

Потенциалы поля в концевых точках линии равны соответственно  $U_K$  и 0. По определению,

$$0 - U_K = - \int_R^{a_1} (E_{1y} + E_{2y}) dy;$$

или с учетом равенств (4), (5) и (3), (6) при  $x = x_c$

$$U_K = \frac{q_k}{2\pi \varepsilon_0 h^2} \int_R^{a_1} \left( \frac{(h^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} - y}{y} + \frac{(h^2 + (2a_1 - y)^2)^{\frac{1}{2}} - (2a_1 - y)}{2a_1 - y} \right) dy;$$

По условиям,  $y < a_1 \ll h$  и, пренебрегая  $y$  и  $(2a_1 - y)$  в сравнении с  $h$ , представим последнее равенство в таком виде:

$$U_K = \frac{q_k}{2\pi \varepsilon_0 h} \ln \frac{2a_1 - R}{R};$$

Таким образом, если потенциал и радиус  $R$  провода коронирующего электрода заданы, заряд коронирующего электрода можно оценить по формуле:

$$q_k = U_K 2\pi \varepsilon_0 h / \ln \frac{2a_1 - R}{R}; \quad (7)$$

Пусть на границе коронирующего электрода, где  $x = x_c, y = R, r_1 = R, r_3 \approx 2a_1$ , напряженность  $E_i$  известна и равна  $E_K$ . Тогда из равенств (6) и (2)..(5) следует, что  $E_{1x} = E_{2x} = 0; E_{1y} = E_1; E_{2y} = E_2$ .

При этом

$$E_K = E_1 + E_2;$$

или, учитывая равенство (7),

$$E_K = U_K \left\{ \frac{(h^2 + R^2)^{\frac{1}{2}} - R}{R} + \frac{[h^2 + (2a_1 - R)^2]^{\frac{1}{2}} - 2a_1 + R}{2a_1 - R} \right\} / \left( h \ln \frac{2a_1 - R}{R} \right); \quad (8)$$

и приближенно

$$E_K = U_K / \left( R \ln \frac{2a_1 - R}{R} \right);$$

Координаты силы Кулона, действующей на заряженную частицу, прямо пропорциональны координатам напряженности электрического поля и заряду частицы пыли:

$$F_{Kx} = q E_{ix}; \quad F_{Ky} = q E_{iy}; \quad (9)$$

Как следует из выражений (9), для определения силы Кулона необходимо оценить заряд частицы пыли в электростатическом поле коронного разряда. Рассмотрим частицы пыли, размеры которых варьируют от 0,1 мкм до 1 мкм. Зарядка частиц осуществляется при их соударениях с ионами, образуемыми при коронном разряде [16]. Частицы размером 1 мкм и выше соударяются с ионами, движущимися упорядоченно под действием сил электрического поля. Частицы размером 0,2 мкм и ниже соударяются с ионами, движущимися хаотично в процессе теплового движения. При рассмотрении частиц в диапазоне от 0,2 мкм до 1 мкм необходимо учитывать оба способа движения ионов. Заряд частицы при диффузионной зарядке ионами, движущимися хаотично, при относительной диэлектрической проницаемости воздуха, равной единице, определяется по следующей формуле [17]:

$$q = 2\pi \varepsilon_0 \frac{DkT}{e} \ln \left( 1 + \frac{Dv_c N_0 e^2}{8\varepsilon_0 kT} t \right); \quad (10)$$

Заряд частицы пыли униполярными ионами воздуха, движущимися упорядоченно в электростатическом поле, определяется по такой формуле:

$$q = 3\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon}{\epsilon + 2} E_c D^2 \frac{N_0 e v_z t}{N_0 e v_z t + 4\epsilon_0}; \quad (11)$$

В соответствии с формулой (11) заряд частицы возрастает до некоторой предельной величины. При этом частица получит 95% максимального заряда за время 0,03 с и 90% – за время 0,013 с. Это означает, что при скорости воздушного потока до 0,92 м/с частица пыли получит 90% максимального заряда и более при длине зоны ионизации 12 мм. Формула (11) справедлива для электрического поля постоянной напряженности. Примем, что такой напряженностью можно считать среднюю напряженность электрического поля на участке ионизатора длиной  $L_1$ , равной 12 мм. При увеличении длины пластин ионизатора напряженность на участке длиной 12 мм при расположении коронирующего электрода в центре участка остается без изменений, так как в соответствии с формулами (6) напряженность не зависит от  $L_1$ .

По определению, величина напряженности электрического поля в некоторой точке зоны ионизации представляется функцией координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  точки. Средняя напряженность  $E_c$ , по определению, есть некоторая средняя величина напряженностей в точках траектории частицы за время ее движения в зоне ионизации. Очевидно, чем дальше от коронирующего электрода движется частица, тем меньше величины напряженности в точках ее траектории. Усредненная по координате  $z$  величина напряженности в точках секции зоны ионизации с координатами  $x$ ,  $y$  зависит от координат и определяется с помощью формул (6). Чтобы найти постоянную величину напряженности, пригодную для использования в формуле (11), положим, что изменение координаты  $y$  частицы после входа в зону ионизации влияет незначительно на усредненную по координате  $x$  величину напряженности. Таким образом, при заданной координате  $y$  точки входа частицы в секцию зоны ионизации величину средней напряженности  $E_c$ , остающуюся постоянной за время движения частицы в этой зоне, можно найти так:

$$E_c = (E_{cx}^2 + E_{cy}^2)^{1/2}; \quad (12)$$

где  $E_{cx}$ ,  $E_{cy}$  вычисляются как усредненные по координате  $x$  величины  $E_{ix}$ ,  $E_{iy}$ , определенные по формулам (6), а именно

$$E_{cx} = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1/2} (E_{1x} + E_{2x}) dx; \quad E_{cy} = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1/2} (E_{1y} + E_{2y}) dx;$$

или при  $u = (2a_1 - y)$ ;  $y > R$ :  $L_1 = 0.012$  м при допущении  $r_1 \ll h$ ;  $r_3 \ll h$

$$E_{cx} = \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0 h L_1} \ln \frac{y^2(L_1^2/4 + u^2)}{u^2(L_1^2/4 + y^2)}; \quad E_{cy} = \frac{q_k}{\pi\epsilon_0 h L_1} \left( \arctan \frac{L_1}{2y} + \arctan \frac{L_1}{2u} \right); \quad (13)$$

При выводе формул (13) полагалось, что коронирующий электрод помещен в середину зоны ( $x_c = L_1/2$ ), и напряженность электрического поля между коронирующим электродом и ближайшей заземленной пластиной симметрична относительно плоскости  $x = L_1/2$ .

В соответствии с допущениями 3, 4, 5 на частицу пыли действуют две значимые силы: активная сила Кулона (равнодействующая сил Кулона), направленная вдоль силовых линий электрического поля, и реактивная сила Стокса, направленная противоположно скорости частицы в движении относительно воздушного потока (Рисунок 3).

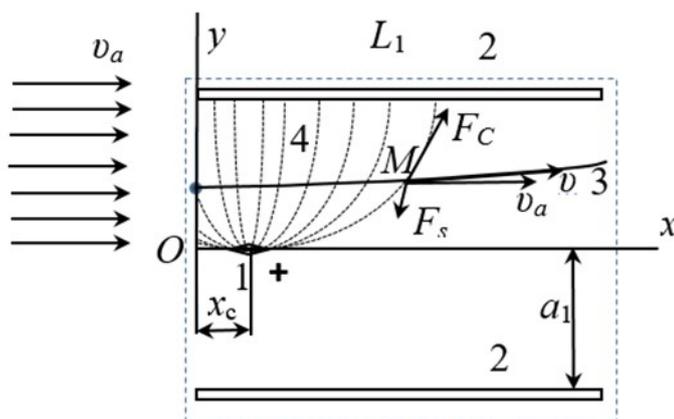


Рисунок 3. – Силы, действующие на заряженную частицу  $M$  в секции зоны ионизации. 1 – коронирующий игольчатый электрод; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – траектория частицы  $M$ ; 4 – силовые линии электрического поля

Учитывая формулы (1), (9), дифференциальные уравнения движения

частицы под действием сил Кулона и Стокса в плоскости  $Oxy$  секции зоны ионизации запишем так:

$$\begin{cases} \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{d^2 x}{dt^2} = q E_{ix} + \frac{3\mu\pi D}{C_c} \left( v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right) \\ \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = q E_{iy} + \frac{3\mu\pi D}{C_c} \left( v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right); \end{cases} \quad (14)$$

Уравнения (12) позволяют найти координаты частицы пыли в каждый момент, если задать начальные условия: координаты частицы  $x_0, y_0$  в нулевой момент и координаты скорости частицы  $v_{ax}, v_{ay}$ , равные координатам вектора скорости частицы воздуха в нулевой момент,

$$\begin{cases} x=0; y=y_0 \\ \frac{dx}{dt} = v_{ax}; \frac{dy}{dt} = v_{ay}; \end{cases} \quad (15)$$

В уравнениях (14) заряд  $q$  в каждый момент рассчитывался как сумма зарядов, определенных по формулам (10) и (11) при диаметре частицы пыли в пределах от  $0.1 \cdot 10^{-6}$  до  $1.0 \cdot 10^{-6}$  м.

### Движение частицы в секции зоны осаждения

Рассмотрим движение заряженной частицы пыли в секции зоны осаждения между электродами. Выберем систему декартовых прямоугольных координат  $Oxyz$  с началом  $O$  в угловой точке пластины электрода под напряжением так, чтобы ось  $Oy$  была перпендикулярна пластине (Рисунок 4).

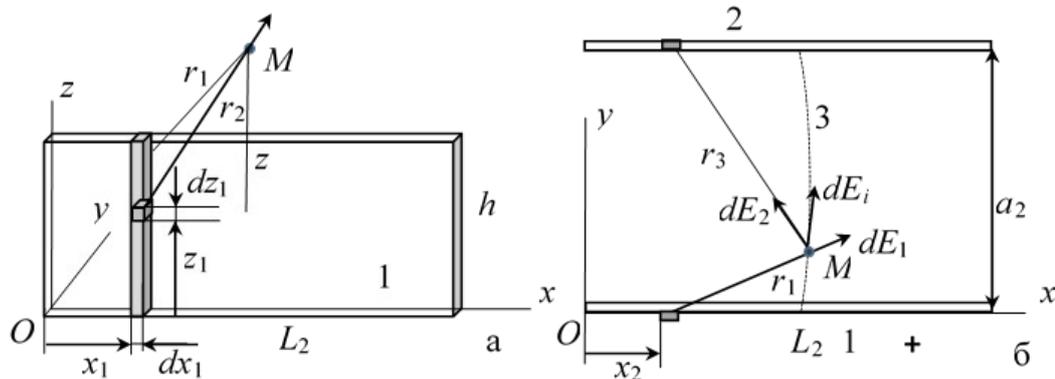


Рисунок 4. – Секция зоны осаждения с заряженной частицей  $M$  между

*электродами. 1 – пластина электрода под напряжением; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – силовая линия электрического поля*

Найдем выражения сил, действующих на заряженную частицу пыли в зоне осаждения. Для оценки силы Кулона определим координаты вектора напряженности электрического поля в точке  $M$  по осям  $Ox$ ,  $Oy$ . Поместим в точку  $M$  с координатами  $x, y, z$  пробный положительный единичный заряд. Будем считать, что положительный заряд  $q_c$  пластины электрода под напряжением распределен равномерно по внутренней поверхности с плотностью  $q_c/(h \cdot L_2)$ . Выделим на внутренней поверхности пластины электрода элементарную площадку в виде прямоугольника высотой  $h$  и стороной элементарной длины  $dx_1$  на расстоянии  $x_1$  от начала координат вдоль оси  $Ox$  (Рисунок 4а). Внутри этого прямоугольника выделим элементарный прямоугольник на расстоянии  $z_1$  от плоскости  $Oxy$  элементарной высоты  $dz_1$  по оси  $Oz$ , который будем рассматривать как элемент пластины с элементарным положительным зарядом  $q_c \cdot dx_1 \cdot dz_1 / (h \cdot L_2)$ .

Пусть  $r_1$  – расстояние от точки  $M$  до элементарного прямоугольника высотой  $h$ ;  $r_2$  – расстояние от точки  $M$  до элемента пластины с координатами  $x_1, z_1$  по осям  $Ox, Oz$ ;  $dE$  – элементарная напряженность в точке  $M$  электрического поля от заряда элемента пластины;  $dE_1$  – проекция элементарной напряженности в точке  $M$  электрического поля заряда элемента пластины на плоскость  $Oxy$ . По определению,

$$r_1 = \left[ (x - x_1)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (16)$$

$$r_2^2 = r_1^2 + (z_1 - z)^2;$$

$$dE = \frac{q_c}{h L_2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 r_2^2} dz_1 dx_1;$$

$$dE_1 = \frac{q_c}{h L_2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} dz_1 dx_1;$$

Проекции  $dE_{1x}$ ,  $dE_{1y}$  элементарной напряженности в точке  $M$

электрического поля от заряда элемента пластины на оси  $Ox$ ,  $Oy$  можно представить такими выражениями:

$$dE_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} \frac{x-x_1}{r_1} dz_1 dx_1;$$

$$dE_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} \frac{y}{r_1} dz_1 dx_1;$$

Последние два равенства следует рассматривать как формулы для координат по осям  $Oxi$   $Oy$  элементарной напряженности в точке  $M$  с координатами  $x, y, z$  в электрическом поле элемента пластины электрода с координатами  $x_1, 0, z_1$ . Отсюда можно найти координаты вектора напряженности в точке  $M$  по осям  $Oxi$   $Oy$  в электрическом поле пластины электрода под напряжением ( $y \neq 0$ )

$$E_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} (x-x_1) \left( \int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1 \right) dx_1;$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{y}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \left( \int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1 \right) dx_1;$$

или

$$E_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \frac{(x-x_1)}{r_1^2} f(z, r_1) dx_1; \quad (17)$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{y}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \frac{1}{r_1^2} f(z, r_1) dx_1; \quad (18)$$

где

$$f(z, r_1) = z \left( z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h-z) \left[ (h-z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

В соответствии с допущением 4 движение частицы вдоль оси  $Oz$  оказывает существенное влияние на эффективность ЭФ. Поэтому вместо последней функции рассмотрим ее усреднение  $F(r_1)$  по переменной  $z$ :

$$F(r_1) = f(h/2, r_1);$$

или

$$F(r_1) = h \left( h^2/4 + r_1^2 \right)^{-1/2};$$

и при  $r_1 \ll h$

$$F(r_1) = 2;$$

Подставляя в равенства (17), (18) вместо функции  $f(z, r_1)$  усредненную по переменной  $z$  функцию  $F(r_1)$ , получим следующие выражения координат вектора напряженности в точке  $M$  по осям  $Ox$  и  $Oy$  в электрическом поле пластины электрода под напряжением:

$$E_{1x} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \int_0^{L_2} \frac{x - x_1}{r_1^2} dx_1;$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} y \int_0^{L_2} \frac{1}{r_1^2} dx_1;$$

или

$$E_{1x} = \frac{-q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \ln \left| \frac{(L_2 - x)^2 + y^2}{x^2 + y^2} \right|; \quad (19)$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \left( \operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right); \quad (20)$$

В электрическом поле заряда электрода под напряжением на заземленной пластине коллекторного электрода индуцируется отрицательный заряд. Координату по оси  $Ox$  напряженности  $E_{2x}$  в точке  $M$  электрического поля, создаваемого индуцированным зарядом, можно определить по формуле (19), если изменить уна  $(a_2 - y)$  и знак на противоположный, а координату по оси  $Oy$  напряженности  $E_{2y}$  в точке  $M$  – по формуле (20), если изменить уна  $(a_2 - y)$  (Рисунок 4б):

$$E_{2x} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \ln \left| \frac{(L_2 - x)^2 + (a_2 - y)^2}{x^2 + (a_2 - y)^2} \right|; \quad (21)$$

$$E_{2y} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \left( \operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{a_2 - y} + \operatorname{arctg} \frac{x}{a_2 - y} \right); \quad (22)$$

По определению,

$$E_{ix} = E_{1x} + E_{2x}; \quad (23)$$

$$E_{iy} = E_{1y} + E_{2y}; \quad (24)$$

На прямой линии тока, проходящей через середины пластин  $x = L_2/2$ , координата напряженности по оси  $Ox$  равна нулю ( $E_{ix} = 0$ );

и справедливо равенство

$$U_c = \int_0^{a_2} E_{iy} dy;$$

или с учетом равенств (24) и (20), (22)

$$U_c = \frac{2q_c}{\pi \varepsilon_0 h L_2} \int_0^{a_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2y} dy;$$

Отсюда

$$U_c = \frac{q_c}{\pi \varepsilon_0 h} \left[ \frac{2a_2}{L_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2a_2} + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{4a_2^2}{L_2^2} \right) \right];$$

Из последнего уравнения можно найти заряд пластины электрода под напряжением при заданном потенциале по следующей формуле:

$$q_c = \pi \varepsilon_0 h U_c / \left[ \frac{2a_2}{L_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2a_2} + \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{4a_2^2}{L_2^2} \right) \right]; \quad (25)$$

Максимальная напряженность  $E_{iym}$  электрического поля по оси  $O$  удостигается вблизи пластин электродов и определяется по такой формуле:

$$E_{iym} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \left( \pi + \operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{a_2} + \operatorname{arctg} \frac{x}{a_2} \right);$$

Дифференциальные уравнения (14) движения заряженной частицы аэрозоли в секции зоны ионизации справедливы и для секции зоны осаждения. Запишем их так:

$$\begin{cases} \rho \frac{D^3}{6} \frac{d^2 x}{dt^2} = q E_{ix} + \frac{3 \mu \pi D}{C_c} \left( v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right); \\ \rho \frac{D^3}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = q E_{iy} + \frac{3 \mu \pi D}{C_c} \left( v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right); \end{cases} \quad (26)$$

где  $q$  – заряд частицы, полученный в ионизаторе;

$E_{ix}, E_{iy}$  – координаты напряженности, определяемые по формулам (23), (24).

Начальные условия записываются в таком виде:

$$\begin{cases} x = x_0; y = y_0 \\ \frac{dx}{dt} = v_{x0}; \frac{dy}{dt} = v_{y0}; \end{cases} \quad (27)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты частицы при входе в зону осаждения, равные координатам частицы на выходе из ионизатора с учетом переноса системы координат вдоль оси  $Ox$ ;  $v_{x0}, v_{y0}$  – координаты скорости частицы при входе в зону осаждения, равные координатам скорости частицы на выходе из ионизатора.

### **Показатели эффективности очистки воздуха от пыли**

Объективная оценка чистоты воздуха по содержанию пыли в воздухе может быть получена, если известны функции распределения количественной или массовой доли частиц по размеру (диаметру) и требования к содержанию частиц в заданных диапазонах длины. Если плотность пылинок не зависит от их размеров, то между количественной долей и массовой долей сферических частиц пыли в заданном диапазоне размеров существует связь и достаточно рассмотреть количественные доли. Установлено, что функция распределения частиц пыли в воздухе по размерам соответствует логнормальному закону. Таким образом, для оценки чистоты воздуха в этом случае достаточно найти математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины (размера частицы пыли) до и после очистки воздуха. В настоящее время требования к оценке

чистоты воздуха, основанные на законе распределения частиц по размерам, не регламентированы, и в качестве оценочных показателей используются экспериментальные данные концентрации частиц пыли заданного размера в некотором объеме воздуха до очистки и после очистки [18].

Пусть  $n_{bD}$  – число частиц пыли диаметром  $D$  в некотором объеме воздуха до фильтрации;  $n_{eD}$  – число частиц пыли диаметром  $D$  в том же объеме после фильтрации. Показатель  $P_D$  эффективности очистки воздуха по частицам размера  $D$  зададим формулой:

$$P_D = \frac{n_{bD} - n_{eD}}{n_{bD}}; \quad (28)$$

Пусть  $n_b$  – заданное число частиц пыли диаметром  $D$ , траектории которых рассчитываются;  $n_e$  – число частиц пыли диаметром  $D$ , траектории которых пересекают коллекторный электрод зоны ионизации или зоны осаждения. Для оценки показателя эффективности под величиной  $n_{bD}$  будем понимать заданное число  $n_b$ , под величиной  $n_{eD}$  – расчетное количество частиц  $n_e$ . При использовании формулы (28) будем задавать число  $n_b$  вместо  $n_{bD}$  и рассчитывать  $n_e$  вместо  $n_{eD}$ .

При определении траекторий частиц в секции зоны ионизации решались дифференциальные уравнения (14) для каждой частицы. Координата  $x_0$  частицы по оси  $Ox$  на входе в секцию зоны ионизации принималась равной нулю. Начальная координата  $y_0$  частицы по оси  $Oy$  на входе в секцию зоны ионизации назначалась. Предполагалось, что частица заданного размера с равной вероятностью может занимать любое положение между электродами, то есть начальная координата  $y_0$  по оси  $Oy$  с равной вероятностью может быть любым числом в пределах от 0 или  $R$  до  $a_1$ . Таким образом, в уравнениях (15) для  $i$ -й частицы принимались начальные условия:

$$x_0 = x_i, y_0 = y_i;$$

где  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -й частицы на входе в секцию зоны ионизации,

$$0 < i \leq n_b; x_i = 0; y_i = i \cdot a_1 / n_b;$$

Можно доказать, что траектории частиц, диаметры и начальные скорости которых соответственно равны, не пересекаются, если начальные координаты  $y_0$  по оси  $Oy$  не равны. Отсюда можно сделать такой вывод: при задержании частицы с начальной координатой  $y_0$  частицы, входящие в зону ионизации с той же скоростью и начальной координатой, превышающей  $y_0$ , также задерживаются. По определению, при равномерном распределении частиц заданного диаметра по ширине секции зоны ионизации, на единицу ширины секции приходится  $n_b/a_1$  частиц, и при минимальной начальной координате  $y_{0D}$ , приводящей к задержанию частицы, число  $n_e$  незадержанных частиц равно  $n_b \cdot y_{0D}/a_1$ , а число задержанных частиц равно  $n_b \cdot (a_1 - y_{0D})/a_1$ , то есть формулу (28) для оценки показателя  $P_{Di}$  эффективности очистки воздуха в зоне ионизации по частицам диаметра  $D$  можно записать так:

$$P_{Di} = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1}; \quad (29)$$

где  $y_{0D}$  – минимальная начальная координата частицы диаметром  $D$  по оси  $Oy$ , траектория которой пересекает пластину коллекторного электрода в зоне ионизации.

Полагая, что в промежутке между зоной ионизации и зоной осаждения и в промежутках между зонами осаждения частицы не двигаются вдоль оси  $Oy$ , приходим к выводу, что формулу (29) можно использовать и в общем случае, когда частицы задерживаются в зоне ионизации или в зонах осаждения. Запишем ее так:

$$P_D = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1}; \quad (30)$$

где  $y_{0D}$  – минимальная начальная координата частицы диаметром  $D$  по оси  $Oy$ , траектория которой пересекает пластину коллекторного электрода секции зоны ионизации или в одной из секций зоны осаждения.

**Показатель эффективности очистки воздуха от пыли и время работы электрофилтра**

Формула (30) для расчета показателя эффективности очистки воздуха по частицам заданного размера справедлива в том случае, когда воздух проходит через электрофильтр однократно. Она пригодна при расчете показателя в открытых негерметичных помещениях. Применительно к закрытым помещениям с малым воздухообменом ее необходимо усовершенствовать.

Пусть  $V$  – объем воздуха в закрытом помещении ( $\text{м}^3$ );  $m_0$  – масса частиц заданного размера в объеме до очистки воздуха (кг);  $n$  – число проходов воздуха через электрофильтр;  $T$  – время работы вентилятора электрофильтра (с);  $Q_b$  – производительность вентилятора ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Отметим, что в соответствии с формулой (30) показатель  $P_D$  на каждом проходе не зависит от числа проходов  $n$ . По определению, масса  $m$  не уловленных электрофильтром частиц заданного диаметра за  $n$  проходов воздуха через электрофильтр определяется по формуле

$$m = m_0 (1 - P_D)^n;$$

Отсюда можно найти долю  $P_{DT}$  уловленных частиц за  $n$  проходов так:

$$P_{DT} = \frac{m_0 - m}{m_0} = 1 - (1 - P_D)^n;$$

или, так как  $n \approx T \cdot Q_b / V$ ,

$$P_{DT} = 1 - (1 - P_D)^{\frac{T \cdot Q_b}{V}}; \quad (31)$$

Пусть  $T_1$  – время, за которое вентилятор прокачает воздух в объеме  $V$ :

$$T_1 = V / Q_b;$$

Запишем формулу (31) в таком виде:

$$P_{DT} = 1 - (1 - P_D)^{\frac{T}{T_1}};$$

или

$$\frac{T}{T_1} = \frac{\ln(1 - P_{DT})}{\ln(1 - P_D)}; \quad (32)$$

Уравнение (32) можно использовать для оценки времени работы электрофильтра, обеспечивающего требуемый показатель  $P_{DT}$  эффективности

очистки воздуха в помещении с малым воздухообменом с внешней средой, если известен показатель эффективности  $P_D$  при однократном прогоне воздуха вентилятором за время  $T_1$ .

### Алгоритм расчета показателя эффективности очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр

1. Задание исходных данных с назначением  $D, n_L$  (>):

Таблица 1

#### Исходные данные

Обозначение	$e, \text{ Кл}$	$T, \text{ К}$	$k, \text{ Дж/К}$	$N_0, \text{ 1/м}^3$	$v_c, \text{ м/с}$	$v_z, \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	$U_k, \text{ В}$	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{с}$
Величина	$1.602 \cdot 10^{-19}$	293	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$1 \cdot 10^{15}$	239	$1.4 \cdot 10^{-4}$	10000	$1.81 \cdot 10^{-5}$
Обозначение	$\rho_a, \text{ кг/м}^3$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\epsilon_0, \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$	$\epsilon$	$h, \text{ м}$	$a_1, \text{ м}$	$a_2, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$
Величина	1.2	1000	$8.85 \cdot 10^{-12}$	3	0,15	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	0.012
Обозначение	$L_2, \text{ м}$	$v_a, \text{ м/с}$	$v_{ax}, \text{ м/с}$	$v_{ay}, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$U_c, \text{ В}$	$n_b$
Величина	0.012	0.7	0.7	0	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-5}$	6000	1000
Обозначение	$n_{bD}, \%$	$y_0, \text{ м}$	$n_L$					
Величина	80..	$y_0 < a_1$	1..2					

2.  $x_c = L_1/2$ .

3. Оценка максимальной напряженности электрического поля в ионизаторе по формуле (8) и расчет  $q_k$  по формуле (7).

4. Установка номера  $i$  частицы:  $i = 1$ .

5. Задание координат  $x$ , участницы и скорости частицы заданного размера в момент  $t = 0$  по формулам (15), где  $y_0 = i \cdot a_1 / n_b$ .

6. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14) методом Рунге-Кутта и расчет координат  $x, y$  точки (частицы) в секции зоны ионизации в моменты времени, когда  $x \leq L_1$ , и учете формулы (2) для определения  $r_1$ ; формулы (3) для определения  $E_1$ ; формулы (5) для определения  $r_3$ ; формулы (4) для определения  $E_2$ ; формул (6) для определения  $E_{ix}, E_{iy}$ ; формул (13) для определения  $E_{cx}, E_{cy}$ ; формулы (12) для определения  $E_c$ ; формул (10) и (11) для определения  $q$  как суммы зарядов частиц диаметром от 1 мкм до 10 мкм.

7. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя

эффективности по формуле (30) для частиц диаметром  $D$  при  $y_{0D} = y_0$ , если выполнены неравенства  $x \leq L_1$ ;  $y \geq a_1$ .

8. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (26) методом Рунге-Кутты при начальных условиях (27), полученных из уравнений (14) на выходе частицы из зоны ионизации в моменты времени, когда  $x \leq L_1 + L_2$ , и учете формулы (25) для определения  $q_C$ ; формулы (19) для определения  $E_{1x}$ , формулы (20) для определения  $E_{1y}$ ; формулы (21) для определения  $E_{2x}$ ; формулы (22) для определения  $E_{2y}$ ; формулы (23) для определения  $E_{ix}$ ; формулы (24) для определения  $E_{iy}$ .

9. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя эффективности по формуле (30) для частиц диаметром  $D$  при  $y_{0D} = y_0$ , если выполнены неравенства  $x \leq L_1 + L_2$ ;  $y \geq a_2$ .

10. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (26) методом Рунге-Кутты при начальных условиях (27), полученных из уравнений (26) на выходе частицы из 1-й зоны осаждения в моменты времени, когда  $x \leq L_1 + 2 \cdot L_2$ , и учете формулы (25) для определения  $q_C$ ; формулы (19) для определения  $E_{1x}$ , формулы (20) для определения  $E_{1y}$ ; формулы (21) для определения  $E_{2x}$ ; формулы (22) для определения  $E_{2y}$ ; формулы (23) для определения  $E_{ix}$ ; формулы (24) для определения  $E_{iy}$ .

11. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя эффективности по формуле (30) для частиц диаметром  $D$  при  $y_{0D} = y_0$ , если выполнены неравенства  $x \leq L_1 + 2 \cdot L_2$ ;  $y \geq a_2$ .

12. Увеличение номера  $i$  частицы на 1.

13. Переход к пункту 5, если выполняется неравенство  $i < n_b$ .

### **Влияние потенциала коронирующего электрода на напряженность электрического поля и зарядку частиц в ионизаторе**

Напряженность электрического поля и заряд частицы пыли служат определяющими факторами, влияющими на характеристики движения частицы в зоне ионизации. При этом максимальная напряженность не должна

превышать напряженность пробоя, а средняя напряженность должна обеспечивать заряд частиц, достаточный для притяжения к осадительным электродам.

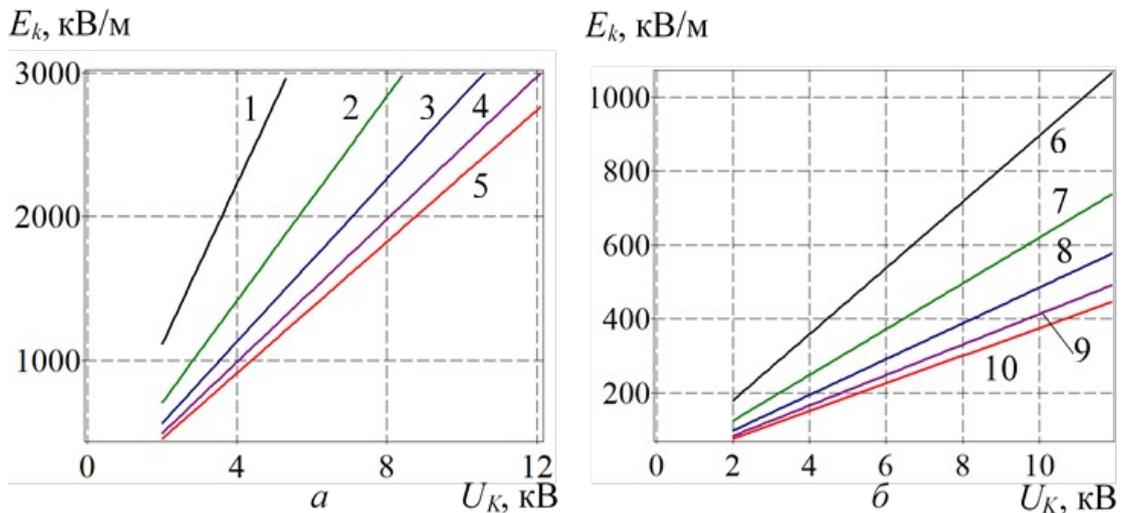


Рисунок 5. – Зависимости наибольшей (а) и средней (б) напряженности в ионизаторе от потенциала коронирующего электрода при исходных данных в Таблица 2.1, заданном радиусе  $R$  проволочного электрода и заданной координате  $y$ . 1 –  $R = 0,5$  мм; 2 –  $R = 1$  мм; 3 –  $R = 1,5$  мм; 4 –  $R = 2$  мм; 5 –  $R = 2,5$  мм; 6 –  $y = 2$  мм; 7 –  $y = 3,5$  мм; 8 –  $y = 5$  мм; 9 –  $y = 6,5$  мм; 10 –  $y = 8$  мм

Расчеты по формуле (8) показали, что потенциал коронирующего электрода от 10 до 11 кВ обеспечивает высокую максимальную напряженность, не превышающую напряженности пробоя при радиусе провода 1.5..2 мм (Рисунок 5а). При этом средняя напряженность электрического поля, определенная по формулам (12), (13), зависит от  $y$  и изменяется от 400 до 1000 кВ/м (Рисунок 5б).

Приняв за максимальную напряженность критическую начальную напряженность электрического поля, приводящую к возникновению коронного разряда и равную 1500 кВ/м, найдем, что при радиусе провода 1,5..2 мм потенциал коронирующего электрода достаточно устанавливать на уровне 6 кВ (Рисунок 5а). При этом средняя напряженность электрического поля в ионизаторе составит 220..550 кВ/м (Рисунок 5б). При задании максимальной напряженности от 2000 до 2500 кВ/м потенциал

коронирующего электрода необходимо увеличивать до 10 кВ и выше.

Удаленность траектории частицы от коронирующего электрода, характеризуемую координатой  $y_0$  по оси  $Oy$  в момент входа частицы в зону ионизации, влияет на заряд, получаемый частицей (Рисунок 6). Расчеты по формулам (10), (11) показывают, что зарядка частиц размером 0,3 мкм и 0,8 мкм, начальная координата которых по оси  $Oy$  равна 8 мм, вдвое ниже тех, которые входят в зону ионизации с координатой 2 мм.

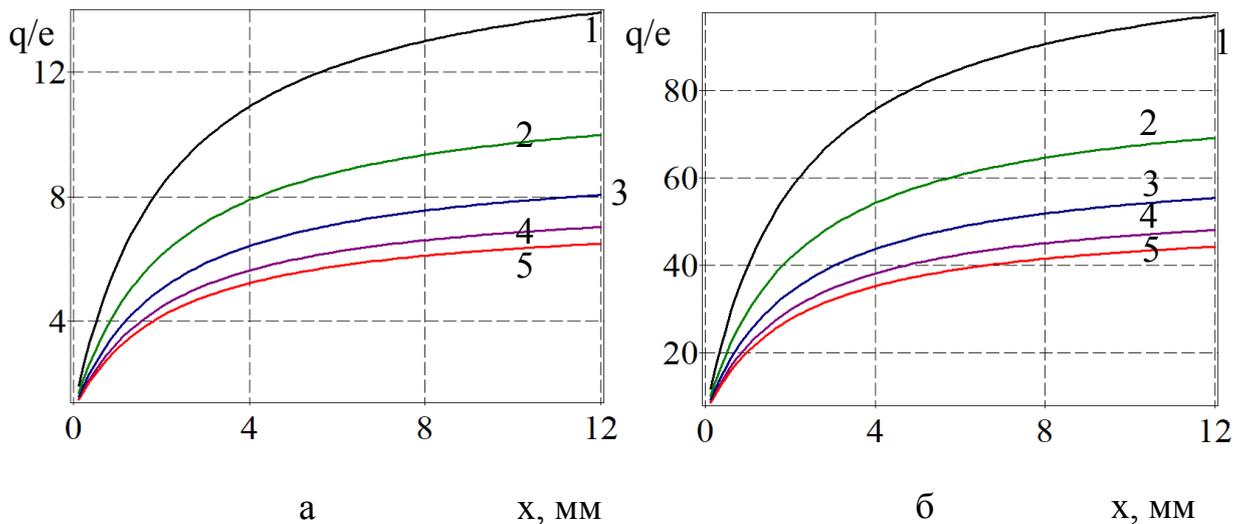


Рисунок 6. – Зависимости относительного заряда (в электронах) частицы размером 0,3 мкм (а) и 0,8 мкм (б) от пробега в зоне ионизации при исходных данных в ): и заданной начальной координате  $y_0$

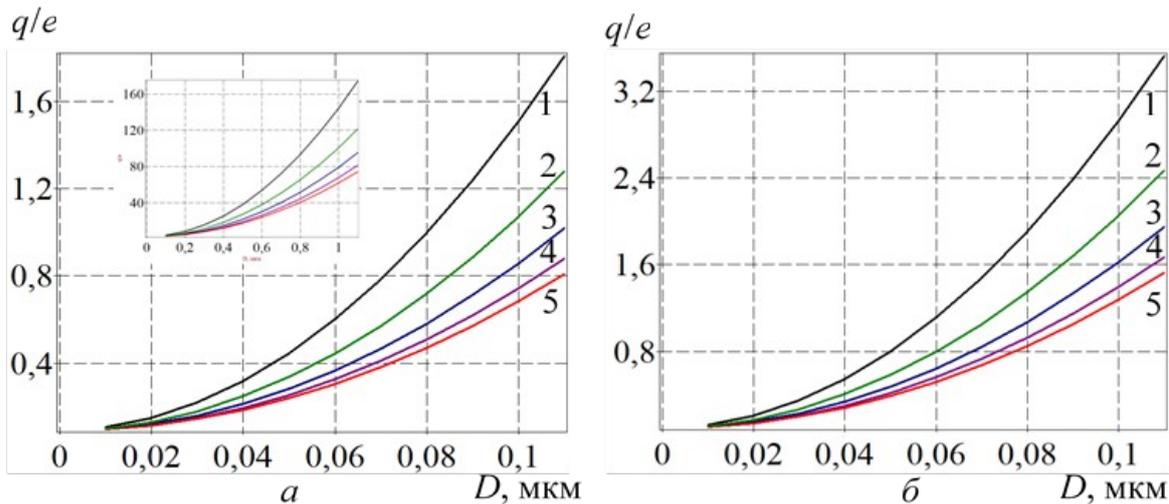
1 –  $y_0 = 2$  мм; 2 –  $y_0 = 3,5$  мм; 3 –  $y_0 = 5$  мм; 4 –  $y_0 = 6,5$  мм; 5 –  $y_0 = 8$  мм

Отметим, что при скорости воздушного потока 0,7 м/с и длине зоны ионизации 12 мм частицы получают 95% максимального заряда. Так, удлинение зоны ионизации не приведет к существенному увеличению заряда частиц. При равномерном распределении пыли по ширине окна электрофильтра около половины частиц диаметром 0,1 мкм не получают заряд от коронирующего электрода с потенциалом 6 кВ (Рисунок 7а).

Минимальный заряд получают только те частицы, начальная координата которых по оси  $Oy$  в момент входа в ионизатор не превышает 5 мм. Таким образом, можно констатировать, что рассматриваемый электростатический фильтр с данными в ):, фактически не обеспечивает

зарядку и фильтрацию более 50% частиц диаметром 0,1 мкм, поскольку они не заряжены.

Заряд частиц диаметром 0,1 мкм обеспечивается коронирующим электродом с потенциалом 10..12 кВ (Рисунок 7б).



Р  
и  
с  
у  
н  
о  
к  
7.  
—

*Зависимости относительного заряда частицы (в электронах) от диаметра частицы при потенциале коронирующего электрода 6 кВ (а) и 12 кВ (б) и заданной начальной координате  $y_0$*

1 –  $y_0 = 2$  мм; 2 –  $y_0 = 3,5$  мм; 3 –  $y_0 = 5$  мм; 4 –  $y_0 = 6,5$  мм; 5 –  $y_0 = 8$  мм

В представленном алгоритме под зарядом частицы понимается число  $q$ , не приведенное к кратному заряду электрона. То есть полагается, что и частицы с координатой  $y$ , превышающей 5 мм, получают заряд, который не превышает заряд электрона. Полагаем, что частица задерживается в зоне ионизации, если ее траектория пересекает пластину коллекторного электрода. Для определения условий задержания частицы в зоне ионизации необходимо найти траекторию ее движения.

### **Движение частиц в зоне ионизации**

Определим теоретические условия задержания и осаждения частиц на пластине коллекторного электрода в зоне ионизации. Будем полагать, что частица задерживается пластиной коллекторного электрода, если траектория частицы пересекает пластину. Траектории частиц определялись из системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14), решения которых получены численным методом Рунге-Кутты [15], [19], [20]. Условия задержания частицы с координатами  $x, y$  в какой-то момент имеют вид:  $y \geq a_1$ ;  $x \leq L_1$ . Решения показали, что после входа в зону ионизации частицы отклоняются от прямолинейной траектории (Рисунок 8а).

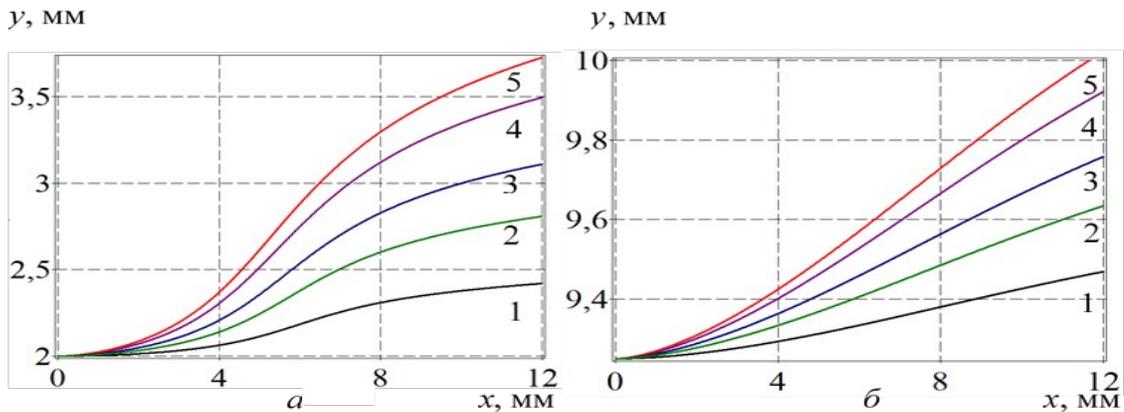


Рисунок 8. – Связь между координатами  $x, y$  движущихся частиц разных диаметров  $D$  при входе в зону ионизации в точке с начальной координатой  $y_0$ , равной 2 мм (а) и 9,25 мм (б)

1 –  $D = 0,1$  мкм; 2 –  $D = 0,3$  мкм; 3 –  $D = 0,5$  мкм; 4 –  $D = 0,8$  мкм; 5 –  $D = 1$  мкм

Найдем показатель эффективности для частиц диаметром 1 мкм, 0,8 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм без учета зон осаждения. Частицы диаметром 1 мкм, входящие в зону ионизации на расстоянии 0,75 мм от коллекторной пластины и менее, сталкиваются с пластиной и задерживаются (Рисунок 8б). Таким образом, 7,5 % частиц данного размера задерживаются в зоне ионизации. Аналогично, варьируя начальной координатой  $y_0$ , можно рассчитать массовые доли задерживаемых на коллекторной пластине частиц диаметром 0,8 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм. Они равны соответственно 6,5 %, 5 % и 4 % (Рисунок 9).

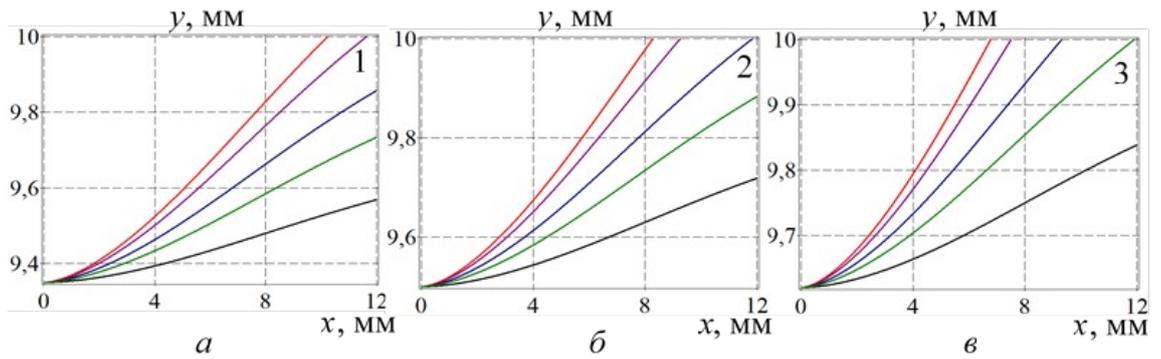


Рисунок 9. – Связь между координатами  $x$ ,  $y$  движущихся частиц разных диаметров  $D$  при входе в зону ионизации в точке с начальной координатой  $y_0$ , равной 9.35 мм (а), 9.5 мм (б) и 9.6 мм (в)  
 1 –  $D = 0,8$  мкм; 2 –  $D = 0,5$  мкм; 3 –  $D = 0,3$  мкм

### Напряженность электрического поля в зоне осаждения и связь длины пластин электродов с напряженностью

Электрическое поле между электродами зоны осаждения, обеспечивающее дрейф частиц к коллекторным электродам, неоднородно (Рисунок 10).

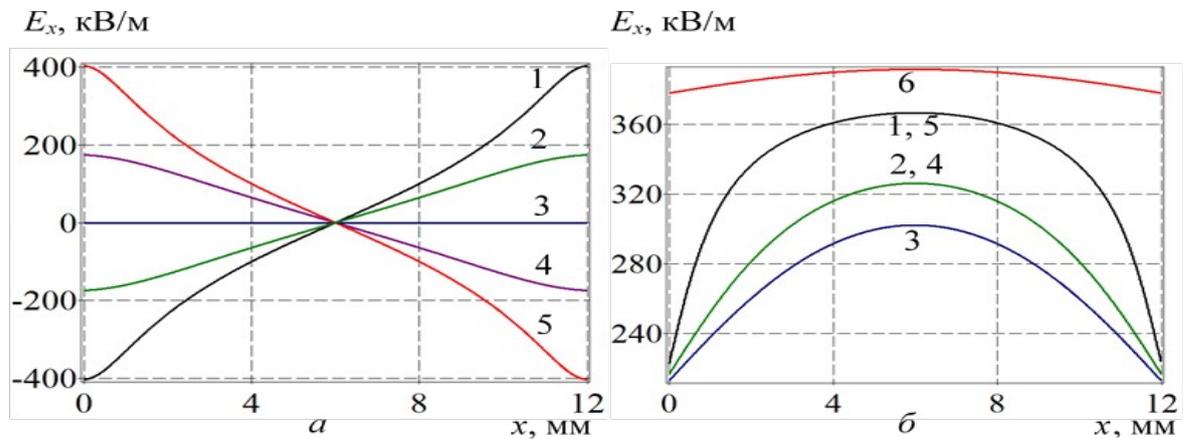


Рисунок 10. – Координаты напряженности электрического поля  $E_x$  (а) и  $E_y$  (б) от электрода с потенциалом 4 кВ в точках сечения зоны осаждения с координатами  $x$   
 1 –  $y = 1$  мм; 2 –  $y = 3$  мм; 3 –  $y = 6$  мм; 4 –  $y = 9$  мм; 5 –  $y = 11$  мм; 6 –  $y = 0$  мм

Однородность напряженности в зоне осаждения значительно повышается с увеличением длины пластин электродов (Рисунок 11).

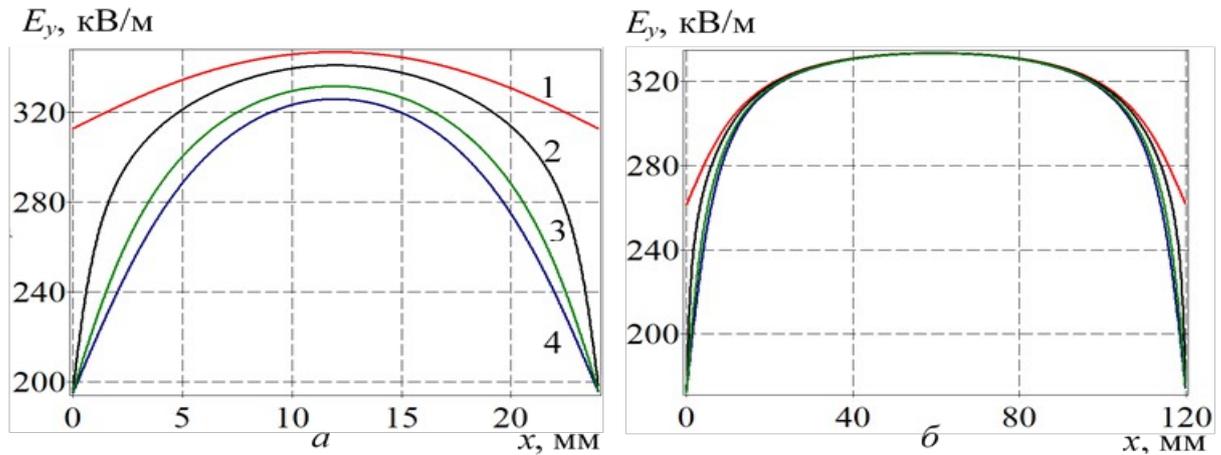


Рисунок 11. – Координата напряженности электрического поля  $E_y$  от электрода с потенциалом 4 кВ в точках зоны осаждения с координатами  $x$ ,  $y$  при длине пластины 24 мм (а) и 120 мм (б)  
 1 –  $y = 0$  мм; 2 –  $y = 1$  мм,  $y = 11$  мм; 3 –  $y = 3$  мм;  $y = 9$  мм, 4 –  $y = 6$  мм

Можно видеть, что с увеличением длины пластин электродов напряженность на средней линии между пластинами увеличивается, а на удаленных от средних линий уменьшается. Отсюда можно заключить, что с уменьшением длины пластин сила Кулона, обеспечивающая притяжение частицы к коллекторному электроду, возрастает. Малая длина пластины коллекторного электрода может оказаться недостаточной для того, чтобы за время движения частицы между электродами ее траектория пересекла границу пластины. Обеспечить столкновение частицы с пластиной можно либо за счет удлинения пластины, либо за счет добавления зоны осаждения с пластинами той же длины и отстоящей от предыдущей зоны на некотором расстоянии. Второе решение обеспечивает более эффективное удержание частиц на коллекторном электроде при сохранении заряда.

### Исследование скорости воздушного потока и количества зон осаждения

В соответствии с формулой (32) показатель эффективность очистки воздуха зависит от очистки при однократном проходе воздуха через фильтр и от отношения производительности вентилятора к скорости воздухообмена.

Оценим длину зоны осаждения, обеспечивающую улавливание частицы при однократном проходе воздуха. Рассмотрим частицу диаметром 0,5 мкм. При входе в зону осаждения на расстоянии 4 мм от коллекторной пластины ее скорость дрейфа варьирует от 0,04 до 0,06 м/с (Рисунок 12).

Расчеты показали, что скорость частицы вдоль пластин электродов близка к скорости воздушного потока 0.7 м/с, и траектория частицы пересечет коллекторную пластину, если длина последней составит 55 мм. Для улавливания частиц, входящих в зону осаждения на расстоянии 10 мм от заряженной пластины ( $y_0 = 2$  мм), длину коллекторной пластины необходимо увеличить до 70 мм.

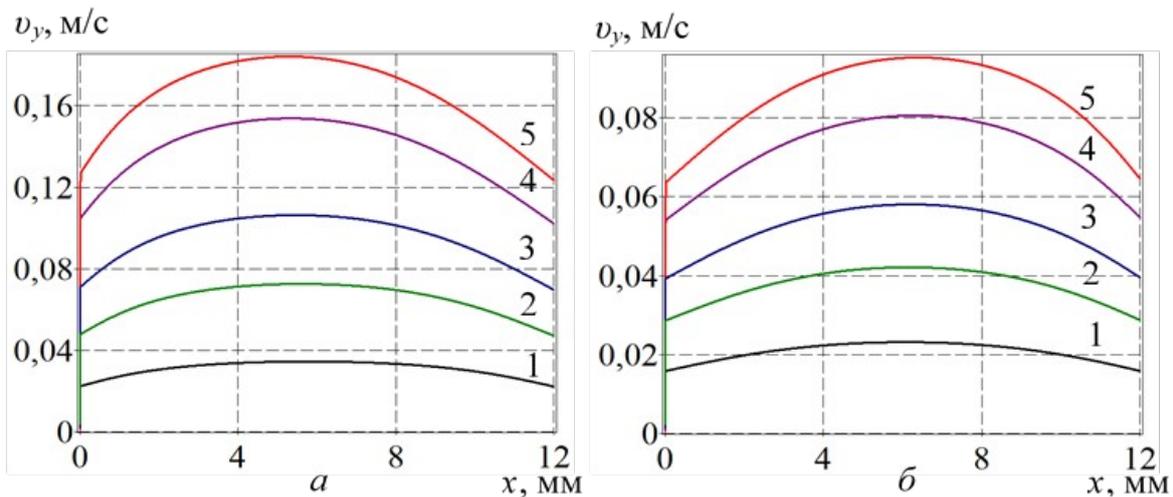


Рисунок 12. – Зависимость координаты скорости частицы диаметром  $D$  вдоль оси  $Oy$  от координаты  $x$  в зоне осаждения при входе на расстоянии от коллекторной пластины 10 мм (а) и 4 мм (б)

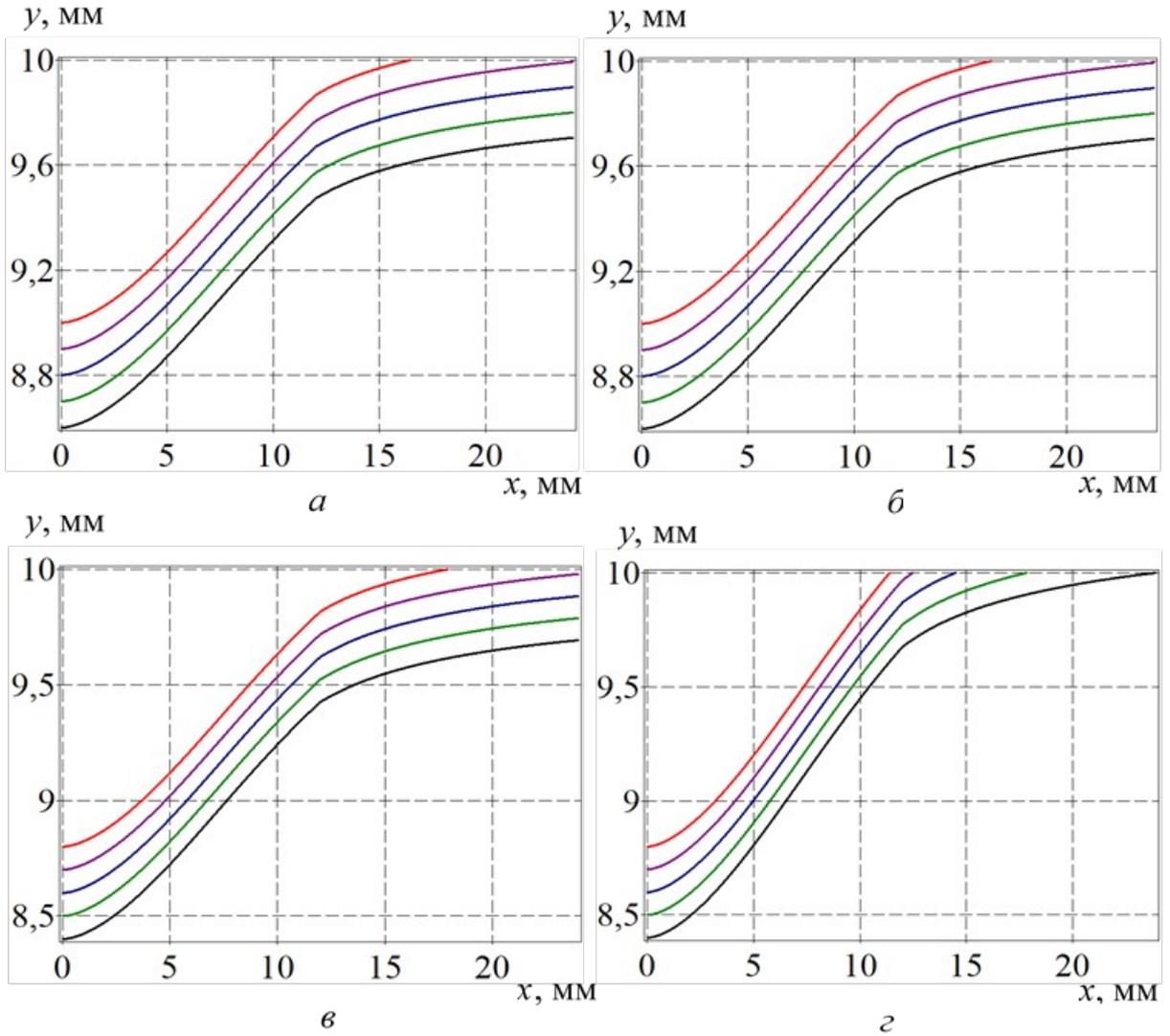
1 –  $D = 0,1$  мкм; 2 –  $D = 0,3$  мкм; 3 –  $D = 0,5$  мкм; 4 –  $D = 0,8$  мкм; 5 –  $D = 1$  мкм

Учитывая, что при движении в ионизаторе частица приблизится к коллекторной пластине на 1 мм и более и  $y_{0D} = y_0 - 1$ , показатель эффективности, рассчитанный по формуле (30), при длине пластины 70 мм составит более 90%:

$$P_D = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1} = \frac{10 - 1}{10} = 0,9;$$

Таким образом, предварительная оценка показывает, что одной зоны осаждения с пластинами длиной 12 мм для улавливания частиц диаметром 0,5 мкм при однократном проходе воздуха через электрофильтр недостаточно.

Найдем расчетные по формуле (30) показатели эффективности очистки воздуха на основе анализа траекторий движения частиц диаметром 0,1 мкм, 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм за один проход воздуха через электрофильтр. Будем определять такую траекторию частицы, которая пересекает дальний край коллекторной пластины зоны осаждения и фиксировать при этом начальную координату  $y_0$  частицы при входе в секцию зоны ионизации. Можно доказать, что все частицы данного размера, входящие в зону ионизации с начальной координатой, превышающей  $y_0$ , будут улавливаться коллекторной пластиной. Поиск величины  $y_0$  расчетным путем требует значительного машинного времени. Поэтому минимальную начальную координату  $y_0$  будем оценивать визуально по графикам траекторий, определяя ту, которая пересекает дальний край коллекторного электрода. На рисунках 13...16 показаны траектории частиц, позволяющие оценить минимальную начальную координату  $y_0$ .



*Рисунок 13. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 8,4 до 8,8 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,4 до 8,8 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в одной зоне осаждения длиной 12 мм при скорости воздуха 0,7 м/с*

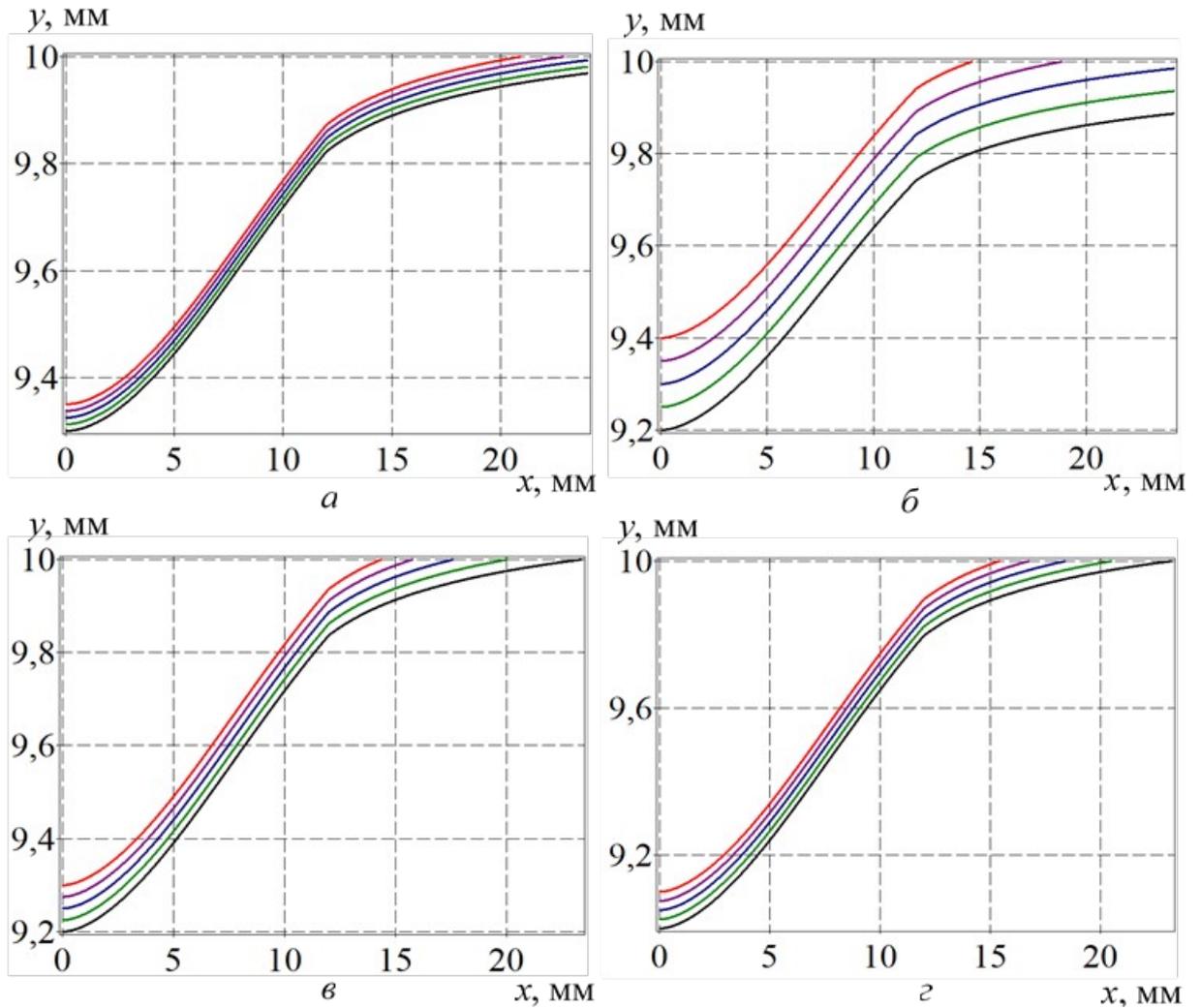


Рисунок 14. – Траектории частицы диаметром 0.1 мкм с начальными координатами от 9.3 до 9.35 мм (а), диаметром 0.3 мкм с начальными координатами от 9.2 до 9.4 мм (б), диаметром 0.5 мкм с начальными координатами от 9.2 до 9.3 мм (в), диаметром 0.8 мкм с начальными координатами от 9.0 до 9.1 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в одной зоне осаждения длиной 12 мм при скорости воздуха 1 м/с

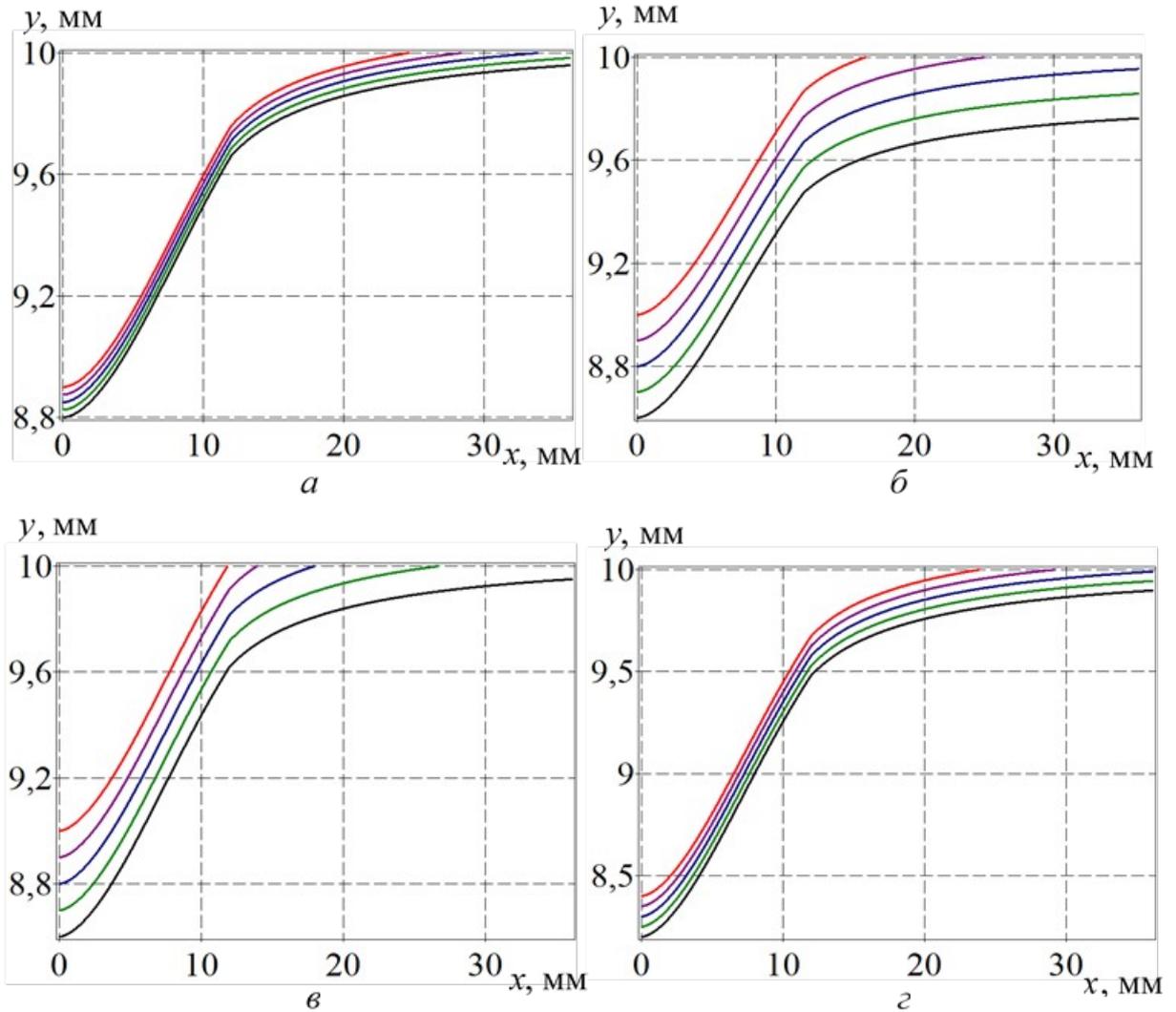
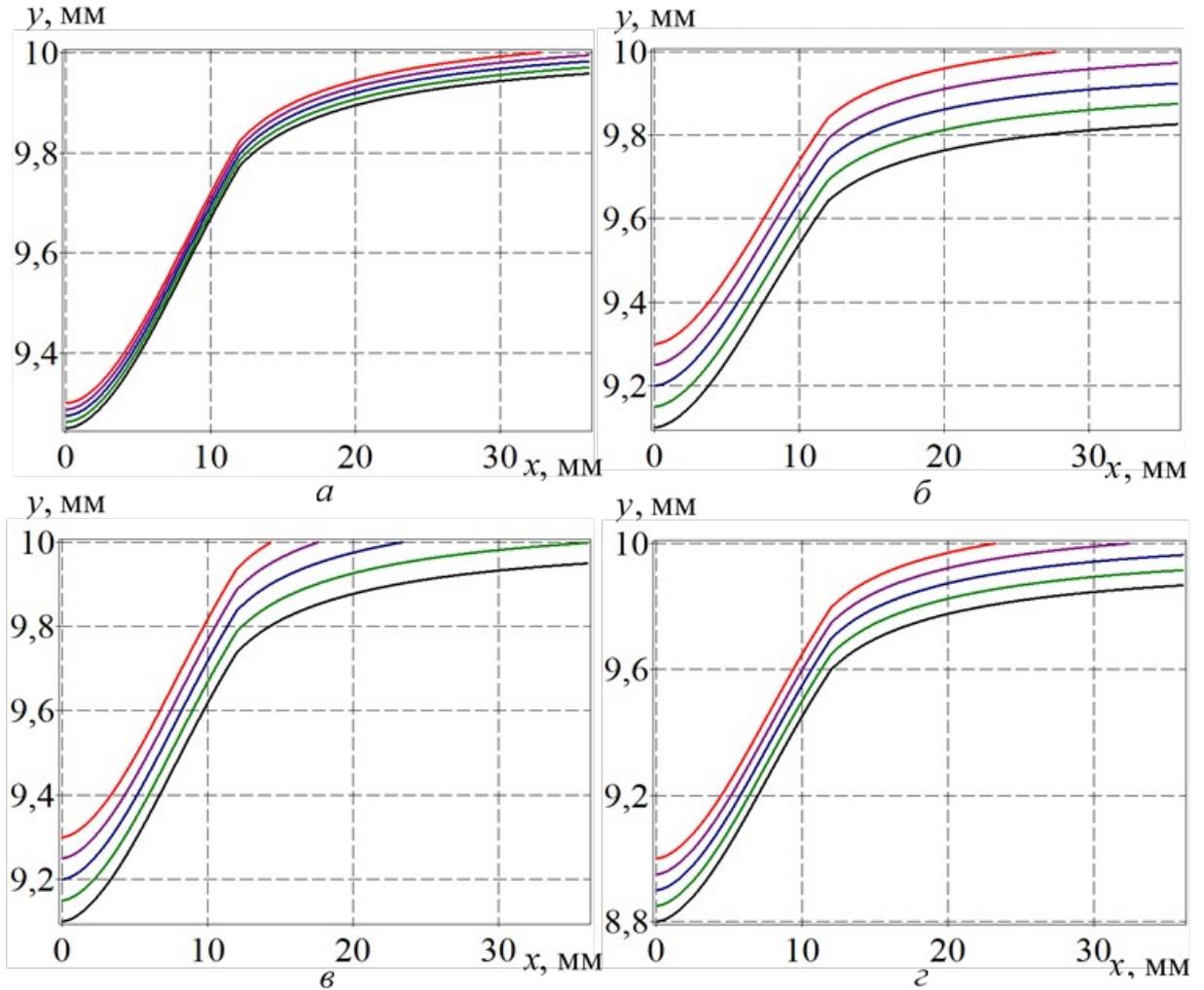


Рисунок 15. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 8,8 до 8,9 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,2 до 8,4 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в двух зонах осаднения длиной 12 мм каждая при скорости воздуха 0,7 м/с



*Рисунок 16. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 9,25 до 9,3 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 9,0 до 9,2 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 9,1 до 9,3 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,8 до 9,0 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в двух зонах осаждения длиной 12 мм каждая при скорости воздуха 1 м/с*

Более 80 % частиц диаметром от 0,1 до 0,8 мкм не улавливаются при однократном проходе воздуха через электрофильтр со скоростью 0,7 м/с и выше и длине коллекторных пластин в зоне осаждения 12 мм (Таблица 2).

Таблица 2.

**Расчетные значения показателя  $P_D$  эффективности по данным траекторий движения частицы на рисунках 13...16**

Число зон осаждения $n_L$	Скорость воздуха $v_{ax}$ , м/с	Диаметр частицы $D$ , мкм	Минимальная начальная координата $y_{0D}$ , мм	Показатель эффективности очистки воздуха $P_D$
1	0,7	0,1	8,9	0,11
		0,3	8,9	0,11
		0,5	8,7	0,13
		0,8	8,4	0,16
	1,0	0,1	9,3	0,07
		0,3	9,3	0,07
		0,5	9,2	0,08
		0,8	9,1	0,09
2	0,7	0,1	8,9	0,11
		0,3	8,9	0,11
		0,5	8,7	0,13
		0,8	8,3	0,17
	1,0	0,1	9,3	0,07
		0,3	9,25	0,075
		0,5	9,15	0,085
		0,8	8,9	0,11

Добавление второй зоны осаждения практически не влияет на улавливание мелких частиц диаметром до 0,5 мкм и повышает эффективность улавливания частиц диаметром 0,8 мкм на 1..2 % (Таблица 2).

Повышение скорости воздушного потока, создаваемого вентилятором, с 0,7 м/с до 1 м/с приводит к снижению показателя  $P_D$  эффективности очистки воздуха при однократном проходе на 4..6 % (Таблица 2).

**Оценка связи между показателем эффективности очистки воздуха и временем работы электрофильтра**

Формула (32) позволяет оценить время  $T$  очистки воздуха по частицам заданного диаметра при малом воздухообмене с внешними объектами, если задан требуемый показатель  $P_{DT}$  эффективности очистки воздуха и определен показатель  $P_D$  эффективности при однократном проходе частиц.

На рисунке 17 представлены номограммы, позволяющие оценить относительное время  $T/T_1$  очистки воздуха от пыли по заданному показателю  $P_{DT}$  эффективности и определенному показателю  $P_D$  эффективности при однократном проходе воздуха через электрофильтр.

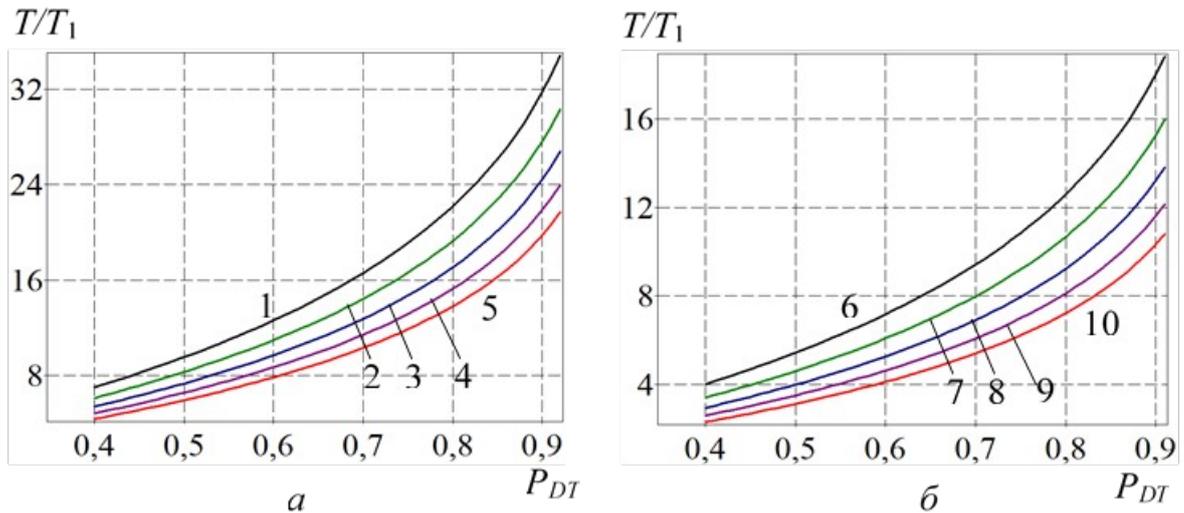


Рисунок 17. – Зависимости отношения  $T/T_1$  от показателя  $P_{DT}$  при заданных значениях показателя  $P_D$  в пределах от 0,07 до 0,11 (а) и от 0,12 до 0,20 (б)

1 –  $P_D = 0,07$ ; 2 –  $P_D = 0,08$ ; 3 –  $P_D = 0,09$ ; 4 –  $P_D = 0,10$ ; 5 –  $P_D = 0,11$ ; 6 –  $P_D = 0,12$ ;  
7 –  $P_D = 0,14$ ; 8 –  $P_D = 0,16$ ; 9 –  $P_D = 0,18$ ; 10 –  $P_D = 0,20$

Показатель  $P_D$  электрофильтра с одной зоной осаждения при скорости воздушного потока 0,7 м/с для частиц диаметром 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм равен соответственно 0,11, 0,13 и 0,16 (Таблица 2). Относительное время  $T/T_1$ , требуемое для улавливания 80% этих частиц, соответственно равно примерно 13, 11 и 7 (Рисунок 17). При скорости воздушного потока 1 м/с показатели  $P_D$  уменьшаются до 0,075, 0,085, 0,11, а относительное время увеличивается до 20, 17 и 13 соответственно. Таким образом, при увеличении скорости воздушного потока на 43 % и вместе с этим снижением времени  $T_1$  на 43%, относительное время  $T/T_1$  для обеспечения того же качества очистки увеличилось более чем на 50%, то есть общее время возросло. Добавление второй зоны осаждения практически не изменяет относительное время  $T/T_1$ .

Таким образом, меньшая скорость воздушного потока 0,7 м/с обеспечивает меньшее время улавливания 80% частиц диаметром 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм, чем скорость 1 м/с; и две зоны осаждения не имеют преимуществ по времени очистки перед одной зоной осаждения.

Можно видеть, что с увеличением показателя эффективности относительное время и время очистки увеличиваются, при этом быстрота увеличения относительного времени очистки превосходит быстроту увеличения показателя эффективности.

Отметим, что при многократном воздухообмене показатель  $P_D$  возрастает с каждым проходом, и время, за которое показатель  $P_{DT}$  достигнет заданного значения, будет меньше расчетного. Это объясняется тем, что частицы пыли, не уловленные на втором и дальнейшем проходах, имеют больший заряд, так как при первом проходе их траектории располагались ближе к коронирующему электроду.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель движения частицы в зонах ионизации и осаждения позволяет определять показатель эффективности очистки воздуха по частицам заданного диаметра при однократном проходе воздуха через электрофильтр.

2. Предложенный показатель эффективности очистки воздуха по частицам заданного диаметра устанавливает связь между долей частиц в воздухе, показателем эффективности при однократном проходе воздуха через фильтр и временем очистки.

3. Потенциал коронирующего электрода от 10 до 11 кВ обеспечивает максимальную напряженность в зоне ионизации, не превышающую напряженности пробоя. При этом средняя напряженность электрического поля в зоне ионизации изменяется от 400 до 1000 кВ/м.

4. Скорость воздушного потока 0.7 м/с имеет преимущество перед скоростью 1 м/с, обеспечивая меньшее время очистки воздуха до состояния, в котором доли частиц диаметром 0.3 мкм, 0.5 мкм и 0.8 мкм составляют 20% соответственно; такое же преимущество имеет одна зона осаждения перед двумя зонами.

5. Построенные номограммы зависимости относительного времени очистки от показателя эффективности позволяют рассчитать время очистки и доказывают, что с увеличением показателя эффективности относительное время и время очистки увеличиваются, при этом быстрота увеличения относительного времени очистки превосходит быстроту увеличения показателя эффективности.

## **Концепция сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией (Виноградов А.В., Виноградова А.В., Лансберг А.А.)**

Сельские электрические сети 0,4 кВ имеют, как правило, радиальную, или магистральную конфигурацию с питанием от одного источника электроснабжения. Проведённый на примере электрических сетей филиалов ПАО «Россети» (рассмотрены 20 регионов ЦФО) анализ длин линий электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ показал, что наибольшая средняя протяженность ЛЭП 0,4 кВ сельских электрических сетей характерна для филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» и составляет 985 метров, а наименьшая – для филиала «Кировэнерго» (737 метров). Среднее значение по регионам ЦФО – 787 метров [21]. Что касается Орёлэнерго, то 74% ЛЭП 0,4 кВ находятся в эксплуатации уже более 35 лет.

Завышенная протяжённость, совместно с износом сетей приводит к тому, что поток отказов в них доходит до 37 год<sup>-1</sup> на 100 км, а время восстановления – до 8 ч. Ущерб от недоотпуска электроэнергии составляют от 30 до 300 руб./кВт·ч и более [22]. Из-за завышенной длины ЛЭП 0,4 кВ ухудшается не только надёжность электроснабжения, но и растут потери энергии [23], снижается качество передаваемой электрической энергии [24]. Например, в Орловской области за 2021 год потребители обращались по поводу искажений качества электроэнергии 1076 раз, а за период с 2018 по 2021 годы – 5215 раз [21].

Влияет протяжённость и состояние сети и на безопасность эксплуатации. Установленные в начале ЛЭП защитные аппараты не чувствуют удалённые однофазные короткие замыкания. Это влечёт за собой опасность поражения электрическим током людей и животных, риск возникновения пожаров. Низкая надёжность сети и большое число плановых отключений для её обслуживания приводит к росту количества покупаемых населением бензиновых (от 154,6 тыс. шт. в 2018 году до 201,2 тыс. шт. в

2021 году согласно исследованиям НИУ ВШЭ) и дизельных генераторов, которые, при неправильном подключении к сети, приводят к несанкционированной подаче напряжения в неё. Растёт число объектов распределённой генерации, разрешено подключение в уведомительном порядке частных генерирующих установок мощностью до 15 кВт. Это может привести к непредсказуемости графиков нагрузки энергосистемы, сложности управления сетями разного класса напряжения, в том числе и 0,4 кВ. Внедрение средств интеллектуализации сетей 0,4 кВ затрудняется существующей конфигурацией сети. Таким образом, концепции построения сельских сетей 0,4 кВ, принятые в 50-70-х годах прошлого века устарели и требуется создание новых, учитывающих тенденции развития всего электросетевого комплекса.

Цель работы заключается в разработке концепции сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией, позволяющей повысить надёжность электроснабжения сельских потребителей и качество поставляемой им электроэнергии.

В качестве материалов исследования использованы статистические данные по состоянию электрических сетей 0,4 кВ для разных регионов ЦФО, их аварийности, конфигурации. Также материалами исследования послужили авторские разработки средств секционирования и резервирования электрических сетей 0,4 кВ, мониторинга параметров режимов их работы.

Определения конфигурации сети, её параметров приведены в [22]. Под конфигурацией понимается характеристика электрической сети по взаимному расположению на схеме и в пространстве входящих в её состав электроустановок, электрооборудования, а также по соотношению между собой их технических характеристик, а под управлением ею – процесс целенаправленного воздействия (персонала или средств защиты, автоматики) на оборудование сети для достижения необходимой конфигурации.

Параметры конфигурации – это схема сети, расположение её элементов, характеристики электрооборудования, параметры режимов работы [22].

Предлагаемая концепция основывается на следующих принципах управления конфигурацией, подробно раскрытых в [22]:

- наблюдаемость, то есть мониторинг параметров режимов работы и состояния оборудования сети;
- управляемость, то есть возможность управления, в том числе автоматического и дистанционного, оборудованием сети;
- гибкость конфигурации, предполагающая способность ручной, автоматической или дистанционной коррекции конфигурации сети;
- сегментируемость, то есть возможность выделения участков сети с распределённой генерацией, которые в зависимости от ситуации могут питаться от своих источников генерации, или от централизованной сети, или от них совместно;
- интеллектуализация оборудования, предполагающая оснащение оборудования сети и потребителей умными системами мониторинга, контроля, учёта и управления;
- интегрированность в экономику, то есть осуществление, за счёт технических средств, экономических механизмов поддержания надежности электроснабжения, качества электроэнергии, обеспечения нормированных сроков технологических присоединений [22].

Предлагаемая концепция, учитывающая приведённые принципы, заключается в следующем. Электрические сети 0,4 кВ должны обеспечивать выполнение принципов управления их конфигурацией за счёт оснащения средствами мониторинга параметров режимов работы и состояния оборудования, средствами автоматизации и защиты, средствами секционирования и резервирования, средствами распределённой автоматизации, средствами умного учёта. Оборудование сети должно оснащаться соответствующими программными средствами, средствами связи, позволяющими объединять их в единые системы мониторинга, учёта, контроля и управления, системы диспетчеризации сети.

Ключевыми техническими средствами, позволяющими осуществлять

концепцию, являются устройства секционирования и резервирования электрической сети 0,4 кВ, в частности, пункты секционирования с функцией автоматического включения резерва (СПАВР), мультиконтактные коммутационные системы (МКС) разных типов, универсальные микроконтроллерные блоки управления коммутационными аппаратами, устройства мониторинга, вводно-учётно-распределительные устройства (ВУРУ) и другие средства, в том числе приведённые в [22], а также в патентах №:2769110, 2726856, 2726644, 2726855, 2726852, 2728768, 2731874, 2732182, 2733217, 2734110, 2736542, 2737965, 2739065, 2739064, 2740075, 2739365, 2745155, 2755156, 2755654, 2755655, 2755658, 2755661, 2755659, 2755528, 2755656, 2755942, 2761860, 2767501, 2767519, 2767479, 2768787, 2769456, 2767502, 2767504, 2767517, 2764280, 2769720, 2769110, 2778135, - и других.

На рис. 18 показана схема электрической сети с управляемой конфигурацией.

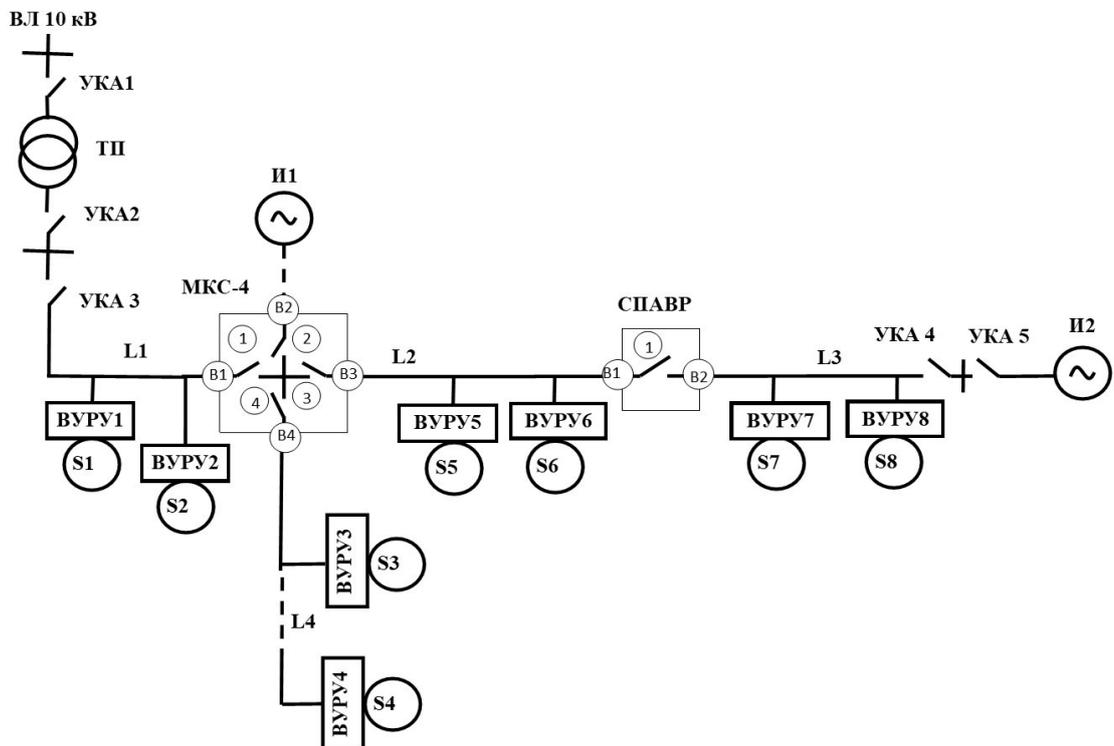


Рисунок 18. – Вариант схемы электрической сети с управляемой конфигурацией

Схема на рисунке 18 содержит: воздушную линию электропередачи ВЛ

10 кВ, трансформаторную подстанцию ТП, управляемые коммутационные аппараты УКА1-УКА4, ВУРУ1-8, МКС с четырьмя выводами МКС-4, СПАВР, потребителей S1-8, источники генерации И1 и И2.

Управление конфигурацией рассматриваемой электрической сети базируется на применении систем контроля, мониторинга, учёта и управления. В качестве исполнительных элементов систем управления конфигурацией электрической сети применяются УКА, МКС, СПАВР и средства управления генерирующих установок и ТП.

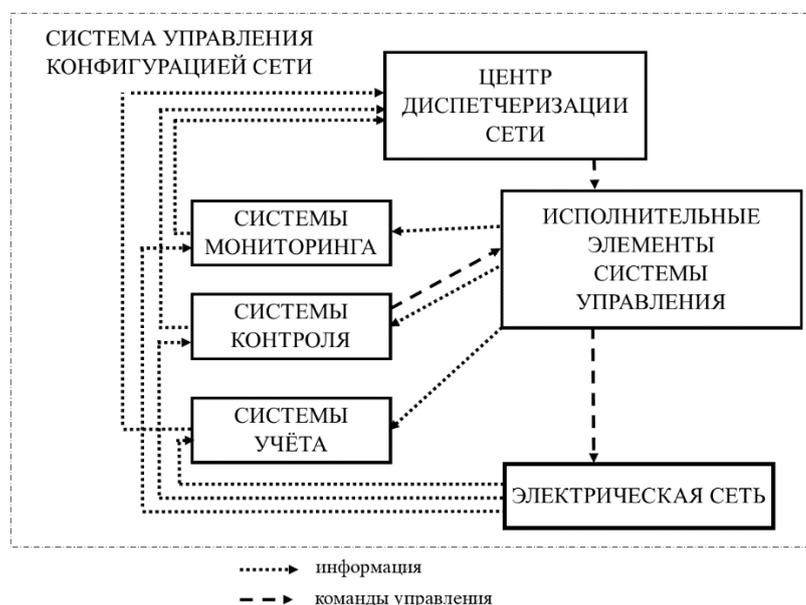
Наличие в сети УКА, МКС-4, ВУРУ и СПАВР позволяет реализовывать принципы управления конфигурацией сети. Это достигается отключением и включением соответствующих контактных групп этих устройств для обеспечения гибкости конфигурации, сегментирования сети, управления нагрузкой источников электроснабжения. За счёт указанных средств линия 0,4 кВ может быть сегментирована на участки L1-L4, получающие питание от одного, или нескольких источников электроснабжения. Имеется возможность переключения этих участков ЛЭП на питание от одного источника к другому. Источник И1, например, может быть мобильным и подключаться к сети для питания её отдельных участков при проведении ремонтных работ на других участках.

Устройства МКС, ВУРУ, СПАВР, УКА оснащаются микроконтроллерными блоками управления, осуществляющими функции мониторинга, контроля, технического учёта (как потребления электроэнергии, так и других параметров), управления. Они, совместно со средствами связи, обеспечивают интеграцию устройств в систему диспетчеризации сети. В качестве каналов связи могут использоваться радиоканалы, GSM, LORA-WAN и другие.

Перспективно применение для передачи информации самонесущих изолированных проводов (СИП) с интегрированным оптическим волокном (ОВ). В частности, на рынке появился СИП-2 с ОВ, который представляет собой три основные токопроводящие жилы из алюминия, нулевую несущую

жилу из алюминиевого сплава и оптический кабель, свитые в один жгут. Волоконно-оптический кабель выполнен в виде скрутки оптических модулей вокруг стеклопластикового прутка и может содержать в себе от 2 до 144 оптических волокон для передачи информации [25]. Применение СИП-2 с ОВ позволяет значительно сократить время передачи информации и организовать онлайн диспетчеризацию сети, построить эффективные средства защиты сети от аварийных режимов.

Система диспетчеризации, управления конфигурацией использует получаемые от устройств данные и выдаёт команды управления, предоставляет необходимую информацию персоналу, управляющему сетью, то есть обеспечивает выполнение принципов управления конфигурацией сети. На рисунке 19 показана структурная схема системы управления конфигурацией электрической сети с учётом включения в неё систем мониторинга, контроля, учёта и управления, реализованных на приведённых выше устройствах.



*Рисунок 19. – Структурная схема системы управления конфигурацией*

Центр диспетчеризации сети (ЦДС) включает в себя блок управления сетью (БУС), кроме того, средства отображения информации о режимах работы сети и состоянии оборудования, средства приёма и передачи данных, персонал, контролирующей сеть и управляющий ею (диспетчеры сети) и их

автоматизированные рабочие места, построенные, например, как показано в [26]. Предполагается в основном автоматическое управление сетью с помощью БУС, а при необходимости – ручное управление, осуществляемое диспетчером, отдающим команды на переключения в сети, на управление оборудованием, регулирующим параметры режима работы сети. При этом задаётся приоритет автоматического и ручного управления на различные операции по управлению сетью. Диспетчер также может перевести управление полностью в ручной режим.

Системы контроля контролируют параметры режимов работы сети в заданных точках сети (как правило, в точках установки оборудования сети), состояние исполнительных элементов, реагируя на значения параметров, при которых необходимо осуществлять управление конфигурацией, например, на появление тока короткого замыкания на определённом участке сети, повреждение оборудования, исчезновение напряжения, изменение перетоков мощности и т.п. При значении параметра, соответствующего заданному, системы контроля выдают сигнал, например, на отключение одного коммутационного аппарата, включение другого. Также системы контроля передают информацию в ЦДС, где принимается решение о других переключениях в сети, необходимых в сложившейся ситуации.

Системы мониторинга осуществляют мониторинг параметров режимов работы в сети, показателей качества электроэнергии (ПКЭ), состояния оборудования, передавая в ЦДС соответствующую информацию. На основе полученных от систем мониторинга данных определяется ситуация в сети, режимы её работы. Средства отображения информации показывают значения параметров режимов работы сети в контрольных точках. Исходя из этого диспетчер, или БУС принимает решение о переключениях в сети, регулировании параметров режимов работы в сети даже в том случае, когда параметры режимов работы сети не достигли заданного значения, при котором управление необходимо.

Системы учёта осуществляют учёт соответствующих параметров, в

частности, потребления электроэнергии участками сети, отдельными потребителями. При этом системы учёта конкретных параметров могут строиться с применением существующего оборудования, схем данных систем [27]. Также осуществляется учёт ресурса оборудования, например, ресурса коммутационных аппаратов, определяемого по количеству срабатываний и коммутируемому при этом значению тока. Осуществляется учёт времени отключений напряжения на участках сети и на вводах потребителей, времени отклонения ПКЭ от нормированных значений, прочих показателей. Системы учёта передают информацию в ЦДС. На основе полученных от систем учёта данных уточняется ситуация в сети, осуществляется прогнозирование. Средства отображения информации показывают значения потребляемой электроэнергии и другие параметры. Исходя из этого диспетчер, или БУС принимает решение о переключениях в сети, управлении потребителями и генерирующими установками даже если параметры режимов работы сети не достигли заданного значения, при котором управление необходимо.

ЦДС осуществляет управление оборудованием сети через исполнительные элементы управления, получающие от ЦДС команды и выполняющие их путём воздействия на оборудование сети.

Как было указано выше, сигналы управления на исполнительный элемент могут поступать как с систем контроля (СК), так и с ЦДС. При этом заранее определяется в какой ситуации сигнал должен прийти с СК, а в какой с ЦДС. Например, при коротком замыкании за СПАВР на участке L2 (при питании его от И2), или L3 (при питании его от ТП, или И1) сигнал на отключение СПАВР, а также на его автоматическое повторное включение поступит с системы контроля, встроенной в сам СПАВР. Если возникает необходимость отключения СПАВР в случае, когда в сети нет аварийного режима, но требуется выполнить изменение конфигурации сети, предположим для переключения участков сети на питание от другого источника электроснабжения, то сигнал поступит с ЦДС.

Кроме перечисленных, в концепции электрических сетей с

управляемой конфигурацией могут использоваться и другие технические средства, предназначенные для повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии. В частности, это цифровые ТП 6-10/0,4 кВ. В предлагаемой концепции ТП оборудуются следующими системами: определения мест повреждений в ЛЭП 0,4 кВ и ТП 10/0,4 кВ; регулирования параметров качества электроэнергии; автоматического регулирования напряжения; автоматизации (АВР, АЧР, АПВ); автоматического регулирования (компенсации) реактивной мощности; умного учёта электроэнергии; другие системы.

При этом в качестве управляемых коммутационных аппаратов на стороне 0,4 кВ могут применяться вакуумные контакторы, а на высокой стороне – вакуумные выключатели. В целом, согласно патентам №2740075, №2734110, это позволит обеспечить ряд положительных эксплуатационных и режимных эффектов для электросетевых компаний, например:

- дистанционный контроль напряжения в сети на конце линий 6-10 кВ с целью решения задачи по регулированию напряжения в центрах питания 35-110 кВ для создания оптимального режима работы сети и снижения потерь электроэнергии при её передаче;

- повышение наблюдаемости и управляемости сети 0,4 кВ за счёт дистанционного контроля режимов работы оборудования трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ и линий электропередачи 0,4 кВ;

- повышение электробезопасности ЛЭП 0,4 кВ, ТП 6...20/0,4 кВ, ЛЭП 6-10 кВ за счет сигнализации и блокировки несанкционированной подачи напряжения со стороны 0,4 кВ и контроля опасных факторов, согласно патентам №2740002, №2739326;

- сокращение потерь электроэнергии за счёт составления балансов по линиям 6-10 кВ и 0,4 кВ и выявления линий с повышенными потерями с последующей реализацией мероприятий по недопущению несанкционированного потребления электроэнергии;

- сокращение времени перерывов в электроснабжении потребителей за

счёт дистанционного управления оборудованием;

- сокращение времени получения информации об отключениях и оперативного реагирования за счёт применения АПВ ЛЭП 0,4 кВ;

- определение загрузки трансформатора с целью проведения мероприятий по энергосбережению, оценке возможности технологического присоединения новых потребителей к электрическим сетям;

- автоматическое отключение одной из отходящих ВЛ 0,4 кВ на ТП в случае возможной перегрузки силового трансформатора для предотвращения выхода из строя трансформатора или сокращения срока его службы.

Информация со всех указанных и перспективных систем и устройств должна передаваться в ЦДС. Вводы потребителей сельских электрических сетей должны иметь систему учета электроэнергии и ограничения потребляемой мощности, которая реализуется на основе вводно-учетно-распределительных устройств, на которые получены патенты №2739064, №2740076, №2761860.

Таким образом, реализация предлагаемой концепции сельских электрических сетей позволит обеспечить повышение надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии в сельских сетях.

Повышение качества электроэнергии будет обеспечиваться за счет предотвращения недопустимой работы электрической сети и потребителей, которые вносят искажение в параметры качества электроэнергии ввиду несоответствия режимов работы их электроприемников с договором технологического присоединения, путем производства переключений в электрической сети, а также использования в сельских электрических сетях помимо централизованного источника питания – ТП6-10/0,4 кВ, распределённых источников генерации и (или) систем накопления электрической энергии, оснащенных фильтрокомпенсирующими установками, предназначенными для снижения влияния высших гармоник в сельских сетях.

Предлагаемая концепция предполагает разработку новых типов

оборудования для её реализации. Такая работа уже проводится в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБОУ ВО Орловском ГАУ, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Это МКС разного типа, СПАВР, ВУРУ, устройства и системы мониторинга, другое оборудование, уже частично внедряемое в электрические сети. Тем не менее, ещё предстоит большая работа по доведению разработанных образцов до их широкого внедрения.

Существующая структура сельских электрических сетей не позволяет в значительной степени осуществлять их дальнейшее развитие. Завышенные протяжённости ЛЭП 0,4 кВ (средняя по ЦФО длина ЛЭП 0,4 кВ 787 м), большой процент износа оборудования (в отдельных регионах более 70% оборудования эксплуатируется более 35 лет), радиальная в большинстве конфигурация приводят к низкой надёжности электроснабжения сельских потребителей (поток отказов до 37 и более год<sup>-1</sup> на 100 км ЛЭП), необеспеченности нормативного уровня качества электроэнергии. Принятые более полувека назад концепции построения сельских электрических сетей устарели, не предполагают внедрения в сетях распределённой генерации, распределённой автоматизации, не готовы к внедрению интеллектуального оборудования и поэтому требуют замены.

Предложена концепция сельских электрических сетей, предполагающая реализацию принципов управления их конфигурацией за счёт оснащения сетей средствами мониторинга, автоматизации и защиты, секционирования и резервирования, средствами распределённой автоматизации и умного учёта. Разработан ряд образцов оборудования, необходимого для её реализации. Концепция согласуется с работой в рамках цифровой трансформации электрических сетей и позволяет повысить надёжность электроснабжения сельских потребителей и качество поставляемой электроэнергии.

## Расчет локальных электрообогревателей для молодняка (Растимешин С.А., Тихомиров Д.А., Трунов С.С.)

Для молодняка животных должны быть созданы условия теплового комфорта [28], [29]. Известно, что обоснование энергетических параметров локальных обогревательных устройств следует вести на основании уравнения теплового баланса живого организма.

В то же время обобщенная методика расчета теплообмена молодняка животных, применяя которую можно было бы провести оптимизацию средств локального обогрева в полном виде не создана.

Аналитическая оценка величины температуры помещения вне локальных обогреваемых зон. При математическом моделировании теплообмена расчетного животного с окружающей средой рационально вместо температуры воздуха  $t_a$  и радиационной температуры внутренних поверхностей ограждающих конструкций  $\tau_R$  использовать комплексный параметр - температуру помещения  $t_p$  [30]. Это позволяет осуществить контроль температуры фактически ощущаемой животным  $t_{s.p}$  [31], [32]. Величину  $t_p$  определим, как:

$$t_p = At_a + B\tau_R; \quad (33)$$

где  $A$  и  $B$  - тепловые коэффициенты, характеризующие степень теплового воздействия на животное ограждений и окружающего воздуха. При этом в соответствии с [33],

$$A = 1 - B; \quad (34)$$

Величину  $B$  принимают для свинарников 0,42, коровников 0,3.

Более точно величины  $A$  и  $B$  можно получить из тепловой характеристики животного как

$$A = \alpha_c / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (35)$$

$$B = \alpha_r / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (36)$$

где  $\alpha_c$  и  $\alpha_r$  - коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи.

Определим  $t_p$ , для животноводческого помещения с конкретными  $t_a$  и  $\tau_R$ . Рассмотрим два случая.

1. Животное стоит в идеализированной климатической камере с  $t_a^c = \tau_R^c = t_p = t_{s,p}$ .

При этом

$$\begin{aligned} Q_s^c &= Q_r^c + Q_c^c; \\ Q_r^c &= \alpha_r^c (\tau_{sur}^c - t_p) \varphi_R F_\Sigma; \\ Q_c^c &= \alpha_c^c (\tau_{sur}^c - t_p) F_\Sigma; \end{aligned} \quad (37)$$

где  $Q_s^c$ ,  $Q_r^c$  и  $Q_c^c$  - теплопотери животного: суммарные, лучистые, конвективные, Вт;  $\alpha_r^c$  и  $\alpha_c^c$  - коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>°C;  $\tau_{sur}^c$  - температура поверхности животного, °C;  $\varphi_R$  - коэффициент облученности;  $F_\Sigma$  - площадь, м<sup>2</sup>.

2. Животное стоит в помещении с  $t_a$  и  $\tau_R$ , при этом  $t_a \neq \tau_R$ .

Тогда

$$\begin{aligned} Q_s^p &= Q_r^p + Q_c^p; \\ Q_r^p &= \alpha_r^p (\tau_{sur}^p - \tau_R) \varphi_R F_\Sigma; \\ Q_c^p &= \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_\Sigma; \end{aligned} \quad (38)$$

где  $Q_s^p$ ,  $Q_r^p$ ,  $Q_c^p$ ,  $\alpha_r^p$ ,  $\alpha_c^p$ ,  $\tau_{sur}^p$  - те же зависимости, но для реального помещения.

Состояние животного одинаково и соответствует одному и тому же значению  $t_{s,p}$  (т.е.  $Q_s^c = Q_s^p$ ;  $\tau_{sur}^c = \tau_{sur}^p = \tau_{sur}$ ) и, следовательно, температурная обстановка равноценна. Тогда получим

$$t_p = \alpha_c^p t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) + \alpha_r^p \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) + [1 - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) / (\alpha_r^c + \alpha_c^c)] \tau_{sur}; \quad (37)$$

Принято допущение  $\varphi_R = 1$ .

При этом оправдано допущение

$$\alpha_c^c = \alpha_c^p = \alpha_c; \quad (40)$$

$$\alpha_r^c = \alpha_r^p = \alpha_r; \quad (41)$$

Тогда

$$t_p = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (42)$$

Результаты расчетов, выполненных, например, для овчарни, показаны в Таблица 3.

Таблица 3

**Расчетные величины тепловых коэффициентов А и В для овчарни**

Т <sub>р</sub> , °С	0	5	10	15	20	25
<b>А</b>	0,53	0,51	0,49	0,47	0,44	0,41
<b>В</b>	0,47	0,49	0,51	0,53	0,56	0,59

Оценка температуры в зонах размещения молодняка при локальном обогреве:

Если животное стоит:

Обычно применяют уравнения типа (33) в виде

$$t_{s,p} = At_a + B\tau_R + CE; \quad (38)$$

где  $C$  - коэффициент обогрева, °См<sup>2</sup>/Вт;  $E$  - тепловой поток от ИК излучателя, Вт/м<sup>2</sup>.

При этом принято пользоваться соотношением

$$C = k k_1; \quad (39)$$

где  $k \approx 1$  - опытный коэффициент;  $k_1$  - градуировочный коэффициент.

Применение коэффициента  $C=0,04$  м<sup>2</sup>°С/Вт обосновано недостаточно (а для некоторых видов животных - таких, например, как ягнята, цыплята, крольчата и др., такие исследования к настоящему времени практически отсутствуют).

В связи с этим  $C$  требует уточнения. С этой целью представляет интерес аналитическое определение  $k_1$  как функции нескольких переменных и сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными.

В опытах, описанных в [34], для измерения величины  $E$  был использован плоский термоэлемент конструкции ФГУП ВНИИТВЧ,

представляющий собой медь-константановую термопару диаметром 0,5 мм, припаянную снизу на зачерненную медную фольгу (квадрат  $50 \times 50$  мм толщиной 0,5 мм). При измерении  $E$  термоэлемент был расположен в воздухе под инфракрасной лампой мощностью 250 Вт на уровне, соответствующем положению облучаемой поверхности тела животного. Измерения были проведены при комнатной температуре в условиях естественной конвекции воздуха.

Для определения  $k_1$  рассмотрим тепловой баланс указанной пластины (термоэлемента) при равномерном инфракрасном нагреве. Составляющие теплового баланса пластины показаны на рисунке 20.

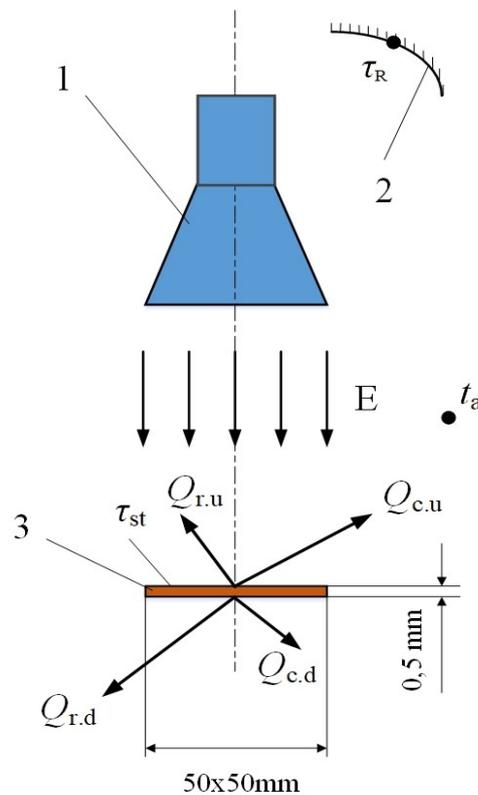


Рисунок 20. – Расчетная схема теплового баланса нагреваемого объекта  
1- источник ИК излучения; 2- внутренняя поверхность ограждающих конструкций помещения (фрагмент); 3- нагреваемая пластина

Примем, что термоэлемент, имеющий вид плоской металлической пластины площадью  $F=0,025$  м<sup>2</sup> с пренебрежимо малой толщиной, имеет в установившемся режиме температуру  $\tau_{st}$ , °С, одинаковую по всему его объему. Теплоотдачей с торцов пластины пренебрегаем. Пластина

облучается с одной (верхней) стороны, а отвод теплоты в окружающую среду происходит с двух сторон (то есть теплоотдающая поверхность вдвое больше тепловоспринимающей). С учетом этого уравнение теплового баланса пластины уравнение имеет вид

$$aEF = Q_{r.u} + Q_{c.u} + Q_{r.d} + Q_{c.d}; \quad (40)$$

где  $a=1$  - коэффициент восприятия инфракрасного излучения зачерненной пластиной;  $Q_{r.u}$ ,  $Q_{c.u}$ ,  $Q_{r.d}$ ,  $Q_{c.d}$  - лучистая и конвективная теплоотдачи с верхней и нижней поверхности рассматриваемой пластины соответственно, Вт [5].

$$\begin{aligned} Q_{r.d} = Q_{r.u} &= \varepsilon_{pl} C_o [0,81 + 0,005(\tau_{st} + \tau_R)] \times (\tau_{st} - \tau_R) F; \\ Q_{c.u} &= 2,17(\tau_{st} - t_a + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3} (\tau_{st} - t_a) F; \\ Q_{c.d} &= 1,16(\tau_{st} - t_a + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3} (\tau_{st} - t_a) F; \end{aligned} \quad (46)$$

где  $\varepsilon_{pl} \approx 1$  - приведенный коэффициент излучения поверхности облучаемого тела и внутренних поверхностей ограждающих конструкций в помещении;  $l_{pl} = 0,05$  м - характерный размер поверхности пластины.

Обозначим

$$\Delta\tau_1 = ak_1 E; \quad (41)$$

где  $\Delta\tau_1$  - приращение температуры пластины от действия инфракрасного излучения, °С.

Для упрощения расчетов примем

$$\tau_R = t_a; \quad (42)$$

Тогда

$$\tau_{st} - \tau_R = \tau_{st} - t_a = \Delta\tau_1; \quad (49)$$

Решая совместно (45) ... (37) с учетом (49), имеем выражение

$$k_1 = [2\varepsilon_{pl} C_o (0,81 + 0,005\Delta\tau_1) + 3,33(\Delta\tau_1 + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3}]^{-1}; \quad (43)$$

На рисунке 21 показана полученная в результате расчетов по (50) зависимость  $k_1 = f(\Delta\tau_1; V_a)$ .

Для реально возможных значений  $\Delta\tau_1$  и  $V_b$  в условиях животноводческих и птицеводческих помещений с молодняком получена область между кривыми, соответствующими  $V_a=0$  и  $V_a=0,2$  м/с. Здесь же приведена прямая, соответствующая  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт (усредненные экспериментальные данные).

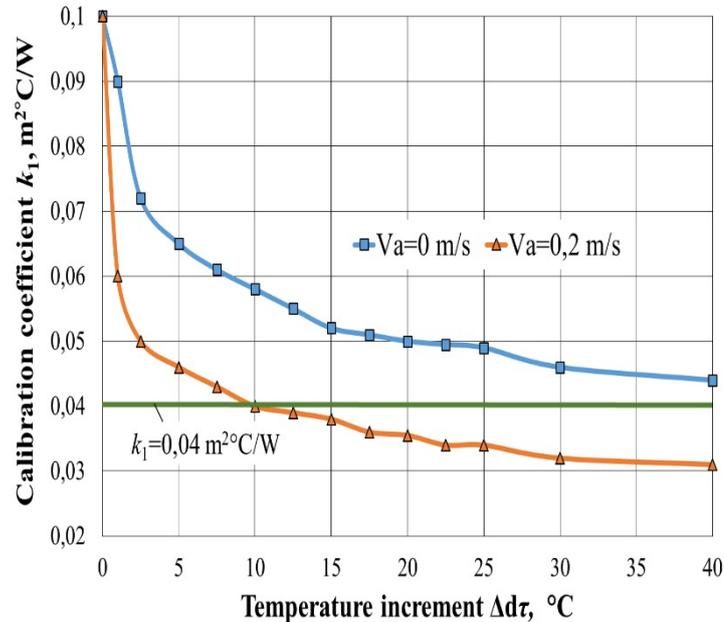


Рисунок 21. – Зависимость величины градуировочного коэффициента  $k_1$  от  $\Delta\tau$ :

Как видно из рисунка 21, аппроксимация опытных данных  $k_1$  прямой  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт достаточно хорошо согласуется с расчетными данными при  $V_a=0,2$  м/с и  $15^\circ\text{C} > \Delta\tau_1 > 8^\circ\text{C}$ . При меньших значениях  $V_a$  и  $\Delta\tau_1$  использование в расчетах значения  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт может привести к ощутимым погрешностям.

Значения составляющих (43) определим в соответствии с (20).

В соответствии с (37) рассмотрим 2 случая:

1. ТАС=τRC=TP=TS.P.

Тогда

$$\begin{aligned}
 Q_s^c &= Q_r^c + Q_c^c; \\
 Q_r^c &= \alpha_r^c (\tau_{sur}^c - t_p) (F_{sh} + F_{cr}) \varphi_R; \\
 Q_c^c &= \alpha_c^c (\tau_{sur}^c - t_p) (F_{sh} + F_{cr});
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

2.  $t_a$  и  $\tau_R$ , причем  $t_a \neq \tau_R$ .

$$\begin{aligned}
 Q_s^p &= Q_r^p + Q_c^p + Q_{r.sh}^p + Q_{c.sh}^p - \Delta Q_{RAD}; \\
 Q_r^p &= \alpha_r^p (\tau_{sur}^p - \tau_R) F_{cr} \varphi_R; \\
 Q_c^p &= \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_{cr}; \\
 Q_{r.sh}^p &= \alpha_{r.sh}^p (\tau_{sur.sh}^p - \tau_R) F_{sh} \varphi_R; \\
 Q_{c.sh}^p &= \alpha_{c.sh}^p (\tau_{sur.sh}^p - t_a) F_{sh}; \\
 \Delta Q_{RAD} &= F_{ps} a_{sur} E;
 \end{aligned} \tag{45}$$

где  $Q_s^p$  - явные тепловыделения, Вт;  $Q_r^p$  и  $Q_c^p$  - лучистая и конвективная теплоотдача с  $F_{cr}$ , Вт;  $Q_{r.sh}^p$  и  $Q_{c.sh}^p$  - то же с необлучаемой поверхности  $F_{sh}$ , Вт;  $\alpha_r^p$  и  $\alpha_c^p$  - коэффициенты лучистой и конвективной теплоотдачи с облучаемой поверхности  $F_{cr}$ , Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\alpha_{r.sh}^p$  и  $\alpha_{c.sh}^p$  - то же с необлучаемой поверхности  $F_{sh}$ , Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\tau_{sur}^p$  - температура поверхности животного для  $F_{cr}$ , °С;  $\tau_{sur.sh}^p$  - то же для  $F_{sh}$ , °С;  $F_{ps}$  - площадь животного, воспринимаемая ИК излучение от в данном случае локального обогревателя;  $a_{sur}$  - коэффициент поглощения излучения.

Если тепловые условия одинаковы, то

$$Q_s^c = Q_s^p; \tag{46}$$

Решая (51) ... (53) относительно  $t_p = t_{s,p}$ , при  $\varphi_R = 1$  получим

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} &= (\alpha_c^p F_{cr} + \alpha_{c.sh}^p F_{sh}) t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + (\alpha_r^p F_{cr} + \alpha_{r.sh}^p F_{sh}) \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) \\
 &+ (F_{cr} + F_{sh}) + a_{sur} F_{ps} E / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + [\tau_{sur}^c - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) F_{cr} \tau_{sur}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) \\
 &+ (\alpha_{r.sh}^p + \alpha_{c.sh}^p) F_{sh} \tau_{sur.sh}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh})];
 \end{aligned} \tag{47}$$

Допустим по аналогии с (40) и (41)

$$\alpha_r^p = \alpha_{r.sh}^p = \alpha_r^c = \alpha_r; \tag{48}$$

$$\alpha_c^p = \alpha_{c.sh}^p = \alpha_c^c = \alpha_c; \tag{49}$$

а животное обогреваем в пространстве ( $F_\Sigma = F_{cr} + F_{sh} = F_{ps}$ ), то

$$\tau_{sur.sh}^p = \tau_{sur}^p = \tau_{sur}^c; \tag{57}$$

то

$$t_{s,p} = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c) + a_{sur} E / (\alpha_r + \alpha_c); \tag{50}$$

$$C = a_{sur}(\alpha_r + \alpha_c)^{-1}; \quad (51)$$

Обозначим для упрощения

$$1/(\alpha_r + \alpha_c) = \xi; \quad (52)$$

Тогда формула (59) предстанет в виде

$$C = \xi a_{sur}; \quad (53)$$

Аппроксимируем тепловую характеристику животного прямыми, соответствующими его теплоотдаче (Рисунок 22).

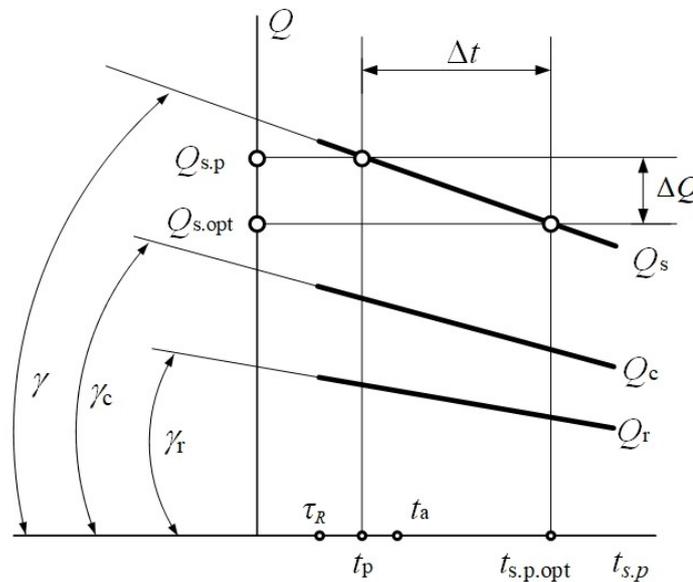


Рисунок 22. – Расчетная схема для определения коэффициента  $\xi$ .

В (52, 54) показано, что

$$tg\gamma_r = \alpha_r; \quad tg\gamma_c = \alpha_c; \quad (54)$$

Из рисунка 22 и уравнения (62) следует, что

$$tg\gamma = tg\gamma_r + tg\gamma_c = \alpha_r + \alpha_c; \quad (63)$$

Рассмотрим участок прямой  $Q_s$  (Рисунок 22). Животное находится в помещении с некоторой  $t_p$ , которую можно определить согласно (33) исходя из известных  $t_a$  и  $\tau_R$ . При этом животное выделяет определенное количество явной теплоты  $Q_{s,p}$ . Пусть в этих условиях требуется создать животному некоторые оптимальные тепловые условия с  $t_{s,p,opt}$ , которым соответствует  $Q_{s,opt}$ . Увеличению  $t_{s,p}$  на  $\Delta t$  (от  $t_p$  до  $t_{s,p,opt}$ ) соответствует

уменьшение  $Q_s$  на  $\Delta Q$  (от  $Q_{s,p}$  до  $Q_{s,opt}$ ):

$$\Delta t = \xi_l \Delta Q; \quad (55)$$

где  $\xi_l$  - коэффициент соответствия, °C/Вт.

Можно, согласно (64) и рис. 22, отметить, что

$$\xi_l = \Delta t / \Delta Q = ctg \gamma; \quad (56)$$

Тогда

$$\xi_l = 1 / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (57)$$

При обогреве инфракрасным облучателем, когда  $F_\Sigma \neq F_{ps}$ , уравнения (43) и (58) примут вид

$$t_{s,p} = At_a + B\tau_R + CEF_{ps} / F_{om\delta}; \quad (58)$$

$$t_{s,p} = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c) + \xi a_{sur} E F_{cr} / F_\Sigma; \quad (59)$$

Требуемую величину  $E$  найдем из (67) или (68) как

$$E = (t_{s,p} - At_a - B\tau_R) / (\xi a_{sur} F_{cr} / F_\Sigma); \quad (60)$$

Расчет для лежащего животного

1. Животное стоит в климатической камере с  $t_a^c = \tau_R^c = t_p = t_{s,p}$ . Его тепловой баланс можно описать системой уравнений (51).

2. Животное лежит в помещении с  $\tau_f$ ,  $t_a$  и  $\tau_R$ , причем  $\tau_f \neq t_a \neq \tau_R$ . Обогрев идет сверху ИК облучателем, при этом имеем некоторое значение  $E$ . От ИК облучателя животное получает теплоту  $\Delta Q_{RAD}$ . Температура в месте контакта с грунтом  $\tau_{af}$  (Рисунок 23).

$$Q_s^p = Q_r^p + Q_c^p + Q_t^p - \Delta Q_{RAD};$$

$$Q_r^p = \alpha_r^p (\tau_p^p - \tau_R) F_{cr} \Phi_R;$$

$$Q_c^p = \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_{cr};$$

$$Q_t^p = (\tau_{af} - \tau_f) F_{sh} / R_f;$$

$$\Delta Q_{RAD} = F_{ps} a_{sur} E; \quad (61)$$

где  $R_f$  - сопротивление теплопередаче пола, м<sup>2</sup>°C/Вт.

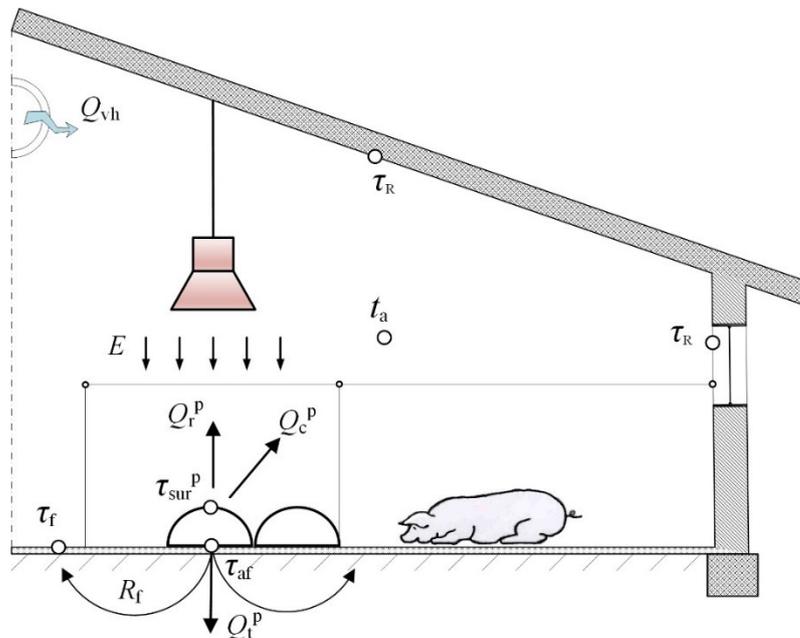


Рисунок 23. – Тепловой баланс для определения  $t_{o.n}$  лежащего животного в помещении (на примере свиарника-маточника)

Решая совместно (51), (53), (70) относительно  $t_p=t_{s,p}$ , при  $\varphi_R=1$  получим

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} = & \alpha_c^p F_{cr} t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \alpha_r^p F_{cr} \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + a_{sur} F_{ps} E / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + F_{sh} \tau_f / R_f (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + [\tau_{sur}^c - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) F_{cr} \tau_{sur}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) - F_{sh} \tau_{af} / R_f (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh})]; \quad (62)
 \end{aligned}$$

Для лежащего животного (когда  $F_{sh} \neq 0$ ) можно, приняв изложенные допущения представить (58) как

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} = & A F_{cr} t_a / (F_{cr} + F_{sh}) + B F_{cr} \tau_R / (F_{cr} + F_{sh}) + C F_{cr} E / (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + D F_{sh} \tau_f / (F_{cr} + F_{sh}); \quad (63)
 \end{aligned}$$

Здесь  $A$  и  $B$  можно определить согласно (35), (36). Величину  $C$  найдем из (29), а  $D = (R_f)^{-1} \xi$ .

Таким образом, уравнения (39), (54), (71) и (72) получены на основании решения систем уравнений, описывающих тепловой баланс животного при теплообмене его с окружающей средой при внешнем тепловом воздействии, и поэтому являются достаточно строгим выражением температуры  $t_{s,p}$ , ощущаемой животным.

Обоснованы зависимости основных тепловых характеристик животных

как функций температуры помещения.

Определен один из основных показателей теплового состояния животных – температура его поверхности теплообмена. Этот показатель необходим для использования при разработке методики выбора требуемых параметров локальных обогревателей. При его изменении путем внешнего воздействия ИК-излучением можно влиять на тепловое состояние животного.

## **Экологически чистая стимуляция и улучшение технологических качеств семян (Навроцкая Л.В., Навроцкая С.Р.)**

В наши дни развитие биотехнологий улучшает имеющиеся и создаваемые новые сорта сельскохозяйственных культур на пользу человечества происходит намного быстрее, чем столетие назад. Так, продукты, содержащие генетически модифицированные организмы (ГМО), вызывают у человека множество тяжёлых заболеваний, приводящих как к генетическим нарушениям, так и к смертельным исходам. Многие учёные считают эти продукты питания биологическим оружием для человечества.

В настоящее время большое количество продуктов питания содержат ГМО и пестициды, что является проблемой питания населения страны. ГМО и пестициды вреда для здоровья человека, сельскохозяйственное применение генетически модифицированных культур приводит к сокращению до 30 % биоразнообразия и ухудшению состояния окружающей среды. Массовое вымирание пчёл в странах, где культивируют транс гены, происходит потому, что приходится все время увеличивать количество гербицидов для выращивания генетически изменённых культур.

Учитывая результаты научных исследований и разработок в области электротехнологий, приводящих к хемоэлектрическим и генетическим преобразованиям, предлагается решение проблемы улучшения качества существующих сортов сельскохозяйственных культур и создания новых, с широким спектром наследственных хозяйственно ценных признаков будущих растений. Всё это за счёт совершенствования электрофизических способов управления энергетическим потенциалом биологических объектов – семян сельскохозяйственных растений.

Как показали исследования, в видимом диапазоне излучения можно получать большой спектр положительных аберраций [35].

Для стимуляции семян в основном используется излучение красной длины волны, как максимально поглощаемое фотохромной системой

(Девятков и др.). Энергия красного света по своему значению очень близка к энергетическим уровням, на которых работают живые организмы. При лазерном облучении семян с наибольшей частотой возникают положительные изменения хозяйственно ценных признаков, являющихся морфологическими мутациями количественных признаков – скороспелые, крупнозерновые, плотноколосые, морозоустойчивые и др. [36]. Дубинин считал, что возникновение малых мутаций, т.е. мутаций количественных признаков, связано с мелкими хромосомными абберациями, не вызывающими стерильности [37]. По мнению Gustafsson мелкие хромосомные абберации, возникающие при сравнительно невысоких дозах облучения и вызывают повышение урожайности в 15-20 раз чаще, чем генные мутации [38].

При облучении семян лазером у выросших из них растений наблюдалось появление с высокой частотой качественных морфологическим мутаций: окраска, форма колоса, остистость, продуктивность и т.д. [39].

Воздействие непрерывного излучения лазеров с длинами волн от 480 до 632 нм на семена овощных культур приводит к более чем двукратному увеличению частоты хромосомных аббераций в клетках семян от 5,1 до 12,4%, в результате появляются скороспелые семьи, созревающие на 4–12 дней раньше контрольных форм. Так же это приводит к повышению урожайности на 10–15%.

При подборе свойств лазерного излучения для облучения семян удаётся управлять процессами, происходящими в семенах на молекулярном уровне. С увеличением длины волны источника излучения при облучении семян наблюдается уменьшение выхода хромосомных аббераций, а также уменьшение отличий облучённых семян от контрольных.

Наибольшее число положительных признаков у проростков семян, их стимуляционное развития и повышение выхода хромосомных аббераций наблюдались у семян, облучённых импульсным лазерным излучением в сравнении с облучением их непрерывным лазерным излучением.

Установлено, что у всех семян существует единый механизм приёма энергии и, что таким приёмником являются молекулы воды. Следовательно, чем больше воды впитают семена, тем больше энергии они смогут поглотить при последующем облучении.

Несмотря на практические успехи электротехнологий, до настоящего времени не разработаны комплексные способы и методы электрофизического воздействия на семена, вызывающие увеличение выхода хромосомных aberrаций, усиливающих эффект стимуляции и устройства для их обработки.

Цель работы заключается в разработке комплексных экологически чистых электрофизических способов, устройства и математических моделей управления сельскохозяйственными электротехнологиями максимально повышающими выход хромосомных aberrаций, расширяющих спектр морфологических хозяйственно ценных признаков и усиливающих стимуляцию развития растений.

В качестве материалов исследования послужили авторские разработки электрофизических методов водотермической и лазерной обработки семян овощных культур. Также материалами исследования послужили авторские разработки водотермической обработки семян совместной с переменным электрическим током и последующим лазерным облучением. В этой работе были использованы методы статистического анализа.

Лазерное облучение семян является одним из наиболее эффективных, мягких стимулирующих факторов воздействия на семена. Тип преобразования энергии в клетке - генерация протонного потенциала, и образование аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), обеспечивающей энергетический обмен веществ в клетке. В мембранах клеток находятся светопоглощающие белковые системы, которые связаны цепочкой друг с другом и соединяют внешнюю и внутреннюю поверхности мембраны.

Мембрана клетки содержит большое количество молекул светопоглощающего белка. Чтобы синхронизировать работу всех этих «фотогенераторов» для подачи в клетку наибольшего количества энергии,

каждый из которых работает сам по себе, для облучения семян необходимо генерировать световую вспышку продолжительностью менее  $10^{-7}$  с. При облучении молекул светопоглощающего белка световой вспышкой длительностью  $10^{-7}$  с все они срабатывают практически одновременно. Итак, большие скорости изменения разности мембранных потенциалов при указанных выше коротких вспышках света - вот, что нужно для увеличения поглощения световой энергии растительной клеткой, а, следовательно, и семенами. Эта энергия идёт на ускорение обменных процессов в клетках семян, развитие проростков, усиление стимуляционных процессов их роста и жизнедеятельности, а также на повышение выхода хромосомные aberrаций, закрепляющих в растениях эти, и расширяющие спектр других хозяйственно ценных признаков.

Из выше приведённых исследований был подобран источник облучения семян. Им является полупроводниковый импульсный лазер с электронным возбуждением и перестраиваемой длиной волны.

Из проведённого анализа литературных источников выяснилось, что при наблюдении за проростками сухих и увлажнённых семян после воздействия на них лазерного излучения наблюдается повышение выхода хромосомных aberrаций, способствующих усилению стимуляционных процессов в развитии проростков. Этот эффект достигается в основном за счёт изменения оптических свойств влажных семян, а также за счёт изменения их физиологического состояния.

Количественно процесс поглощения излучения веществом обычно характеризуется коэффициентом поглощения  $K_n$ . Величина  $K_n$  определяется длиной пути, проходимого излучением в веществе. Ослабление излучения веществом подчиняется по закону Бугера–Ламберта–Бера [40]:

$$K_n = 1 - e^{-kl}; \quad (64)$$

где  $k$  – показатель поглощения,  $m^{-1}$ ;  $l$  – длина пути, излучения в веществе, м;

Количественная зависимость фотохимического действия излучения от

условий облучения реагирующего вещества называемая законом взаимозаменяемости, и определяет связь между выходом фотохимической реакции и количеством облучения реагирующего вещества [41]:

$$M_p = i a \cdot (1 - e^{-kl}) \cdot F \cdot \tau; \quad (65)$$

или

$$M_p = i a \cdot (1 - e^{-kl}) \cdot E \cdot S \cdot \tau; \quad (66)$$

где  $M_p$  – число молекул исходного вещества, вступившего в реакцию за время облучения  $t$ ; шт.;  $S$ - площадь поверхности семени,  $m^2$ ;  $E$  - облучённость семени,  $Вт/м^2$ ;  $F$ - поток излучения, падающий на семя,  $Вт$ ;  $\tau$ - время облучения,  $с$ ;  $a$ -постоянная скорости фотохимической реакции;

Подставляя (73) в (74) получим:

$$M = a \cdot K_n \cdot E \cdot S \cdot \tau; \quad (67)$$

Соотнеся величины выхода фотохимического действия лазерного излучения у влажных семян ( $M_w$ ) и сухих ( $M_d$ ), получил коэффициент, показывающий повышение выхода фотохимического действия излучения, в нашем случае усиление процессов хромосомных aberrаций, вызывающих стимуляцию развития проростков  $K_{xa}$  т.е.

$$K_{xa} = \frac{M_w}{M_d} = \frac{a \cdot K_{nw} \cdot E \cdot S_w \cdot \tau_o}{a \cdot K_{nd} \cdot E \cdot S_d \cdot \tau_o}; \quad (68)$$

где  $K_{nw}$  - коэффициент поглощения излучения влажным семенем;  $K_{nd}$  - коэффициент поглощения излучения сухим семенем;  $S_w$  - площадь поверхности влажного семени,  $m^2$ ;  $S_d$  - площадь поверхности сухого семени,  $m^2$ .

При увлажнении семена увеличивают свою площадь, а, следовательно, поглощают больше лучистой энергии. С учётом коэффициента усадки семени  $\tilde{\alpha}$ , о.е. площадь поверхности семени  $S, m^2$  запишется:

$$S = S_o \cdot (1 + \tilde{\alpha} \cdot W); \quad (69)$$

где  $S_o$  – площадь абсолютно сухого семени,  $m^2$ ;  $W$  – влажность семени,

о.е.

При увлажнении семян коэффициент их линейного расширения  $\bar{\alpha}$ , о.е., рассчитывается по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha^{-1}}{(W - W_x) - \alpha^{-1} \cdot W}; \quad (70)$$

где  $W_x$  – влажность семян при их хранении, о.е.;  $\alpha^{-1}$  – относительное увеличение длины семени, о.е.:

$$\alpha^{-1} = \frac{l l_c}{l}; \quad (71)$$

где  $l$  – длина семени после увлажнения, м;  $l_c$  – длина семени с начальной влажностью, м.

В свою очередь:

$$l = l_c(1 + \bar{\alpha} \cdot W); \quad (72)$$

$$l_c = l_o(1 + \bar{\alpha} \cdot W_x); \quad (73)$$

где  $l_o$  – длина абсолютно сухого семени, м.

На основании экспериментальных исследований и научных данных был разработан способ обработки семян с целью повышения выхода хромосомных aberrаций и усиления стимуляционных процессов развития проростков, предполагающий предварительную обработку семян водой контрастных температур, т.е. их водотермическую обработку (ВТО) с последующим лазерным облучением.

При водотермической обработке семена подвергаются воздействию водой двух постоянно чередующихся контрастных температур 20 °С и 40 °С в течении определённого времени, при котором происходит нагревание и охлаждение семени. В данном случае происходит теплообмен между поверхностью семени и окружающей средой, т.е. перенос влаги происходит за счёт диффузии. Закон этого теплообмена достаточно сложен, и для упрощения задачи он может быть принят в виде закона Ньютона-Рихмана

[42]. Оптимальная температура воды при обработке семян для лучшего их прорастания 37 °С. Поэтому нужно подобрать длительность периода обработки семян водой контрастных температур так, чтобы семена максимальное время находились при этой оптимальной температуре. Для этого определяем относительную температуру центра семени при его охлаждении и нагревании, с помощью графиков  $\theta_{x=0}=f_1(Bi, Fo)$  и  $\theta_{x=-1}=f_2(Bi, Fo)$  задачника по теплопередаче выражающуюся уравнением:

$$\Theta = \frac{t_c - t_b}{t_o - t_b}; \quad (74)$$

$$\Theta = \frac{t_b - t_c}{t_b - t_o}; \quad (75)$$

где  $t_c$  - температура центра семени, °С;  $t_b$  - температура жидкости, окружающей семя, °С;  $t_o$  - начальная температура семени, °С.

Зная температуру окружающей семя воды, начальную температуру семени и значение относительной температуры можно определить температуру центра семени, т.е. при его нагревании и охлаждении, а, следовательно, вычислить длительность периода обработки семян водой каждой из контрастных температур и подобрать длительность периода обработки семян так, чтобы семена максимальное время находились при оптимальной температуре 37 °С, а также количество энергии, которую получает семя при ВТО.

Для усиления и ускорения процесса водотермической обработки и процессов обмена веществ в клетках семян нужно использовать ещё один мутационно-стимулирующий фактор – переменный электрический ток. Электрический ток вызывает в тканях следующие физико-химические эффекты: электролиз, поляризацию, электродиффузию и электроосмос за счёт увеличения разности потенциалов на мембранах их клеток [43].

Привносимая низкоинтенсивными физическими факторами в биологические структуры энергия служит своеобразным «триггером» перераспределения свободной энергии клеток в тканях семян, существенно изменяющих их метаболизм, транскапиллярный обмен и несёт в себе черты «информационного» мутационно-стимуляционного воздействия.

Авторами разработан способ обработки семян поочерёдно водой контрастных температур с переменным электрическим током (ВТО+I) и последующим лазерным облучением. Если соотнести энергию, поглощаемую семенами, прошедшими водотермическую обработку совместно с переменным электрическим током и последующим лазерным облучением (ВТО+I+Л), к энергии, поглощаемой семенами после их (ВТО+Л) без электрического тока, то получим выражение для коэффициента повышения выхода хромосомных aberrаций, усиливающих стимуляционные процессы развития проростков, вызываемых переменным электрическим током:

$$K_{xa} = \frac{M_{вто+I+л} + H_{вто+I} + M_{э}}{M_{вто+л} + H_{вто}} ; \quad (76)$$

где  $M_{вто+I+л}$  – лазерная энергия, поглощаемая семенами после их ВТО + I, Дж;

$H_{вто+I}$  – энтальпия, внутренняя энергия семян после их ВТО + I, Дж;  $W_{э}$  – электрическая энергия, поглощаемая семенами при их ВТО + I, Дж;  $M_{вто+л}$  – лазерная энергия, поглощаемая семенами после их ВТО, Дж;  $H_{вто}$  – энтальпия, внутренняя энергия семян прошедших ВТО, Дж.

Далее приведены результаты исследований обработки семян разработанным способом с целью повышения выхода их хромосомных aberrаций. Выявлены изменения их физических, биологических и, в конечном счёте, генетических и морфологических параметров.

По полученным экспериментальным данным произведён расчёт коэффициента повышения выхода хромосомных aberrаций (88) и стимуляции роста проростков, построены графики и найдены аналитические

зависимости изменения физических параметров семян.

Поскольку, насыщение семян водой максимально увеличивает их поверхность облучения, были проведены исследования для определения режима максимального насыщения семян водой. Семена подвергались обработке водой различных пар контрастных температур (ВТО), что и выявило основной устойчивый стимуляционный режим обработки семян огурца сорта «Водолей». С увеличением количества влаги в семенах в процессе их водотермической обработки площадь поверхности семян увеличивается, что приводит к большему поглощению ими энергии лазерного излучения и повышению выхода хромосомных aberrаций.

Исследуя способы повышения выхода хромосомных aberrаций сравнивали два варианта обработки семян огурца сорта «Водолей» для определения лучшего из них. На одну группу семян перед их лазерным облучением в течении 1,5 часа воздействовали (ВТО) в стимуляционном режиме, вторую группу оставили сухой без изменения и так же воздействовали лазерным излучением в течении 1,5 часа.

После прорастания семян проводился цитогенетический анализ проростков обеих групп семян и по полученным результатам определены зависимости выхода хромосомных aberrаций в этих двух случаях:

а) для проростков, выросших из сухих семян после лазерного облучения:

$$K_{\text{хас}} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^6 - 0.0089 \cdot \tau^5 + 0.1537 \cdot \tau^4 - 1.184 \cdot \tau^3 + 3.66 \cdot \tau^2 - 1.3 \cdot \tau + 1.2; \quad (77)$$

б) для проростков, выросших из семян, прошедших перед лазерным облучением водотермическую обработку:

$$K_{\text{хавто}} = -3.77 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^7 + 0.01745 \cdot \tau^6 - 0.318 \cdot \tau^5 + 2.889 \cdot \tau^4 - 13.57 \cdot \tau^3 + 29.8 \cdot \tau^2 - 17.9 \cdot \tau + 1; \quad (78)$$

Разделив выражение (87) на выражение (86) получим коэффициент повышения выхода хромосомных aberrаций ( $K_{\text{ха}}$ ):

$$K_{xa} = \frac{-3.77 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^7 + 0.01745 \cdot \tau^6 - 0.318 \cdot \tau^5 + 2.889 \cdot \tau^4 - 13.57 \cdot \tau^3 + 29.8 \cdot \tau^2 - 17.9 \cdot \tau + 1}{1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^6 - 0.0089 \cdot \tau^5 + 0.1537 \cdot \tau^4 - 1.184 \cdot \tau^3 + 3.66 \cdot \tau^2 - 1.3 \cdot \tau + 1.2}; \quad (79)$$

Из сказанного выше ясно, что выход хромосомных aberrаций зависит от количества влаги в семенах, длительности лазерного облучения и физического состояния семян.

Для ускорения процесса поглощения семенами влаги и усиления процессов обмена веществ в клетках семян использовали ещё один стимулирующий фактор-переменный электрический ток.

В проводимых экспериментах измеряли электрическое сопротивление семян, с целью определения его минимального значения, что сказывается на потреблении семенами электрической энергии. Было выяснено, что электрическое сопротивление семян имеет минимальное значение при их обработке предлагаемым комплексным способом, т.е. при поочерёдной обработке семян водой контрастных температур с пропусканием через неё переменного электрического тока и последующего их лазерного облучения.

Сравнивали выход хромосомных aberrаций у проростков после воздействия на семена огурца сорта «Водолей» двух вариантов обработки: ВТО совместно с переменным электрическим током в стимуляционном режиме (Рисунок 24) и ВТО семян в стимуляционном режиме совместно с переменным электрическим током и последующим лазерным облучением от I до 140 минут. По результатам экспериментальных данных построены зависимости выхода хромосомных aberrаций (Рисунок 25).

При комплексной водотермической обработке семян водой контрастных температур ( 20 °С и 40 °С) совместно с переменным электрическим током и последующим лазерным облучением, наблюдается максимальный выход хромосомных aberrаций, в сравнении с другими способами их обработки и при этом максимальный стимуляционный рост проростков семян (Рисунок 25, кривая 2).

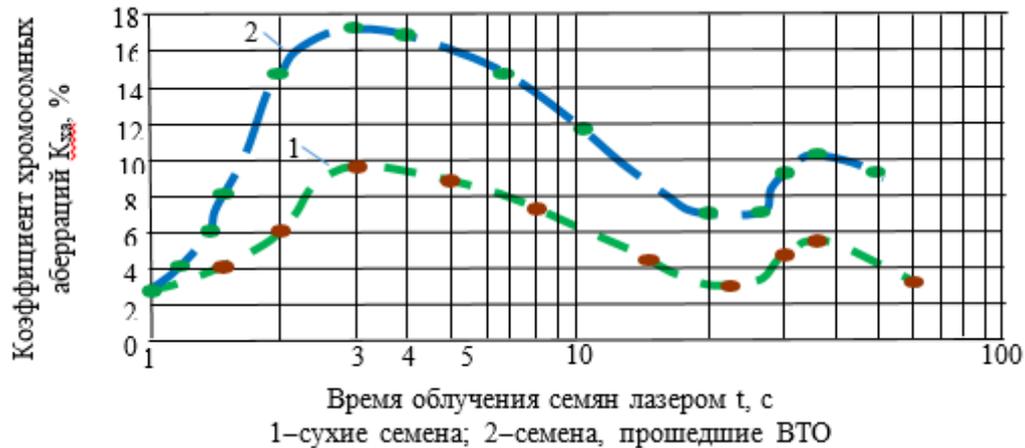


Рисунок 24. – Зависимость коэффициента хромосомных aberrаций  $K_{xa}$  семян огурца сорта «Водолей» от способа их обработки

Зависимость выхода хромосомных мутаций у корешков проростков, выросших из сухих семян с последующим лазерным облучением, можно записать в виде следующих выражений:

$$K_{xmc} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot x^6 - 0.0089 \cdot x^5 + 0.1537 \cdot x^4 - 1.184 \cdot x^3 + 3.66 \cdot x^2 - 1.3 \cdot x + 1.2; \quad (80)$$

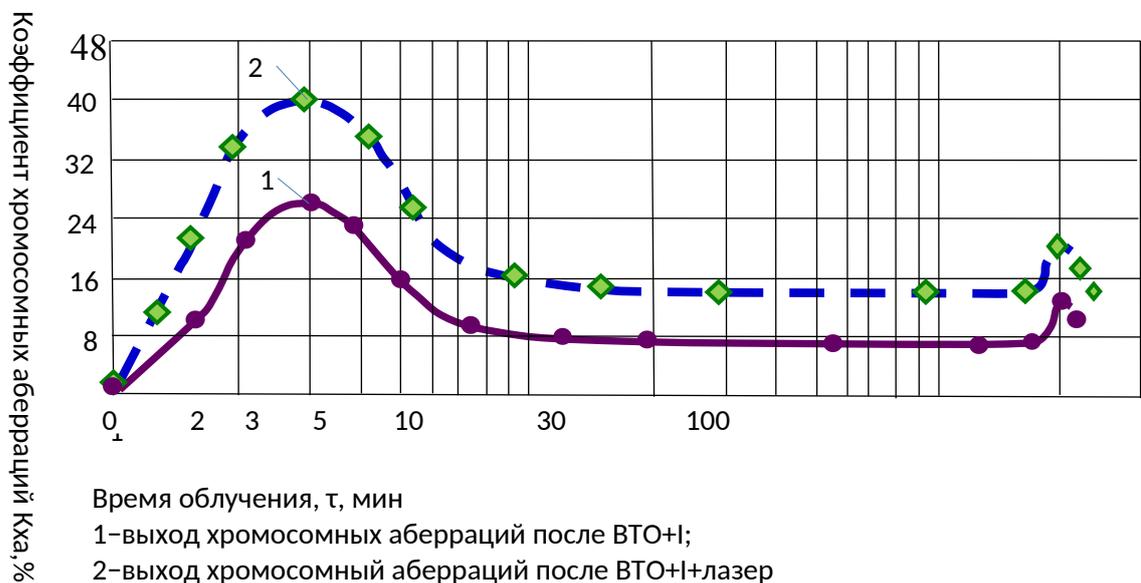


Рисунок 25. – Зависимость выхода хромосомных aberrаций у проростков семян огурца сорта «Водолей» от времени и способов их обработки

Зависимость выхода хромосомных aberrаций у корешков проростков, выросших из семян, прошедших ВТО с последующим лазерным облучением, можно записать в виде следующих выражений:

$$K_{xмвто} = -3.77 \cdot 10^{-4} \cdot x^7 + 0.01745 \cdot x^6 - 0.318 \cdot x^5 + 2.889 \cdot x^4 - 13.57 \cdot x^3 + 29.8 \cdot x^2 -$$

$$-17.9 \cdot x + 1; \quad (81)$$

Изменения выхода хромосомных aberrаций при различных способах обработки семян и поглощении ими энергии показано на рисунке 26. Было выяснено, что при комплексной обработке семян водой контрастных температур совместно с переменным электрическим током и последующим лазерным облучением наблюдается максимальное поглощение энергии воздействия и максимальный выход хромосомных aberrаций (Рисунок 26, кривая 4).

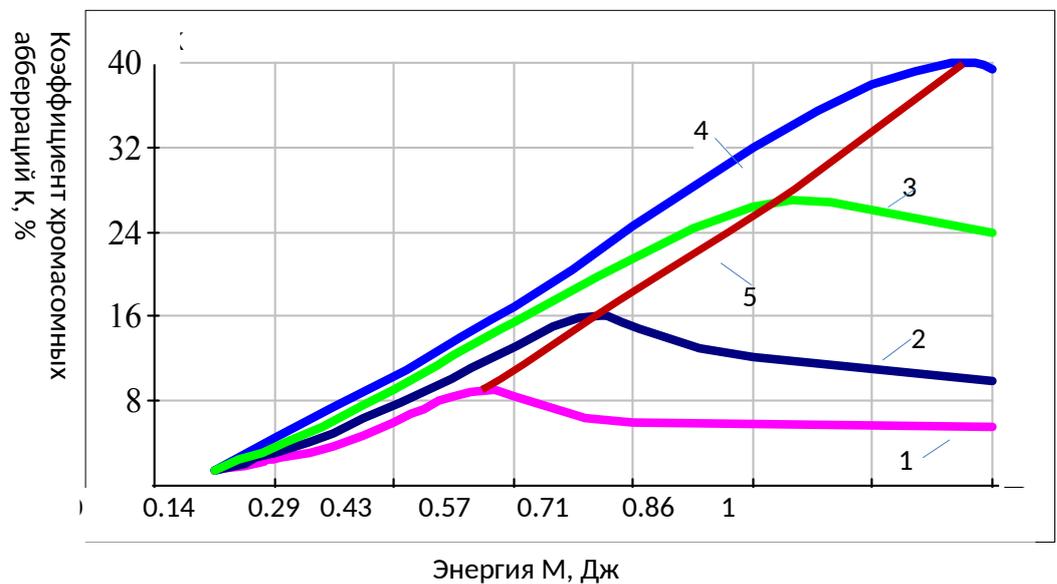


Рисунок 26. – Зависимость изменения коэффициента хромосомных aberrаций от количества поглощаемой семенами энергии при различных способах их обработки

Авторами установлена сложная зависимость стимуляционной длины проростков семян обработанных в оптимальном комплексном режиме и выхода хромосомных aberrаций (Рисунок 27).

Данная зависимость описывается уравнением:

$$L = -1.15 \cdot 10^{-5} \cdot K_{xa}^4 + 9.05 \cdot 10^{-4} \cdot K_{xa}^3 - 0.0214 \cdot K_{xa}^2 + 0.24 \cdot K_{xa} + 3.8; \quad (82)$$

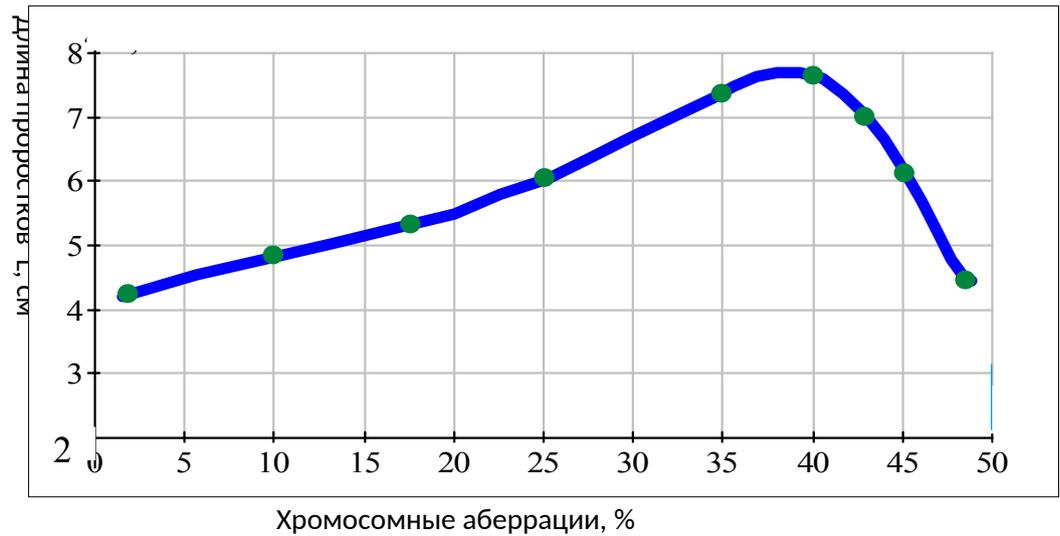


Рисунок 27. – Зависимость изменения длины проростков от количества хромосомных aberrаций

Для большей наглядности эффективности разработанного способа повышения выхода хромосомных aberrаций и связанных с ним стимуляций роста и развития проростков построена поверхность отклика (Рисунок 28).

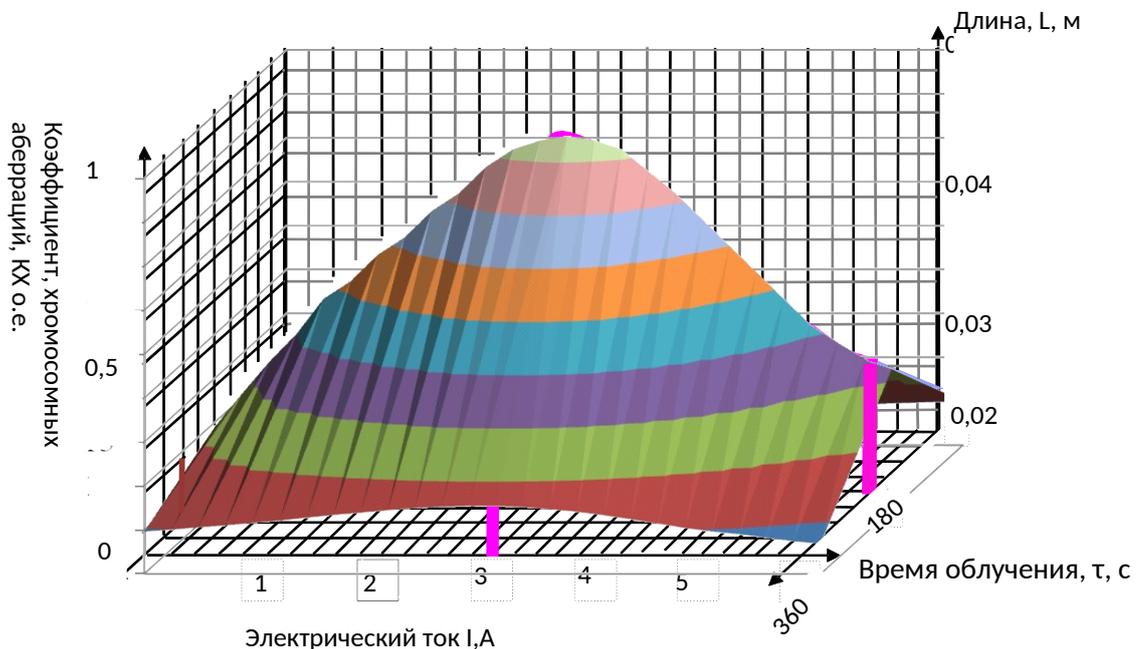


Рисунок 28. – Поверхность отклика длины проростков при режиме максимального насыщения семян водой (ВТО) с переменным электрическим током, последующим лазерным облучением семян в течение 3 минут, выходом хромосомных aberrаций, максимальной длиной проростков 0,05 м, при длине контрольных, не подвергавшихся обработке семян – 0,03 м

На основании экспериментальных данных и анализа известных работ по этой теме, разработано устройство для получения хромосомных aberrаций и стимуляции семян.

Были проведены лабораторные испытания разработанного устройства для проверки практической реализации способа на семенах огурца сорта «Водолей», дыни «Колхозницы», арбуза «Астраханский». Семена помещались в рабочую ёмкость, где смачивались водой контрастных температур 20 °С и 40 °С продолжительностью по 30 с каждой в течение 35–50 циклов с одновременным пропусканием через неё переменного электрического тока величиной от 1 до 3 А с последующим лазерным облучением их от 2 до 10 мин., с частотой  $f = 33$  Гц и длительностью импульса 10 нс. Проводились испытания устройства также на семенах других с.-х. культур [43].

В результате цитогенетической проверки обработанных семян, подтверждена эффективность предлагаемого способа и устройства. Способ даёт максимальный стимуляционный эффект роста проростков и выхода хромосомных aberrаций, достигающий 30...50 % в сравнении с проростками, выросшими из необработанных семян (1,5 %), что увеличивает спектр и количество морфологических хозяйственно ценных признаков. На разработанные способы и устройство получены авторские свидетельства и патенты на изобретения в 1989, 2006, 2007, 2008 и 2018 годах.

По результатам проведённых исследований современных электротехнологий обработки семян, обоснован способ повышения выхода хромосомных aberrаций, усиливающих стимуляцию развития проростков и расширяющих спектр морфологических хозяйственно ценных признаков растений, включающий поочерёдную обработку семян водой контрастных температур одновременно с переменным электрическим током и последующим импульсным лазерным облучением.

Разработаны математические модели, устанавливающие количественные взаимосвязи водотермической обработки семян с

одновременным действием переменным электрическим током и последующим лазерным облучением и с показателями максимального увеличения количества хромосомных aberrаций, расширяющих спектр хозяйственно ценных морфологических изменений с.-х. культур.

Разработано многофункциональное устройство для комплексного электрофизического управления физиологическими процессами семян с.х. культур с программируемыми функциями процессов обработки семян водой контрастных температур (20 °С и 40 °С) с переменным электрическим током  $1 \div 3$  А, последующим импульсным лазерным облучением частотой  $f = 30 \div 35$  Гц, длительностью импульса  $10 \div 20$  нс, мощностью в импульсе  $200 \div 250$  кВт и длиной волны  $\lambda = 547 \div 628$  нм.

Проведённые экспериментальные исследования предложенного способа и испытания разработанного устройства показали максимальное повышение выхода хромосомных aberrаций до 40-50 %, стимуляцию роста и развития проростков. Найдены варианты обработки семян для стимуляции роста и урожайности надземной части растений (огурца сорта «Водолей», арбуза «Астраханский» на 21–27 %), и при длительной обработке получили короткостебельные растения с увеличением урожайности подземной корневой части растений (сахарной свёклы ППГ-10 до 20–26 %). По полученным данным проведён расчёт срока окупаемости данного устройства, который составляет менее года.

Предлагаемые способы и устройство могут быть использованы в селекционных центрах с целью выведения новых сортов сельскохозяйственных культур, а также в хозяйствах по выращиванию овощных и зерновых культур для предпосевной стимуляции семян.

## **Модели технико-технологических решений электрического повреждения нежелательных растительных объектов (Ляпин В.Г.)**

Использование систем автоматизации для уничтожения нежелательной растительности с использованием электроэнергии путем электромагнитного воздействия (ЭМВ) на не проросшие семена сорняков и на проросшие растения – современное направление развития в АПК [44], [45]. Электротехнологические установки (ЭТУ), применяемые для электрического повреждения растительных объектов (ЭПРО), разделяют для уничтожения сорняков и прореживания посадок культур, «обрезки» и высушивания ботвы корнеклубнеплодов (Рисунок 29).

Развитие электротехнологического процесса (ЭТП) и ЭТУ для ЭПРО в 1980-2020 гг. было сфокусировано на различных аспектах, относящихся, в первую очередь, к электродным системам (ЭС). Они могут быть классифицированы в соответствии со следующими задачами: уменьшение массогабаритов, предотвращение ЭМП, пространственно-распространяемых на нецелевые объекты, уменьшение потерь электрической энергии и другие. Разработкой электрооборудования и электроники ЭТУ для решения перечисленных задач занимались многочисленные отечественные и зарубежные организации и фирмы, в частности: НПО «Россия» и ВИЭСХ (г. Москва), ЧИМЭСХ (г. Челябинск), Волгоградский СХИ (г. Волгоград), КСХИ (г. Кострома), НГАУ и СибИМЭ (г. Новосибирск), Кубанский СХИ (г. Краснодар), NASA Marshall Space Flight Center (США), Evrard (Франция), Шеффилдский университет (Великобритания) и др. [46], [47].



а



б

*Рисунок 29. – Инновационные методы борьбы с сорняками электрическим током (разработки британской компании Root Wave): а - повреждение сорняков электрическим ручным инструментом (слева – контактирующий с нежелательным РО высоковольтный электрод, справа – заземляющий электрод); б – электрический культиватор, агрегатируемый с трактором*

Британская компания «Small Robot Company» разработала для автоматизации точного посева сельскохозяйственных культур, мониторинга состояния посевов и уничтожения сорняков без применения гербицидов три робота (Том, Гарри и Дик) [48], [49], которые способны самостоятельно выполнять эти технологические операции ( ).

Таблица 4

**Разработки роботов для мониторинга состояния посевов и уничтожения сорняков без применения гербицидов британской компании «Small Robot Company»[44]**

Описание	Техническое решение
<p>Робот Том предназначен для мониторинга состояния посевов, определения содержания питательных веществ в листьях, выявления и идентификации сорных растений и сбора информации для создания электронной карты-задания другим роботам. Он объезжает все растения на поле и отслеживает состояние сельскохозяйственных культур.</p> <p>Производительность робота составляет до 20 га в день с использованием автономной навигации и встроенной камеры, чтобы отличать культурные растения от сорняков с разрешением менее 1 мм</p>	
<p>Робот Дик осуществляет точное внесение пестицидов и лазерную прополку</p>	
<p>В роботе Дик есть камера, передающая изображения на периферийную информационно-измерительную систему (Wilma), которая определяет широколистные сорняки. Затем алгоритм перемещает дельта-руку к сорняку и, в зависимости от размера сорняка, меняет продолжительность времени, в течение которого через этот сорняк проходит электрический ток, чтобы обеспечить ЭПРО (время зависит от размера сорняка, дельта-рука нацеливается на 1,5 сорняк в секунду)</p>	
<p>На роботизированной платформе, включающей «роботизируемую руку» рычаг igus, может быть закреплены различные технологии (химическая, механическая, электрическая). Три дельта-рычага igus, установленные на роботе Дик, могут уничтожить сорняки электрическим током одновременно. Кинематика дельты делает ее подходящей для получения конечного эффекта, а ременный привод обеспечивает параллельность перемещения электрода над почвой</p>	

Робот Дик предназначен для уничтожения сорняков электрическим током при помощи технологии, разработанной британским стартапом «Rootwave». Он разрабатывается таким образом, чтобы мог «пропалывать» сорняки и двигаться одновременно. Основное преимущество данной технологии состоит в исключении использования гербицидов, тем самым улучшая защиту биоразнообразия и качества почвы. Отличие разрабатываемой технологии заключается в том, чтобы провести зонд над сорняками и обеспечить любой технологический процесс, от распыления гербицидов до использования лазеров, ЭПРО или механической прополки. В перспективе планируют уничтожать сорняки механическим путем - выдергивая их дельта-рукой из земли или придавливая дельта-рычагом надземную часть к почве. «Антисорняковый» робот уже применялся в США для удаления нежелательной растительности со взлетно-посадочных полос аэропортов и железнодорожных путей.

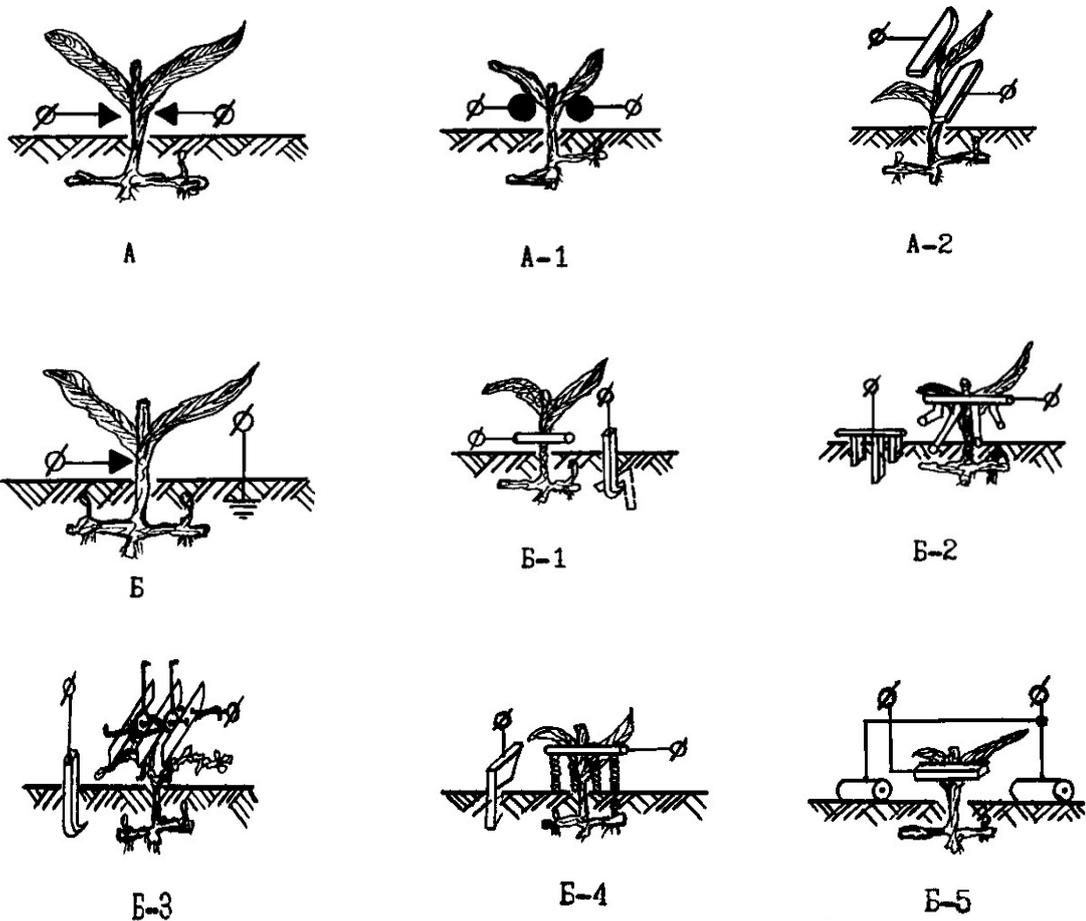
Однако, указанные методы ЭМВ на нежелательную растительность плохо применимы для травянистой и древесно-кустарниковой поросли, произрастающей в полосе отвода дорог, линий электропередач. При большом количестве нежелательной растительности повышенная нагрузка приведет к работе ЭТУ в режиме короткого замыкания ЭС и источников электропитания. К числу недостатков немеханических методов обработки относят невысокую экономическую эффективность, непредсказуемость экологических последствий в среднесрочной и долгосрочной перспективе [50], [51]. Однако ряд отрицательных последствий применения для борьбы с нежелательной растительностью физических и биологических методов указывает на необходимость совершенствования электрофизических методов повреждения нежелательных РО, травянистой и древесно-кустарниковой поросли, произрастающей в полосе отвода дорог.

Современные образцы ЭТУ и их элементная база являются сложными техническими системами, требующими для разработки значительных затрат на фоне постоянного совершенствования технологий и техники.

Существующая необходимость в их развитии и модернизации требует развития их математических и схемных моделей.

Цель работы состоит в развитии схемных и математических моделей технических и технологических решений (ТТР) ЭПРО [52].

В процессе обзора патентной документации и научно-технической литературы выявлены различные способы и устройства для ЭПРО. Анализ выявленных технических решений позволил составить классификацию (Рисунок 30), в основе которой лежат схемы включения растений в электрическую цепь.



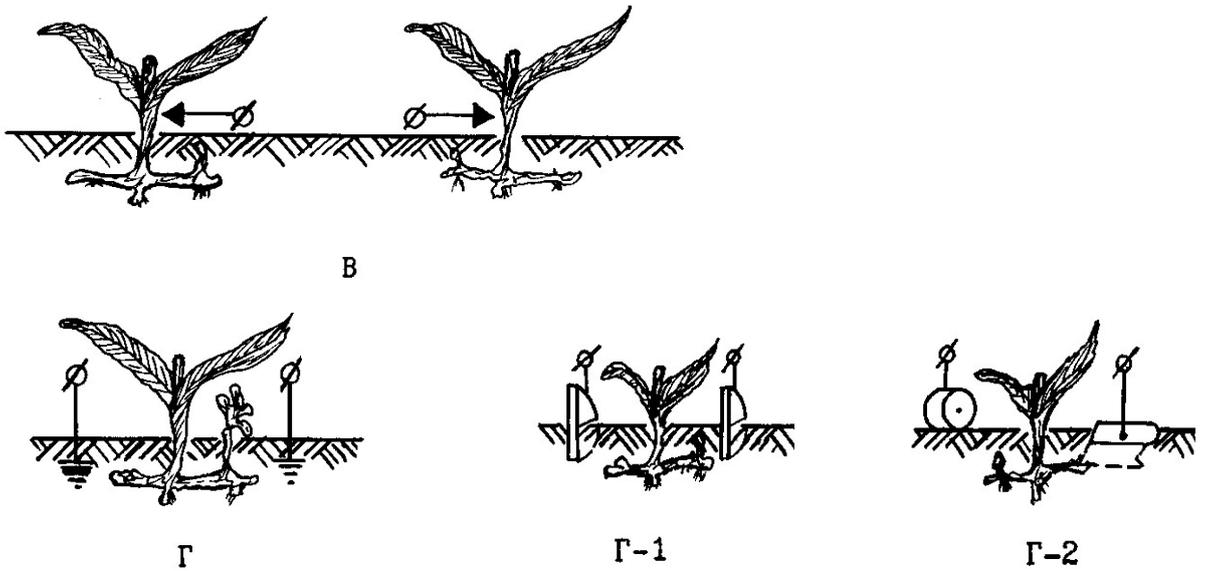


Рисунок 30. – Классификация схем включения растений в электрическую цепь и конструктивные особенности электродов

Конструктивно в ЭТУ вся элементная база размещается (Рисунок 31) в высоковольтной ЭС, ЭП и на БУСЗ, а в целом они составляют новый класс оборудования, включая электронные преобразователи [53], [54]. Конструкцию ЭТУ поясняет рисунок 31, координатная система и геометрия для последующих расчетов показана на рисунке 32, где приведена топология ЭС ЭТУ с РО.

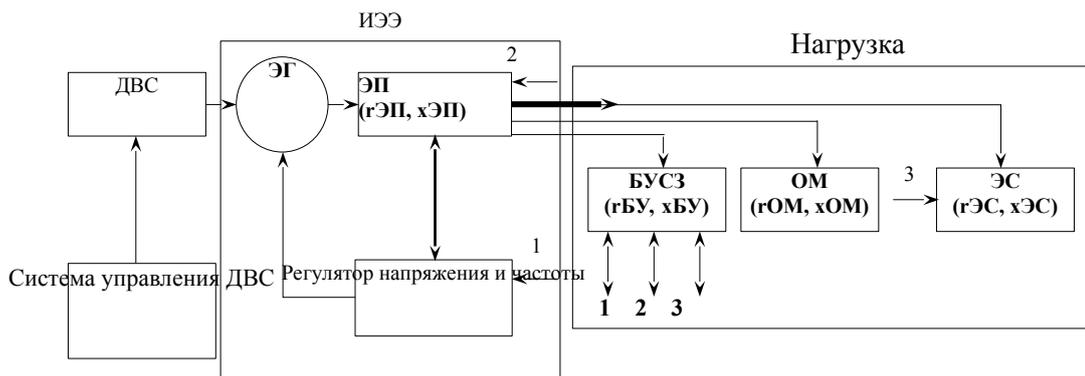


Рисунок 31. – Функциональная структурная схема ЭТУ: ДВС - двигатель внутреннего сгорания; ИЭЭ - источник электрической энергии; ЭГ – электрический генератор; ЭП - электропреобразователь; БУСЗ - блок управления, сигнализации и защиты; ОМ - отбор мощности; ЭС - электродная система; полная  $P_s$ , активная  $P_V$  и реактивная  $P_Q$  мощности; активные  $r_{БУ}$ ,  $r_{ОМ}$ ,  $r_{ЭС}$  и реактивные  $x_{БУ}$ ,  $x_{ОМ}$ ,  $x_{ЭС}$  сопротивления БСДУ, ОМ и ЭС



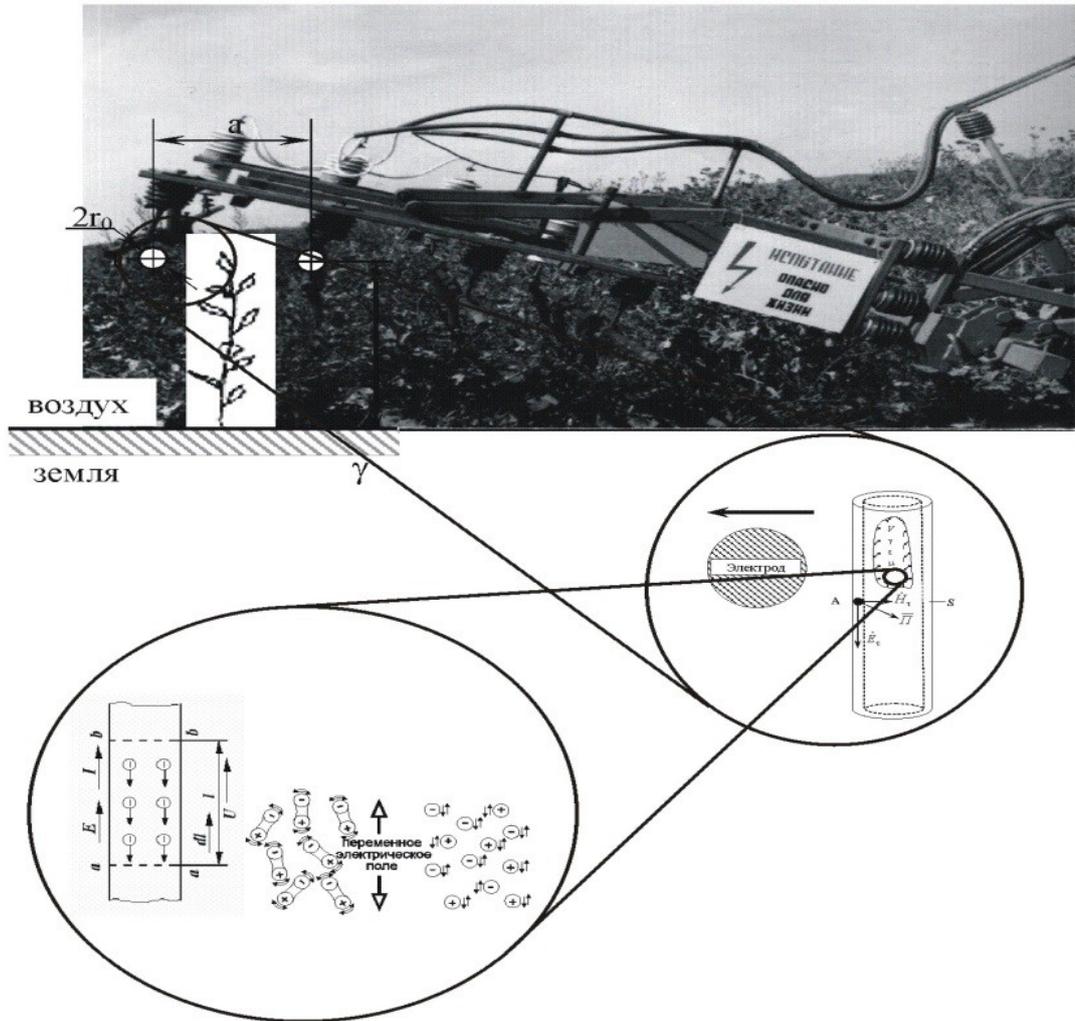


Рисунок 32. – Топология компонентов РО в электромагнитном поле ЭС ЭТУ

Современные представления об электромагнитной природе РО заложены Х.А. Лоренцем в классической электронной теории вещества в конце XIX века, согласно которой РО можно представить, как совокупность заряженных частиц – электронов и ядер (Рисунок 32). В основе теории лежит положение о том, что уравнения Максвелла позволяют достоверно описать электромагнитное поле (ЭМП) в любой точке пространства межэлектродного промежутка (МЭП) ЭТУ и в любой момент времени [55].

В твердом, жидком и газообразном агрегатном состоянии отдельных компонентов биоматериала РТ, как материальная среда имеет достаточно высокую электропроводность на уровне проводников 2 рода, благодаря чему в переменных ЭМП на РО воздействуют те же силы, что и на электропроводящие материалы.

Электропроводность биоматериалов изменяется в широких пределах достигает  $10^6$  См/м, следовательно, электромагнитные процессы, происходящие в МЭП ЭТУ, в т.ч. в РТ при ЭПРО, описываются уравнениями Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.

На рис. 31-33 РО рассматривается при подключении ЭС или МЭП ЭТУ (Рисунок 33) к источнику технологического напряжения  $U_t$ , лежащие в основе ЭПРО, в частности клетки на примере электрического пробоя мембраны (Рисунок 34).

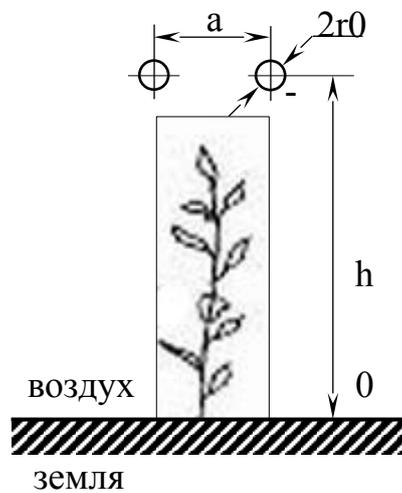


Рисунок 33. – Зона взаимодействия ЭМП с почвенными, растительными, воздушными, конструкционными материалами ЭС

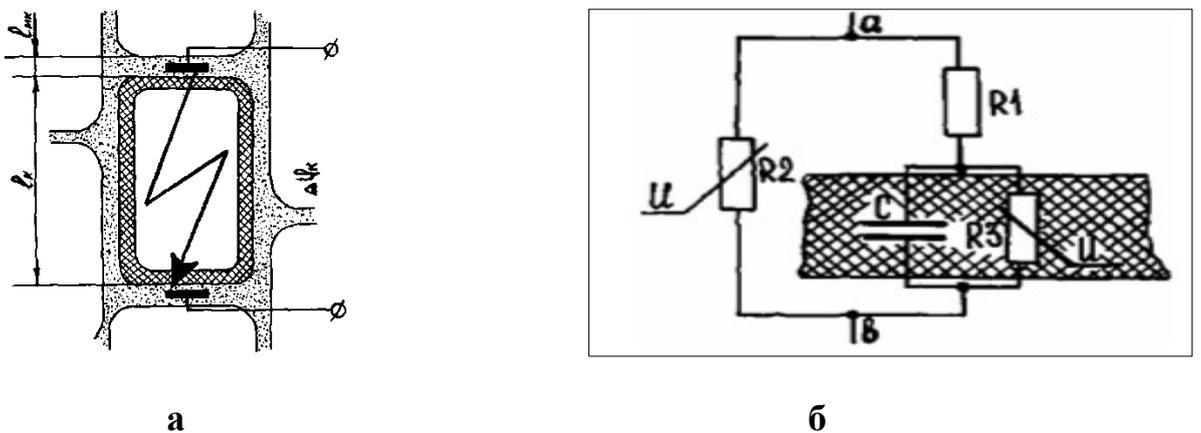
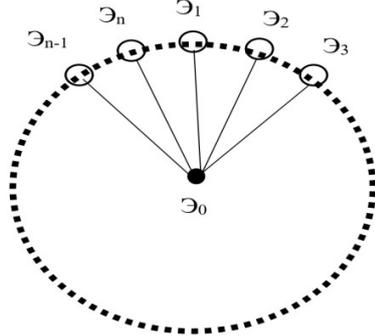
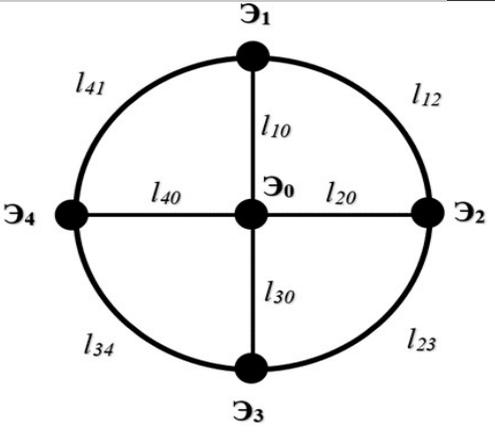
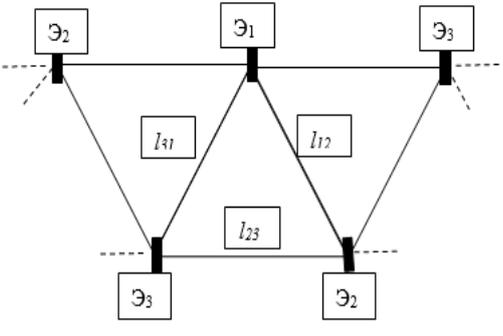


Рисунок 34. – К электрическому пробояю клетки: а - топология; б – эквивалентная схема замещения РТ (клетки)

Учитывая [47] аспекты исследования фактора управления процессами повреждения нежелательных РО следует отметить большой уровень потерь электрической энергии как повреждающего фактора при ЭПРО, что приводит к необходимости ее минимизации при практической разработке элементной базы ЭС и ЭП ЭТУ ЭПРО. Основываясь на наших положениях «к структурам, выполняющим функции выживания многолетних сорняков, т.е. у *K*-стратегов относятся все РТ корневой системы в верхнем слое почвы, а у сорняков с признаками *r*-стратегов - клеточные пространства тканей стебля и корней, прилегающих к основанию корневой системы» и «напряженность поля  $E_{nm}$ , при превышении которой наступает сквозной пробоя клеток вдоль растительных волокон сердцевины корня или стебля ниже, чем поперек», выдвинута гипотеза «эффективное ЭПРО корневой системы многолетних сорняков обеспечивает радиально-кольцевой принцип построения ЭС ЭТУ» (). Этот принцип построения реализуется применительно к пятиэлектродной модели ЭС, включающей: один основной электрод  $\mathcal{E}_0$ ; четыре периферийных электрода  $\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_4$ ; четыре радиальных ребра  $l_{10}-l_{40}$ ; четыре кольцевых ребра  $l_{12}-l_{41}$ . В нашей работе радиально-кольцевой принцип построения ЭС реализован на примере электрического повреждения РТ корневой системы многолетних сорняков трехфазным электрическим током с использованием топологии размещения фазных электродов по углам равностороннего треугольника.

Таблица 5

**Радиально-кольцевой принцип построения ЭС для эффективного ЭПРО корневой системы многолетних сорняков (верхняя строка) на примерах пятиэлектродной модели (средняя строка) и топологии размещения фазных электродов по углам равностороннего треугольника (нижняя строка)**

Описание	Схемотехническое решение
<p>Радиально-кольцевой принцип построения ЭС включает основной электрод <math>\mathcal{E}_0</math>, обеспечивающий электрический контакт с РТ, прилегающими к основанию корневой системы сорного растения, периферийные электроды <math>\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_n</math>, и радиальные ребра <math>l_{10}, \dots, l_{n0}</math>. При ЭПРО электрод <math>\mathcal{E}_0</math> контактирует с РТ сорняка. Между электродами <math>\mathcal{E}_0-\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_0-\mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_0-\mathcal{E}_n</math> через почву и РТ корневой системы этого сорняка проходит электрический ток, чтобы обеспечить ЭТП ЭПРО</p>	
<p>Пятиэлектродная модель ЭС включает: основной электрод <math>\mathcal{E}_0</math>, обеспечивающий электрический контакт с РТ, прилегающими к основанию корневой системы сорного растения; четыре периферийных электрода <math>\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_4</math>; четыре радиальных ребра <math>l_{10}-l_{40}</math>; четыре кольцевых ребра <math>l_{12}-l_{41}</math>. При ЭПРО электрод <math>\mathcal{E}_0</math> контактирует с РТ сорняка. Между электродами <math>\mathcal{E}_0-\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_0-\mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_1-\mathcal{E}_4</math> через почву и РТ корневой системы этого сорняка проходит электрический ток, чтобы обеспечить ЭТП ЭПРО. Продолжительность времени, в течение которого через этот сорняк проходит электрический ток, зависит от скорости движения ЭТУ и размеров сорняка</p>	
<p>Топология размещения фазных электродов <math>\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3</math> по углам равностороннего треугольника включает ребра <math>l_{12}, l_{23}, l_{31}</math>. При ЭПРО электроды контактируют с РТ различных сорняков. Между электродами <math>\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_2, \mathcal{E}_2-\mathcal{E}_3, \mathcal{E}_3-\mathcal{E}_1</math> через почву и РТ корневой системы сорняков проходит электрический ток, чтобы обеспечить ЭТП ЭПРО. Топология ЭС ЭПРО трехфазным электрическим током позволяет перемещение электродов над почвой, в верхнем слое почвы и по поверхности почвы, обеспечивая ее копирование</p>	

С точки зрения тенденций развития технологии ЭПРО и применимости ТТР в научно-технической литературе приведены достаточно разнообразные электроды и ЭС ЭТУ, которые классифицированы нами по разным признакам (Error: Reference source not found, ), не исчерпывающие всю их

полноту.

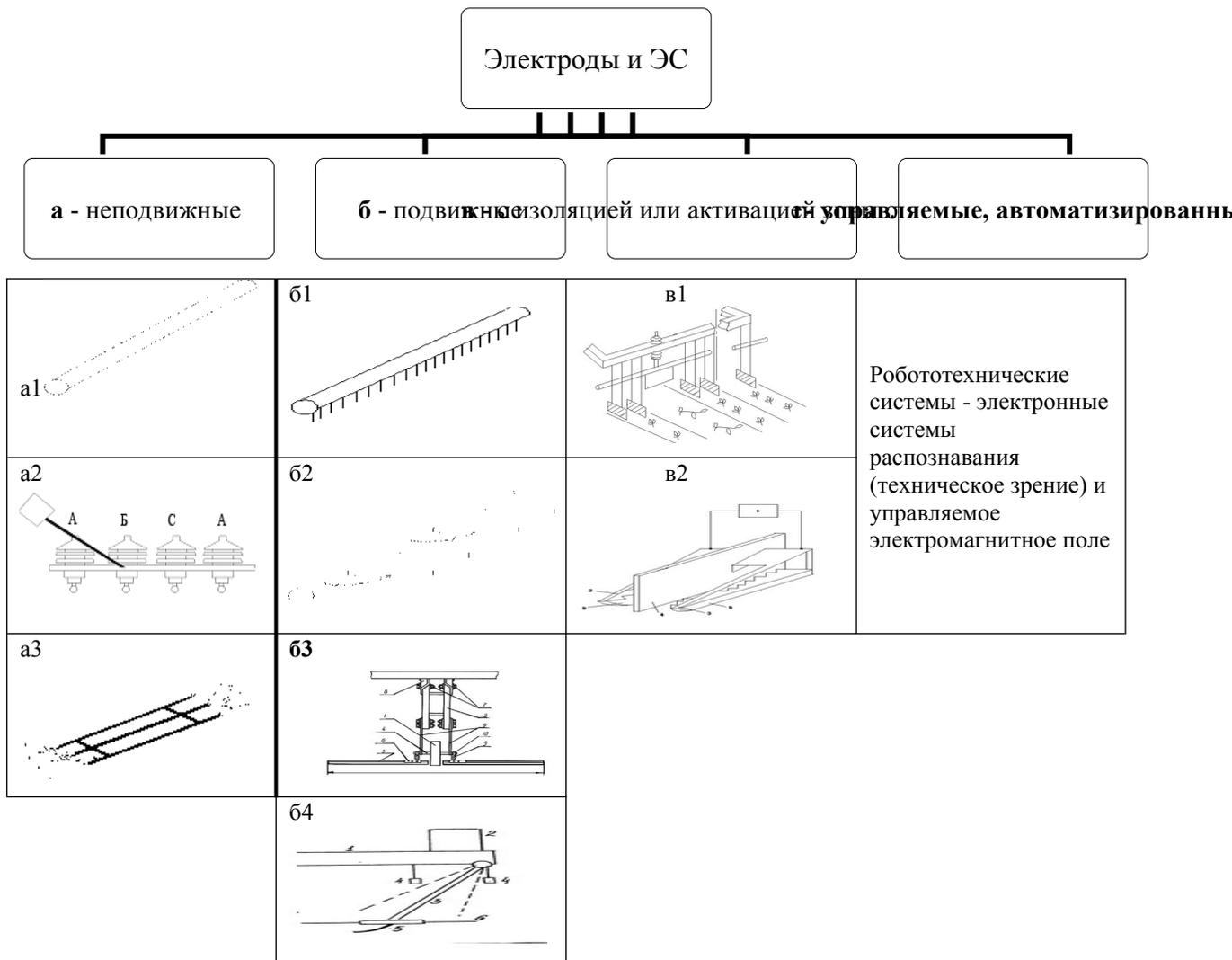


Рисунок 35. – Электроды и ЭС ЭТУ: **a1** - штанга; **a2**- опытной установки НИИОХ НПО «Россия»; **a3** - LW (США); **б1** - с токопроводящими проволочками; **б2** - с пружинными лепестками (США); **б3** - копирующий микрорельеф поверхности почвы (ЧИМЭСХ); **б4** - с датчиками регулирования положения рамы; **в1, в2** - с механическими делительными элементами (**в1** - LW-5, **в2** – ЧИМЭСХ, для предуборочной обработки ботвы)

Таблица 6

## Геометрия и сопротивление системы «электрод-почва»

Форма	Формула сопротивления	Геометрия
Полоса в почве	$R_{ЭП} = \rho_n \cdot \ln(2b^2/\delta \cdot h) / 2\pi \cdot b$ , где $\rho_n$ - удельное сопротивление почвы; $b = b_1 + b_2$ - общая длина кромки; $\delta$ - средняя ширина полосы; $h$ - глубина залегания (хода) полосы в почве	
Полоса на поверхности почвы	При $h=0$ $R_{ЭП} = \rho_n \cdot \ln(4b/\delta) / \pi \cdot b$	
Каток на поверхности почвы	При $\varphi = \pi$ $R_{ЭП} = \rho_n \cdot \ln(2b/d_k) / \pi \cdot b$ , где $d_k$ - диаметр катка. При $\varphi \ll \pi$ $R_{ЭП} = \rho_n \cdot \ln(4b/\delta) / \pi \cdot b$ , где $\delta = d_k \cdot \varphi / 2$ ; $\varphi$ - центральный угол в радианах	
Полоса над поверхностью почвы	$\frac{1}{R_{ЭП}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{pi}}$ , где $n$ - число растений (ветвей) в цепи «электрод-почва»; $R_{pi}$ - сопротивление $i$ -го растения в системе «электрод-почва» { $R_{pi} = R_{poi} + R_{cmi}$ ; $R_{poi}$ - сопротивление ткани корневой системы $i$ -го растения растеканию тока в почву; $R_{cmi} = 4\rho_m \cdot l_{cmi} / \pi \cdot d_{cmi}^2$ ( $\rho_m$ - удельное сопротивление ткани; $l_{cmi}$ - длина стебля $i$ -го растения в цепи «электрод-почва»; $d_{cmi}$ - диаметр ткани стебля $i$ -го растения)}. При $R_{poi}, d_{cti}, h = \text{const}$ и $n = b \cdot \delta \cdot Z_c$ $R_{ЭП} = (R_{po} + 4\rho_n \cdot h / \pi \cdot d_{ct}^2) \cdot l_{ct} / b \cdot \delta \cdot Z_c$ , где $Z_c$ - засоренность. При $h=0$ $R_{ЭП} = R_{po} / b \cdot \delta \cdot Z_c$	

Проведенная оценка энергетических показателей [51], разработанных установок по уничтожению нежелательной растительности, показывает что их применение будет способствовать повышению энергоэффективности (снижению энергоемкости) производства сельскохозяйственной продукции..

Эти положения позволяют развить ТТР ЭПРО в оперативной диагностике ЭТП и разработке нового класса электродов и ЭС (Error: Reference source not found, г: управляемые, автоматизированные ЭС; электронные системы распознавания, так называемое «техническое зрение»; ТТР ЭПРО для эффективного управления ЭМП в объемах с координатными границами – полосе захвата ЭС ЭТУ).

Для РТ использование математического моделирования позволяет сократить объем трудоемкого, длительного и дорогостоящего эксперимента. Особый интерес для электротехнологий составляет возможность исследования панорамы проводимости и диэлектрической проницаемости почвы, РО и электродов, а также процессов накопления и релаксации заряда в них под действием внешних факторов в пределах всего объекта или на определенной траектории. Следующим этапом НИОКТР является разработка аппаратуры для панорамного преобразования обозначенных параметров в электрический сигнал и применение соответствующих алгоритмов в документировании информации. Диапазон экспериментальных исследований – определение проводимости, диэлектрической проницаемости, рельефа поверхности и его изменения, амплитуд и частот ЭМП и вибраций, исследования пространственного распределения этих параметров в почве, РО и ЭС. Экспериментальные данные позволят развить теоретические представления об ЭТУ и их практическое применение, дополнить базу данных по схемам и свойствам РО и ЭП, формализовать методы синтеза структур ЭП по требованию задания.

## **Управление Продуктивностью меристемных растений энергоэффективными световыми технологиями (Большин Р.Г.)**

Производство семенного картофеля занимает важную позицию в сельском хозяйстве, и должно достигать 5 млн. тонн, занимать большие площади. Посадочный материал должен быть качественным: не иметь генетических отклонений, иметь высокий процент всхожести и плодовитости. Для реализации этих задач следует разрабатывать и внедрять новые инженерные технологии.

Учеными в области электрификации сельскохозяйственного производства доказана эффективность применения оптического излучения для получения дополнительной растениеводческой продукции, решены ряд теоретических и прикладных задач в области применения и создания источников излучения для сельскохозяйственных предприятий и биологических исследований.

Важнейшей задачей является увеличение продуктивности – найти пути для того, чтобы «вырастить два колоса там, где растет один» (К.А. Тимирязев). Для достижения этой цели необходимо научиться управлять фотосинтетической деятельностью растений. Так как фотосинтез – это основной процесс, при котором образуется сухое вещество растений. Согласно Ничипоровичу, биологический урожай равен сумме приростов сухой массы растения за каждые сутки вегетационного периода. Кроме того, накопление сухой массы зависит не только от интенсивности фотосинтеза, но и от коэффициента эффективности, что учитывает. Площади поверхности листьев и вегетационный период.

На практике более важен урожай хозяйственный, который возможно реализовать для нужд сельского хозяйства, чем биологический. Один из важнейших показателей хозяйственного урожая – это площадь листьев. Более высокие показатели урожая достигаются при быстром развитии

листовой поверхности в начале вегетационного периода. Следовательно, для получения наилучшего урожая, необходимо создать благоприятные условия для лучшего фотосинтеза растений именно в начале вегетационного периода.

Актуальным является повышение эффективности светодиодных (LED) фитоустановок для меристемного картофеля за счет научного обоснования наиболее эффективных доз спектральных составляющих зоны ФАР, позволяющих увеличить выход здорового элитного посадочного материала - меристемного картофеля и снизить потребление электроэнергии при его выращивании. Объектом исследования являлась система, состоящая из меристемы культуры картофеля, технических средств облучения и технологических мероприятий, позволяющая получить здоровый элитный посадочный материал при минимальных затратах.

При выполнении исследований применялись экспериментальные и аналитические методы исследования, использовались методы математического моделирования с применением программного обеспечения MS Excel, теоретические основы светотехники, электротехники, теории регрессионного анализа и математической статистики, методы прикладной экономики, а также современная измерительная аппаратура.

Растения синтезируют органические вещества из неорганических, поглощая фотосинтетически активную радиацию (ФАР). ФАР - часть оптического излучения с длинами волн от 380 нм – 740 нм, которые растения используют для фотосинтеза. Диапазон волн для фотоморфогенеза несколько шире - от 300 нм (ультрафиолетовый свет) до 800 нм (дальний красный) [56]. И если, оставив лишь спектр между 400 и 700 нм и блокировав остальной, то нарушатся другие процессы, что окажет негативное воздействие на рост растений и сократит показатели хозяйственного урожая. Доказано, что при освещении растений смешанным светом, интенсивность фотосинтетической деятельности растений возрастает, чем при освещении растений каждой длины волн в отдельности (эффект Эмерсона) [57].

На процесс фотосинтеза оказывают влияние: Солнечное излучение,

показатели температуры, содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе, обеспеченность водой.

Солнечное излучение оценивается по коэффициенту использования солнечной энергии при фотосинтезе. Показателем эффективности использования растением солнечной радиации, является коэффициент полезного действия фотосинтетически активной радиации (КПД ФАР).

В целом, на Земле КПД ФАР составляет 0.2 процента, что является ничтожно малым. Повышение эффективное использование энергии ФАР является одной из важнейших задач в физиологии и в селекции сельскохозяйственных растений, способствующей повышению урожайности культур. Для увеличения урожайности, необходимо рассчитать возможный уровень урожайности в зависимости от многих факторов, то есть научиться программировать урожайность, что позволит достигнуть высоких урожаев культур при невысокой себестоимости продукции.

Учитывая, что растения, поглощая солнечную энергию, при участии хлорофилла, зеленого пигмента, преобразуют ее в химическую энергию органических соединений и накапливают массу растений. Согласно Тимирязеву К.А., 95 процентов урожая формируется именно за счет фотосинтетической деятельности растений, то есть за счет энергии ФАР. В связи с этим, необходимо увеличить энергию света от солнца, или искусственного излучателя (фитоустановки) с таким спектром излучения, который необходим для достижения наивысших показателей урожая при наименьших финансовых затратах.

Для получения наибольшей продуктивности растений необходимо поддерживать требуемые параметры микроклимата, и в первую очередь дозу спектральных составляющих зоны ФАР [58], [59].

Для этого можно использовать сквозные цифровые технологии на основе компьютерных систем, которые способны выполнять творческие и интеллектуальные функции, традиционно считающиеся человеческими, то есть искусственный интеллект.

Управлять продуктивностью растений на стадии вегетации легче всего в

защищенном грунте, то есть в специальных помещениях или на земельных участках, оборудованных для создания искусственного микроклимата с целью выращивания сельскохозяйственных и овощных культур [60].

Одной из значимых сельскохозяйственных культур, является картофель. На наш континент, картофель был завезен в 1551 году и стремительно распространился по территориям Европы. В Россию картофель был отправлен из Голландии лично Петром I (по одной из версий) в 1716 году, который приказал распространить клубни «на расплод» на территории России. Это вызвало ряд недовольств, и не принесло результата. Но в 19 веке, при Николае I картофель все же начал распространяться и приобретать популярность среди населения. К началу 20 века, картофель стал считаться в России одним из основных продуктов питания. Картофель является основным сырьем для производства крахмала, который используется в пищевой, текстильной, бумажной и других промышленности. Кроме того, из него производят патоку, спирт, глюкозу, углекислоту. Так же, картофель и ботву, используют в качестве корма для скота.

Картофель размножается вегетативно, клубнями, но данный способ имеет ряд недостатков. Первое- это низкий коэффициент воспроизводства, что не позволяет быстро увеличивать площади посадок при необходимости. Второе – картофель имеет низкую сопротивляемость вирусным, бактериальным и грибным болезням, что приводит к значительному снижению урожая. Некоторые вирусы снижают урожай на 80 процентов.

Единственный способ получить здоровый и качественный материал – микрклональное размножение [33], [61].

Меристемная культура, которая позволяет быстро получить генетические копии растений, не зараженные вирусами и бактериями, с чистым генетическим материалом. Основные преимущества меристемной культуры – это высокий коэффициент воспроизводства и круглогодичное проведение работ.

Микрклональное размножение растений получает распространение в

сельском хозяйстве, создаются меристемные лаборатории в крупных растениеводческих предприятиях.

В основе Микрклонального размножения лежит уникальная способность растительной клетки: одна клетка может дать начало целому растительному организму, свободному от вирусной, бактериальной и грибной инфекции. Существующие сорта картофеля имеют большой биологический потенциал, и позволяет получать в оптимальных условиях до 15 кг/м<sup>2</sup>. Если предположить, что за каждую такую операцию растение разделяется минимум на три новых зачатка, а интервал между разделениями составляет 25 дней, то, теоретически, за год может быть получено более 14 млн растений из одного меристемного зачатка [33], [61].

Недостатком данного метода является сложность и довольно высокая стоимость оборудования и соответственно высокая стоимость выходной продукции [62].



*Рисунок 36. – Фрагмент меристемной лаборатории*

В настоящее время широкое применение при выращивании различных растений получили световые фитоустановки, которые дополняют спектры дневного света (как правило красный и синий), или досвечивают растения, увеличивая длину светового дня [63], [64].

Для этих целей используют как люминесцентные лампы, например

ЛБ40, ЛБ80, так и светодиодные фитоустановки, которые позволяют экономить электроэнергию [35].

В настоящее время в растениеводстве фитоустановки используются, в основном, для увеличения длины светового дня, что дает в результате увеличение зеленой массы за счет увеличения времени фотосинтеза при низменных показателях энергии ФАР. Разработка и внедрение прогрессивных интеллектуальных технологий фитоустановок позволит снизить себестоимость продукции и повысить продуктивность.

Еще с середины 20 века ученые проводили эксперименты над увеличением к.п.д. фотосинтеза. Так как только 0,2 процента энергии ФАР усваивают растения, но теоретически есть возможность усвоить до 10 процентов энергии ФАР. В 1963 году Ничипорович А.А., показал, что максимальный к.п.д. фотосинтеза имел место при длине волны 680 нм.

При выращивании растений под фитоустановками необходимо знать, не только наиболее эффективный спектральный состав излучения, но и дозы этого излучения для получения наибольшего урожая сельскохозяйственных культур. По данным Протасовой Н.Н. (ИФР) отсутствие в излучении ламп отдельных участков спектра приводит к нарушению нормального роста растений () [37], [39].

*Таблица 7*

### **2Влияние спектра излучения на формирование растений**

Длина волны, нм	Влияние на растения
400...500 (синий свет)	Растения низкорослые с низкой продуктивностью, стебли укорочены, листья утолщены и мелкие
500...600 (зелёный свет)	Растения с вытянутыми осевыми органами, тонкими листьями и с низкой продуктивностью
600...780 (красный свет) особенно важна зона 640... 680	Интенсивный рост листьев, осевых органов. Недостаток этого излучения приводит к развитию неполноценных органов и, следовательно, к низкой урожайности

Целесообразно создать источник излучения, имеющий следующее

соотношение длин волн: от 380...490 нм - 20...25%; от 490...500 нм - 20...25%; от 600...700 нм - 60...50%, так как каждая из трех основных ФАР (синий, зеленый, красный), по отдельности, не позволяет полноценно развиваться растениям [65], [66].

Кроме того, большое значение имеет изменение спектральной плотности облучения в течении дня, в зависимости от происхождения растений. Например, короткодневные растения более восприимчивы к синим спектрам излучения, а длиннодневные к красным, а синий наоборот замедляет их развитие. Таким образом, искусственно воздействуя на растения различной плотностью излучений и правильно подобрав спектральный состав можно сокращать продолжительность вегетации растений. В связи с чем необходимо воссоздать наилучшую дозу спектральных составляющих зоны ФАР для конкретной культуры в защищенном грунте, в зависимости от ее исторической родины.

Ввиду того, что исторической родиной картофеля являются южноамериканские страны Перу, Эквадор, Боливия, был проведен анализ изменения доз спектральных составляющих зоны ФАР, характерных для государства Перу, что считается генетической родиной Картофеля. Для сравнения был взят Краснодарский край – основной аграрный регион России. На основании анализа, был научно обоснован метод и разработана наиболее эффективная светодиодная фитоустановка.

На исторической родине картофеля – государства Перу Солнце ежедневно поднимается над горизонтом почти до  $79^\circ$ , в его излучении наряду с красным, желтым и зеленым спектрами, имеется так же значительное количество синих, фиолетовых и ультрафиолетовых длин волн.

Большое значение для растений имеет продолжительность светлого периода суток – фотопериодизм. Длина светового дня в столице Перу – городе Лима, на протяжении всего года, не изменяется и составляет примерно 12 ч. В Краснодаре длина дня колеблется от 10 до 16 ч.

**Изменение спектрального состава солнечного излучения от  
высоты солнца в % по Клешнину А.Ф.**

Вид излучения	Высота солнца, град						
	0,5	5	10	20	30	50	90
<b>Видимое</b> 400...760 нм., в том числе:	31,2	38,6	41	42,7	43,7	43,9	45,2
фиолетовое 400...440 нм	0	0,6	0,8	2,6	3,8	4,5	5,4
синее 440...490 нм	0	2,1	4,6	7,1	7,8	8,2	9
зелёное 490...565 нм	1,7	2,7	5,9	8,3	8,8	9,2	9,2
жёлтое 565...595 нм	4,1	8	10	10,2	9,8	9,8	10,1
красное 595...760 нм	25,4	25,2	19,7	14,5	13,5	12,2	11,5
<b>Ультрафиолетовое</b> 295...400 нм	0	0,4	1	2	2,7	3,2	4,7
<b>Инфракрасное</b> более 760 нм	68,8	61	58	55,3	54,6	52,9	50,1
Общее излучение солнца в оптическом диапазоне 400...780 нм, %	100	100	100	100	100	100	100

Биологи считают, что на развитие любой овощной культуры влияют данные генетической памяти растения о месте, откуда оно родом. Уменьшение необходимых доз вызывает нарушения в росте растений, и соответственно, уменьшение урожайности. Исходя из того, что родиной картофеля является территория государства Перу, была смоделирована схема работы фитоустановки, моделирующая получение состава солнечного излучения для родины картофеля Перу, и для сравнения, Краснодарского края, как наиболее южной точки России, близкой к нужным показателям.

Схема управления контроллером была написана на языке программирования FDD и позволяет автоматически включать светодиоды фитоустановки в зависимости от изменения времени суток и высоты солнца над горизонтом, моделируя дозы облучения нужных спектров для заданного региона. То есть, при недостаточной освещенности, программа автоматически включает необходимые группы светодиодов фитоустановки, поддерживая требуемую дозу облучения.

Таблица 9

**Среднегодовой состав солнечного излучения на родине картофеля  
государства Перу**

Вид излучения	Фиолетовый	Синий	Зелёный	Жёлтый	Красный	УФ	Всего
Среднегодовое значение, %	8,81%	16,04 %	17,88%	21,54%	28,98	6,75%	100%
Время действия, час	12,82						

Таблица 10

**Среднегодовой состав солнечного излучения в Краснодаре**

Вид излучения		Фиолетовый	Синий	Зелёный	Жёлтый	Красны й	УФ	Всего
Март	Среднегодовое значение, %	5	13	14	18	28	5	100
	Время действия, час	11,61						
Апрель	Среднегодовое значение, %	7	14	18	17	29	5	100
	Время действия, час	13,22						
Май	Среднегодовое значение, %	9	17	17	23	32	6	100
	Время действия, час	14,93						
Июнь	Среднегодовое значение, %	7,98	15,74	17,90	21,18	31,11	6,10	100
	Время действия, час	15,59						
Июль	Среднегодовое значение, %	8,08	15,83	17,90	21,14	30,81	6,24	100
	Время действия, час	15,38						
Август	Среднегодовое значение, %	8,08	15,83	17,90	21,14	30,81	6,24	100
	Время действия, час	14,32						

В опытах, проведенных на базе ФГБНУ УНИИСХ были реализованы следующие режимы облучения:

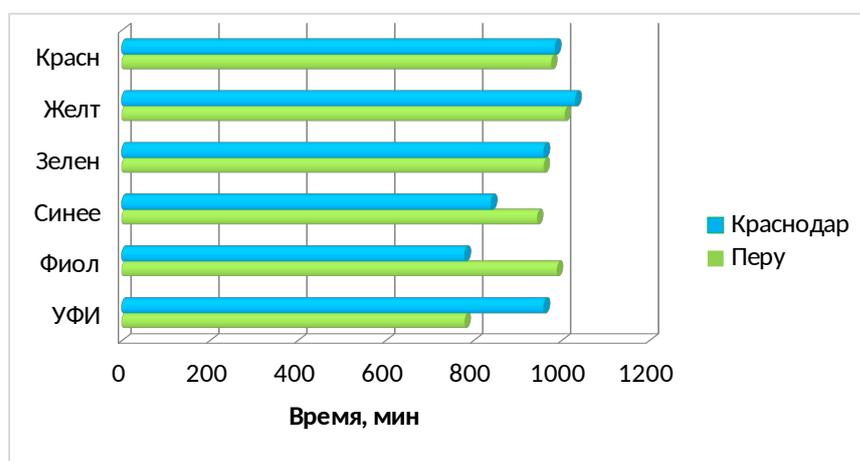
1. Имитация солнечного спектра генетической родины картофеля

государства Перу в течение 30 дней;

2. Имитация солнечного спектра для Краснодара в течение 30 дней: при этом в первые 10-ть дней как в марте, затем 10 дней как в апреле и оставшиеся 10 дней как в мае;

3. Контроль – освещение (облучение) лампами ЛБ 80, используемыми в меристемной лаборатории ФГБНУ УНИИСХ.

В качестве воспринимающих элементов для обеспечения работы фитоустановки, использовались различные фотодатчики, для которых под каждый спектральный состав были применены различные светофильтры [67].



*Рисунок 37. – Сравнение экспозиций доз спектральных составляющих зоны ФАР региона Перу и Краснодарского края*

Анализ показал значительные отличия зоны Перу и Краснодарского края в коротковолновой части излучения зоны ФАР.

Эксперименты проводились в меристемной лаборатории на базе ФГБНУ Удмуртский НИИСХ Удмуртской Республики.

В процессе исследования проводились сравнения использования трех различных фитоустановок:

- Сине-красная LED фитоустановка с соотношением синих и красных светодиодов 37% и 63%.

- Сине-красно-белая LED фитоустановка с соотношением синих,

красных и белых светодиодов соответственно 25%; 50% и 25%.

- Люминесцентный светильник с электронным ПРА и лампами ЛБ 80. (Контроль), повсеместно используемый в сельском хозяйстве

Освещенность измерялась люксметром, измерения ультрафиолетового излучения – радиометром (ТКА-АВС). Результаты исследования показали прирост урожая при использовании LED фитоустановки со смешанными спектрами излучения (сине-красно-белая). В LED фитоустановка была усовершенствована: были добавлены светодиоды других спектров, управляющий модуль (ПЛК), датчики для контроля доз облучения, появилась возможность программного управления группами светодиодов в различном порядке и независимо от других.

Интеллектуальный светодиодный светильник, позволяющий регулировать спектральный состав излучения и разработанный представителями ФГБОУ ВПО Ижевской ГСХА, испытывался при выращивании меристемного картофеля в меристемной лаборатории ФГБНУ УНИИСХ. Облучательная установка, включает в себя красные, зеленые, желтые и сине-фиолетовые светодиоды. Размеры LED фитоустановки составляют 650 x 130 мм. В меристемной лаборатории поддерживалась температура в пределах  $+27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , фотопериод составлял 16 часов в сутки.

Площадь поверхности листьев измерялась прибором проектором через каждые 10 дней и определялась как средняя арифметическая от суммы двух взаимно перпендикулярных проекций листьев.

В ходе проведенных опытов было установлено, что наибольшая площадь листьев оказалась при выращивании растений под LED фитоустановкой со схемой региона Перу. Кроме того, применение установки имитирующий спектр Перу позволяет снизить удельный расход электрической энергии на 50%.

Таблица 11

**Исследование влияния спектрального состава излучения фитоустановок  
на развитие меристемного картофеля**

Параметры	Схема Перу	Схема Краснодар	ЛБ 80 (контроль)
Действительное время работы облучательной установки, час	2080	2240	2400
Расход электроэнергии, %	87	93	100
Изменение площади листьев, %	126	116	100
Удельные затраты электроэнергии, %	43,5	48,2	100

Анализ структуры всех затрат на выращивание одного меристемного растения показывает, что 17% приходится на облучение растений.

Таблица 12

**Результаты расчета экономической эффективности**

Показатель	Размерность	Обозначение	Вариант	
			ЛБ 80	LED 24
Капитальные вложения	Руб.	К	23 780	274 560
Эксплуатационные затраты	Руб.	ЭЗ	394 041	279 722
Стоимость потребляемой электроэнергии	Руб.	Сэ	202 176	53 914
Амортизационные отчисления	Руб.	Са		
на лампу	Руб.	Сал	72	503
на арматуру	Руб.	Саарм	6 443	12 676
Затраты на ЗП электромонтёра	Руб.	Сзп	180 000	156 000
Затраты на текущий ремонт, 12,5% от К	Руб.	Стр	2 972	34 320
Прочие затраты, 10% от К	Руб.	Спр	2378	22 309
Нормативный коэффициент эффективности капиталовложений	О.е.	Ен	0,15	
Приведённые затраты	Руб.	ПЗ	397 608	320 906
Отношение приведённых затрат к выходу продукции	Руб/проб.	ПЗ/А	19,88	13,37
Годовой экономический эффект	Руб.	Гээ		76 703
Срок окупаемости	Год	Т		4,18

Использование LED фитоустановки с имитацией спектра Перу позволяет сократить сроки всхожести меристемных растений картофеля на 4 дня (до момента возможности пересадки в грунт) и получить за счет этого за год примерно на 15% растений больше по сравнению с контролем. Кроме

того, примерно на 50% снижается потребление электрической энергии, снижение эксплуатационных затрат в виду более длительного срока службы излучателей, в отличие от повсеместно используемых ламп (ЛБ80), что приводит к существенной экономии денежных средств.

Основные выводы заключаются в следующем:

1. Анализ специальной отечественной и зарубежной литературы показал, что имеется множество светодиодных (LED) фитоустановок, применение которых позволяет получить практически любую дозу спектральных составляющих зоны ФАР, но регулировка спектра осуществляется, как правило, вручную. Применение ПЛК позволило бы повысить эффективность LED фитоустановок и привести к увеличению выхода продукции при уменьшении затрат.

2. Предложена математическая модель, описывающая влияние дозы спектральных составляющих излучения зоны ФАР на продуктивность меристемного картофеля, которая показала, что имитация спектра излучения Перу позволяет уменьшить время выращивания меристемного картофеля на 4 дня и снизить удельные затраты примерно в 1,3 раза.

5. В ходе экспериментов выявлено, что наиболее эффективной является фитоустановка, имитирующая спектр Перу, применение которой позволяет снизить расход электрической энергии на 50% и повысить выход продукции на 15%. Ожидаемый экономический эффект составляет около 76 тыс. руб., доход от сэкономленной электроэнергии равен 148 тыс. руб. (на момент исследования), при сроке окупаемости около 4 лет.

## **Сельскохозяйственная кибернетика (Анашин Д.В.)**

Сельское хозяйство – неотъемлемая часть хозяйственной деятельности человека на протяжении многих тысяч лет. Долгое время оно имело исторически сложившиеся, практически неизменные формы. Однако, индустриализация и техническая революция человечества отразилась и на сельском хозяйстве. Первая техническая революция была направлена на механизацию и замену мускульной силы машинами в производстве. Паровая машина совершила качественный скачок во всех сферах деятельности человека, в т.ч. и в сельском хозяйстве. Вторая, научно-техническая революция, произошедшая в XX веке, в значительной степени связана с появлением вычислительных машин. Если первая техническая революция затрагивала в основном материальные и энергетические аспекты производства, то вторая во многом обращена именно в сторону информационной составляющей. Современные технологические процессы в сельском хозяйстве невозможно организовать без применения электрической энергии. Разделение электротехники на энергетику и технику связи является условным и связанным с историей становления этих разделов, так, техника связи может работать с двигателями различных мощностей и с токами различной силы. Технически работа с информацией реализуется как раз с помощью техники связи – как на макроуровне, так и на микроуровне: большинство операций, совершаемых компьютером – это операции коммутации, совершаемые на основании некоторой логики. Таким образом, сегодняшнее сельскохозяйственное производство невозможно без разнообразной автоматизации с использованием вычислительной техники и информационной составляющей технологических процессов.

В середине прошлого века для систематизации проявлений информационной составляющей в различных областях науки и техники был введен в обращение термин кибернетика. Слово кибернетика происходит от

греческого κυβερνητική («кибернетики»), что означает «управление». Слово «кибернетика» впервые употребил Платон в диалоге «Законы». Впервые в научном смысле слово «кибернетика» использовал французский физик и математик Андре-Мари Ампер в своем труде «Эссе о философии наук» (1834 год) для описания гражданского управления. Позднее, уже в 20 веке, этот термин был использован Норбертом Винером в его книге «Кибернетика» при изучении проблем управления и общения у животных и для построения вычислительных машин. В дальнейшем, принципы, заложенные Н. Винером были переосмыслены и развиты, границы кибернетики сильно расширились. Заметный след в кибернетике оставили такие ученые как У. Эшби, К. Шеннон, А. Тьюринг, А. Розенблют. В Советском Союзе большой вклад в развитие кибернетики был внесен учеными А. Колмогоровым, В. Глушко и др. Многие области научной и хозяйственной деятельности человека происходят или тесно связаны с кибернетикой. Как пример можно привести такие как: искусственный интеллект, информатика, теория управления, робототехника, экономическая кибернетика, социальная кибернетика и др. В общем виде кибернетику можно определить, как науку о закономерностях получения, хранения, преобразования и передачи информации в управляющих системах.

Отраслью науки, изучающей технические системы управления, является техническая кибернетика. Долгое время кибернетика развивалась параллельно с наукой, изучающей автоматику в технике. Принципы, использующиеся в кибернетике во многом близки принципам, использованным в САР (системах автоматического регулирования), и САУ (системы автоматического управления). Основными принципами кибернетики являются принцип «черного ящика» и закон обратной связи. Принцип «черного ящика» ввел английский ученый Уильям Эшби. Этот принцип позволяет исследовать поведение системы по тому, как она реагирует на внешние воздействия абстрагируясь от ее внутреннего устройства.

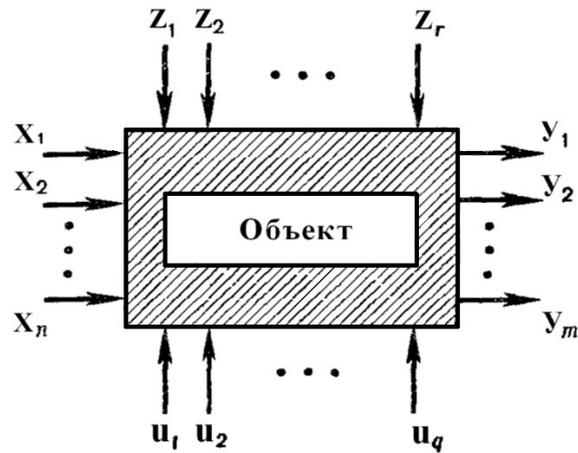


Рисунок 38. – Принцип «Черного ящика»

На Рисунок 38:  $x$  - входы в систему;  $y$  – выходы;  $z$  – возмущающие воздействия;  $u$ - управляющие воздействия. В некотором смысле это напоминает термодинамику – мы судим о состоянии системы по внешним проявлениям, не вдаваясь в особенности происходящих в системе процессов.

Закон же обратной связи заключается в том, что объектом управления можно управлять, получая определенный результат работы системы на выходе изменением входных сигналов на основании информации, получаемой о состоянии объекта. При этом принципы и законы кибернетики применимы как к управлению конкретным техническим средством, так и к логистике по управлению предприятием. По мере развития вычислительной техники все более заметно сближение технической кибернетики и науки автоматизации. Одним из важнейших достижений в этом направлении является разработка и широкое использование метода математического моделирования. Математическое моделирование позволяет проводить эксперименты не с реальными физическими объектами, а с их математическим описанием с применением компьютерных программ. Однако, не смотря на тесную связь технической кибернетики с автоматикой и телемеханикой, совпадения наук не происходит, т.к. в технической кибернетике не рассматриваются вопросы конструирования конкретной аппаратуры.

Использование автоматики в с/х производстве в сравнении с промышленным производством в чем-то близко, а в чем-то имеет свои особенности [68]. К особенностям следует отнести то, что с/х производство имеет дело не только с техникой, но и с живыми объектами и почвой. К особенностям также надо отнести рассредоточенность управляемых объектов на значительные расстояния, возможные в силу ряда причин перебои с энергоснабжением и связью. Также существенное влияние на технику оказывают природные факторы, такие как перепады температуры, порывы ветра, дожди и снег, а это в значительной мере формирует неоднородные и случайные возмущающие воздействия. Производственные процессы в сельском хозяйстве можно разделить на два класса: животноводство и полеводство. При таком разделении также есть свои особенности при автоматизации технологических процессов. Тем не менее, существуют одинаковые требования, предъявляемые к средствам автоматики: надежность; ремонтпригодность; унификация элементной базы; устойчивость к воздействиям со стороны климата; простота в обслуживании.

В зависимости от функций, выполняемых автоматическими устройствами в сельском хозяйстве, можно выделить: контроль; защита; дистанционное и автоматическое управление. Неотъемлемой частью автоматики является сбор и обработка информации. Обработка информации на сегодняшний день осуществляется с использованием цифровой вычислительной техники, построенной на основе двоичной системы счисления.

Реальностью сегодняшнего дня является потребность в качественном изменении в отношении к сельскохозяйственному производству, выраженному в стремлении существенного увеличения производительности труда сельхозработников, увеличения объемов готовой продукции, снижение себестоимости и повышения качества выпускаемой продукции[69]. Выполнение таких высоких требований возможно только при широкой цифровизации технологических процессов, что нашло свое отражение в

концепции «Цифровое сельское хозяйство», разработанной совместно министерством сельского хозяйства, министерством цифрового развития, министерством науки и высшего образования и российской академией наук. Данная концепция соответствует Указу Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы». В частности, в этом указе дано определение цифровой экономики: «Цифровая экономика - хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг». Целью цифровизации сельского хозяйства является достижение существенного прироста эффективности и устойчивости его функционирования за счет кардинальных изменений в качестве управления, как технологическими процессами, так и процессами принятия решений на всех уровнях иерархии, базирующихся на современных способах производства и дальнейшего использования информации о состоянии управляемых подсистем и их элементов, а также состояний экономического окружения сельского хозяйства.

В концепции «цифровое сельское хозяйство» обозначены следующие задачи: создание баз данных отчетности сельскохозяйственных предприятий; базы данных о состоянии продовольственных и ресурсных рынков; базы данных результатов интеллектуальной деятельности НИИ аграрного профиля и сельскохозяйственных вузов; базы данных форм отчетности органов управления АПК субъектов Российской Федерации; создание экономико-математической модели оптимизации сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности с учетом анализа и прогнозирования основных агропродовольственных рынков.

Создание и внедрение компьютерных систем управления, планирования и использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве на разных уровнях – поле, хозяйство, муниципалитет приведет к развитию следующих направлений: умное поле, умный сад, умная теплица, умная ферма.

Рассмотрим направление умное поле. Целью этого направления является создание и внедрение интеллектуальной системы управления и планирования при использовании земель в сельскохозяйственном производстве на разных уровнях на основе цифровых технологий и методов компьютерного моделирования. Среди основных мероприятий в этом направлении надо выделить создание системы автоматизированного планирования оптимального использования земель в сельском хозяйстве, включающей:

- сбор, актуализацию и хранения данных о состоянии земель;
- мониторинг состояния и использования земель;
- многоцелевую оценку пригодности земель и моделирование потенциальной урожайности;
- прогнозирование урожайности с/х культур;
- планирование размещения с/х угодий и посевов отдельных культур;
- планирование развития АПК на федеральном и региональном уровнях;
- формирование реестров и паспортов земель, используемых предприятиями сельскохозяйственного направления для ведения сельскохозяйственного производства;
- формирование базы данных о постановке земельных участков сельскохозяйственного назначения на государственный кадастровый учет, кадастровой стоимости земельных участков;
- перераспределение земель при реформировании сельскохозяйственных организаций (банкротстве, реорганизации);
- разработке мероприятий по улучшению сельскохозяйственных угодий, освоению новых земель, восстановлению и консервации

- сельскохозяйственных угодий, рекультивации нарушенных земель,
- защите земель сельскохозяйственного назначения от эрозии, селей, подтопления, заболачивания, иссушения, уплотнения;
  - создание сети центров повышения квалификации и обучения специалистов.

Рассмотрим умную теплицу. Современный агрокомбинат на своих предшественников 20-тилетней давности похож только формой теплиц. Цеха для выращивания овощей из стекла, бетона и стали высотой в 4-6 м вместо привычных 2-х. Никаких грядок и ручного полива. Первое впечатление, что томаты или огурцы растут в воздухе и от корней опутаны проводами и шлангами; капельницы, подающие раствор - с автоматическим управлением, вместо земли целлофановые брикеты с искусственной ватой. Эта система полива – гидропоника: метод выращивания растений без почвы в твёрдом субстрате или питательном растворе. Минеральная вата – это не заменитель почвы, это ёмкость, где крепятся корни растений. Для одного саженца её нужно максимум 8 л, вместо 30 л привычной земли. Вату не надо вскапывать, рыхлить и пропалывать. Главное её преимущество – стерильность. Соответственно, в ней нет болезней, вредителей и сорняков. Поливают саженцы не обычной водой, а специальным питательным раствором. Все ингредиенты смешивает компьютер. Дозировки строго по формулам и выверены до миллиграмма. Доставка раствора проходит по капельным трубкам индивидуально к каждому растению, причём настолько равномерно, что в любой точке теплицы эта вылитая норма будет везде одинаковая, заданная агрономом. Ещё одно преимущество компьютера перед человеком в том, что он как врач на разных этапах выписывает растениям нужные рецепты – во время роста ботвы им нужно больше азота, во время цветения – калия, во время роста плодов целого набора витаминов. Цеха, где выращивают зелень, другие: салаты растут в лотках, им минеральная вата не нужна. Капля за каплей к каждому лоточку течёт питательный раствор, такая технология носит название проточной гидропоники. Горшочек с рассадой

салата помещается в лоток, куда несколько раз в час компьютер подаёт питательный раствор.

В паузах между поливами корни дышат. Под воздействием правильного питательного раствора сроки вызревания салата сокращаются: по своей биологии салат имеет 100-110 дней по развитию от начала посева до получения продукции, а гидропоника позволяет ускорить этот процесс. И готовую продукцию в зависимости от сезона можно получить за 28 - 34 дней. Особенно это актуально в Якутии, Южном Сахалине и других регионах, где продолжительный зимний сезон. Благодаря гидропонике листья салата получаются чистыми. Работник достаёт из лотка горшочек с салатом, обрабатывает корни, упаковывает и отправляет на склад. Сочным и свежим такой куст остаётся до 7-ми дней. В каждом современном агрокомбинате есть свой гидрометцентр. Компьютер не только кормит растения, он за ними ухаживает: следит за погодой в теплице - чтобы корням было теплее, а верхушкам прохладнее и не было душно. Рост и развитие растений зависят во многом именно от микроклимата в теплице. Метеостанция, которая имеется в теплице, отслеживает скорость и направление ветра и наружную температуру воздуха. В соответствии с этим программа компьютера рассчитывает, какую температуру теплоносителя необходимо подать в трубы отопления. Скорость и направление ветра очень важно знать, потому что, если, например, направление ветра с севера и температура достаточно низкая, то температура в теплице будет падать гораздо быстрее по сравнению с ветром, если он будет южный. Одной из самых современных разработок агроинженеров является теплица, работающая по методу аэропоники. Купол такой теплицы – из целлофана высотой порядка 10 м. Помидоры, огурцы и салаты выращиваются, находясь в воздухе, корни также находятся в воздухе. А все необходимые для развития вещества поступают с питательным раствором через форсунки системы непрерывного орошения. Компьютер анализирует температуру, влажность в теплице и снаружи. Примерно раз в 10-15 мин. запускает опрыскиватель. Питательный раствор подаётся в виде

взвеси. Через микрокапли корни впитывают всё необходимое для роста и плодоношения. При этом они просто висят в воздухе, но не пересыхают.

Лишний раствор стекает в систему дренажа, фильтруется от примесей и снова подаётся на растения. Для того, чтобы получить килограмм томатов в открытом грунте, для растений необходимо 200 л воды. В данном случае воды требуется только одна десятая часть от воды, потребляемой растениями в открытом грунте. В обслуживании такая теплица достаточно проста. Компьютер следит за ростом растений. Задача человека – высадить рассаду и собрать урожай. Частота отверстий в колонне регулируется в зависимости от культуры. Согласно исследованиям агрономов по производительности этот метод превосходит гидропонику, так, с 1 кв. м можно получать 200 кг листового салата, 200 кг укропа, петрушки, кинзы и других овощных растений; огурцов – с 1 кв. м в год можно получать порядка 60 кг, а помидор – порядка 50 кг. Таким образом, использование автоматического управления теплицами с применением электронной вычислительной техники позволяет снизить затраты и повысить эффективность производства плодоовощной продукции.

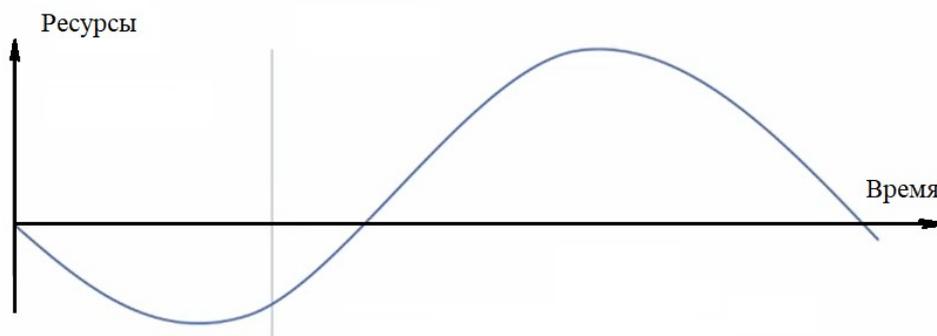
Повышение качества производимой сельскохозяйственной продукции и улучшение собираемости налогов государством призвана осуществить система контроля, построенная на технологии блокчейн: технологии, которая окажет наибольшее влияние в ближайшие несколько десятилетий - это технология цепочки блоков транзакций. По сути, эта технология является следующим поколением интернета. У сегодняшнего интернета существует ряд проблем. Одна из них – проблема информационной безопасности [60]. Технология блокчейн позволяет решить эту проблему. Цифровые активы собраны не в одном месте, а они распределены по глобальному реестру с помощью криптографии высшего уровня. Когда операция произведена, запись об этом появляется одновременно на многих тысячах компьютеров. Каждый интервал времени, например, каждые десять минут, в ходе некоей пульсации сети создаётся новый блок, хранящий информацию об операциях

за это время. Потом последний блок соединяется с предыдущим блоком и с ещё более ранним блоком, создавая цепочку блоков. Блоки привязаны ко времени, как бы скреплены цифровой нитью. Если бы кто-то захотел взломать некоторый блок, надо было бы взломать этот блок и все предыдущие блоки, всю историю информационных блоков на этом блокчейне. И не на одном компьютере, а на тысячах машин, использующих высокоуровневое шифрование, в одно и то же время. Что вряд ли реализуемо. Вертикально выстроенные защищенные информационные цепочки позволяют проследить историю товара от производителя до потребителя. Использование таких информационных технологий позволит избежать большого количества посредников, движение товара возможно осуществить за меньшее время и снизить себестоимость товара. Информационные технологии блокчейн могут облегчить поиск необходимой техники для производства и трудовых ресурсов. Для этого только необходимо обозначить приоритетные критерии. Используя эту технологию, можно параллельно с производственными задачами закрывать возникающие юридические вопросы, заключать всевозможные договора. Оплату тут же можно производить с использованием защищенных цифровых финансовых инструментов. Используя информационные технологии можно выбирать добросовестных поставщиков – репутационная информация всегда в наличии. Имея хорошую репутационную информацию, проще решать вопросы с кредитами, и тут же их получить. Все это значительно ускорит и качественно изменит в положительную сторону сельскохозяйственное производство.

Все большее значение для решения технологических и социальных задач в сельском хозяйстве играет робототехника. С определением понятия робота и какие функции роботы выполняют, можно подробно ознакомиться в ГОСТР 60.0.0.4-2019. Примерами использования роботов в сельском хозяйстве могут служить роботы – кормораздатчики, роботы- уборщики навоза, роботы- дояры, роботы- сборщики земляники, роботы- сортировщики. Роботы в сельском хозяйстве могут и должны заменить

малоквалифицированный тяжелый труд человека. Сегодня мы живем в период искусственных ограничений со стороны зарубежных поставщиков, комплектующих для производства робототехники.

Поэтому существует потребность в импортозамещении и решения собственными силами стоящих задач. Жизненный цикл технического изделия можно представить в виде кривой:

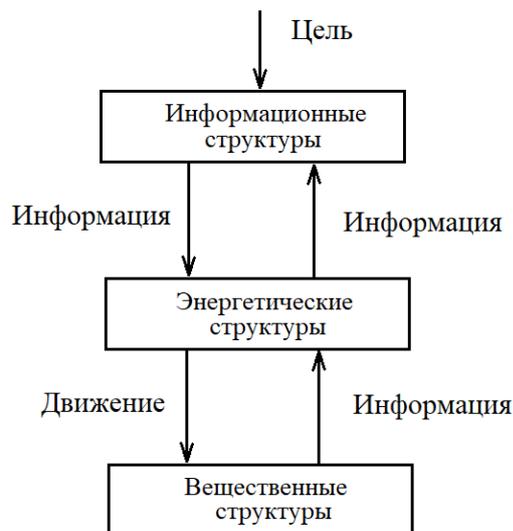


*Рисунок 39. – Жизненный цикл технического изделия*

В самом начале необходимо определиться с техническими решениями, провести необходимые расчеты, изготовить и испытать опытные образцы. На это уходит определенное время и тратятся некоторые ресурсы. С какого-то момента времени начинается производство и проект выходит на уровень прибыли. Это известная S-образная кривая развития. Первичный, затратный этап развития техники можно и нужно снижать на основе компьютерных расчетов с применением математических моделей. Следующее. Одной из серьезных проблем в робототехнике является проблема ориентации роботов.

Таким образом, мы видим, что потребности в применении вычислительной техники и кибернетики для эффективного развития сельского хозяйства велики и неоспоримы. Вернемся к рассмотрению технической кибернетики. Материальный мир в своей основе состоит из трех компонентов – вещественных, энергетических и информационных. Они составляют единую систему, в которой информационные составляющие играют определяющую роль. В них формируются управляющие воздействия на энергетические составляющие согласно заложенному алгоритму и системе

обратных связей. Проявление энергетических составляющих реализуется посредством вещественных структур.



*Рисунок 40 – Принципиальная система управления*

Из этой схемы видно, что при одних и тех же материальных и энергетических ресурсах наиболее эффективным может быть хозяйство и техника при использовании оптимальных алгоритмов решения поставленных задач. Грамотное использование кибернетики позволяет решать самые сложные задачи, что мы видим на примере наиболее экономически развитых стран, например, Японии, которая добилась выдающихся результатов, практически не имея своих собственных природных ресурсов.

Техническая кибернетика, возникшая из потребностей практики, является сейчас одним из наиболее разработанных разделов кибернетики. Она изучает процессы управления безотносительно к физическим процессам в системах, в которых происходят эти процессы. Основной задачей технической кибернетики является синтез оптимальных алгоритмов управления.

В качестве основных разделов кибернетики могут быть выделены такие как: теория информации; теория методов управления (программирования) и теория систем управления.

В теории информации рассматриваются способы получения, преобразования и передачи информации. Информация в основном передается

при помощи сигналов, у которых некоторые параметры находятся в соответствии с передаваемой информацией. В качестве основного понятия в теории информации выступает мера количества информации, определяемая как изменение степени неопределенности в ожидании некоторого события. Принято снижение неопределенности в два раза называть одним битом информации. В употреблении используются понятия байт, килобайт, мегабайт, гигабайт. Байтом называется объем информации, состоящий из восьми бит. Это понятие пришло из вычислительной техники, где устройство памяти состояло из восьми ячеек, в каждой из которых могла находиться или логическая единица, либо логический ноль, т.е., один бит информации.

Теория методов управления, или программирования, занимается разработкой методов автоматической обработки и использования информации для процессов управления с использованием электронно-вычислительных машин. Программирование работы любой системы управления в общем случае включает в себя: определение алгоритма нахождения решений и составление программы в коде, воспринимаемом данной системой. Процесс нахождения решений сводится к обработке входной информации в соответствующую выходную информацию или команды управления для достижения поставленных задач. Обработка информации происходит на основе некоторого алгоритма. Для определения оптимальных решений в технической кибернетике используются различные модели: модели потоков, модели надежности систем, модели игр, модели распознавания образов, модели обучения, графовые модели, логико-алгебраические модели, модели систем искусственного интеллекта. Используемая в кибернетике теория алгоритмов изучает формальные способы описания процессов обработки информации в виде алгоритмов - условных логико-математических схем. В различных случаях критерии оптимальности могут быть различны: в одних случаях может потребоваться минимальный разброс значений некоторого параметра, в другом - максимальная скорость переходного процесса, и т.п.

Теория систем управления занимается изучением принципов их построения и связями систем управления с объектами управления и внешней средой. В этом разделе кибернетики изучаются системы управления, представленные в виде математических моделей, сохраняющих информационные свойства реальных систем. Также получило отдельное направление технической кибернетики – теория автоматов. Теория автоматов занимается синтезом автоматов по заданным условиям работы и решением проблемы «черного ящика» - определением внутренней структуры автомата на основании изучения его входов и выходов. Кибернетика выделяет два общих принципа построения систем управления: обратной связи и иерархичность управления. Иерархичность управления обеспечивает устойчивость системы управления.

Таким образом, комплексная автоматизация при применении принципов самонастраивающихся и самообучающихся систем, разработанных технической кибернетикой, позволяет обеспечить достижение наилучших режимов управления, приводящих к достижению поставленных производственных и логистических задач в сельском хозяйстве. Начиная от элементарных вопросов управления отоплением и вентиляцией [32] и до создания сложных информационных систем с организацией и поддержкой сетевых решений, в т.ч. на уровне соответствующих сайтов [70], видим потребности в систематизации и правильном использовании информационных составляющих. Сегодня назрел вопрос говорить уже не технической кибернетике в сельском хозяйстве, а о сельскохозяйственной кибернетике.

Среди проблем, существующих при широком внедрении сельскохозяйственной кибернетики следует отметить недостаточное развитие в сельской местности цифровой инфраструктуры, особенно в «сельской глубинке» и дефицит квалифицированных кадров [71], [72], [73].

По данным Минсельхоза России, сегодня в России вдвое меньше ИТ-специалистов, работающих в сельском хозяйстве, чем в странах с

традиционно развитой сферой АПК. На настоящий момент российскому агросектору необходимо порядка 90 тысяч ИТ-специалистов. Новые реалии, проблемы импортозамещения также диктуют повышенное внимание к обозначенной выше проблематике и выработке новых подходов при обучении молодых специалистов для ее решения.

**Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева (Просвирякова М.В., Горячева Н.Г., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Уманский П.М.)**

Процесс сушки является самым энергоемким в технологии переработки хмеля. При хранении хмеля-сырца из-за высокой влажности (76-82%) наблюдается самосогревание и ухудшение качества сырья, т.е. происходит окисление горьких веществ, а значит, снижение содержания альфа-кислоты и мягких смол, испарение и окисление эфирных масел. В настоящее время свежесобранные шишки хмеля сушат в хмелесушилках разного конструкционного исполнения, в том числе в хмелесушилке ХС-400, где реализован конвективный способ подвода тепла.

Конвективный способ сушки не обеспечивает полного сохранения потребительских свойств шишек хмеля, а именно биохимических и органолептических показателей. Даже при благоприятных условиях качество сушки остается низким из-за неравномерности сушки хмеля, связанные с неоднородностью структуры шишки, неравномерностью толщины слоя хмеля и неравномерным распределением нагретого воздуха в камере. Энергетические затраты на единицу продукции остаются высокими, а из-за нарушения технологии сушки до 40% первосортного хмеля классифицируется как второй сорт.

Сохранение естественного цвета, блеска, аромата, липкости, содержания лупулина возможно при использовании инновационной эндогенно-конвективной технологии сушки, позволяющей резко сократить продолжительность сушки и энергетические затраты.

СВЧ-конвективная хмелесушилка с эллиптическими тороидальными резонаторами, состоит из последовательно расположенных (в горизонтальной плоскости) резонаторов с криволинейными поверхностями, состыкованных через керамические двояковыпуклые перфорированные

плиты. Через воздуховоды к каждому резонатору от тепловой пушки подводится тепло. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению двояковыпуклой керамической плиты.

В СВЧ-конвективной хмелесушилке полусферический неферромагнитный резонатор состыкован с цилиндрической частью хмелесушилки соосно, а на боковой поверхности установлены воздуховоды с электрокалорифером. Полусферический резонатор разделен на зоны с помощью керамических перфорированных двояковыпуклых перегородок. Сверху резонатора установлены воздухоотводы от каждой зоны и бункера загрузки. Под бункером установлен диэлектрический распределитель.

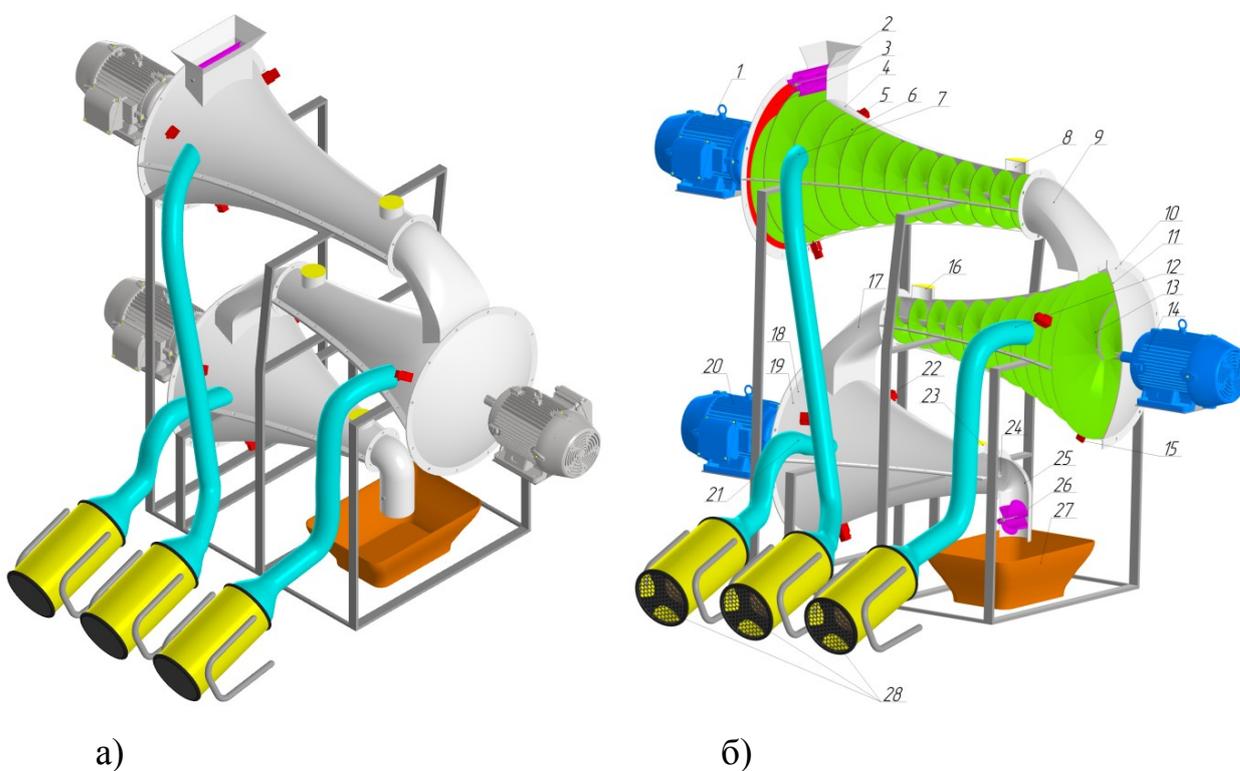
Хмелесушилка содержит последовательно расположенные в вертикальной плоскости тороидальные резонаторы с чередованием астроидальных резонаторов с усеченными вершинами и керамическими двояковыпуклыми перфорированными дисками в середине.

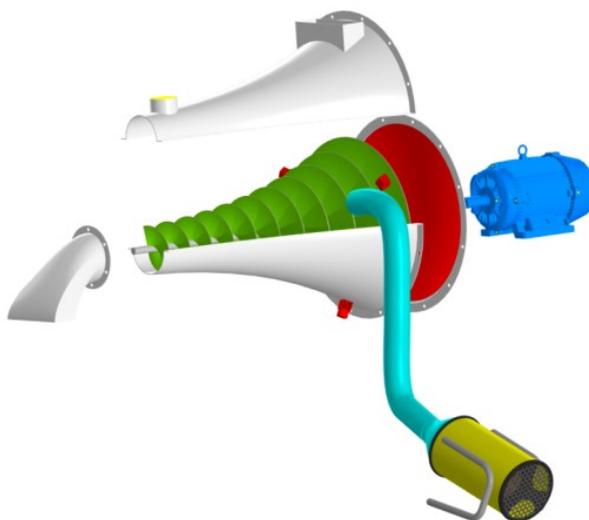
В указанных хмелесушилках остаются сложности согласования между собой технологических параметров, а именно толщины слоя, плотности сырья, скорости передвижения сырья, температуры нагрева сырья и воздуха в каждом резонаторе. Поэтому возникают трудности поэтапной регулировки скорости нагрева и сушки свежееубранного хмеля.

Основными критериями при конструировании хмелесушилки с источниками диэлектрического и конвективного нагрева являются трехэтапная сушка хмеля в непрерывно-поточном режиме работы с обеспечением разного температурного режима и разной напряженности электрического поля в резонаторах и электромагнитной безопасности без дополнительного экранирующего корпуса при использовании магнетронов воздушного охлаждения [31]. Для реализации этих критериев разработана хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения, шлюзовыми затворами и поярусно расположенными

металлодиэлектрическими резонаторами в виде усеченных конусов с экспоненциальными образующими, внутри которых соосно расположены диэлектрические шнеки с переменным шагом и изменяющимся диаметром винтов.

Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективного нагрева собрана из трех ярусно установленных секций (Рисунок 41). Каждая секция состоит из неферромагнитного резонатора (4, 10, 18) в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей и вогнутым основанием большого диаметра, на который соосно прикреплено керамическое вогнутое зеркало (3, 11, 19). Причем диаметры вогнутых оснований всех резонаторов равны между собой и кратны половине длины волны, а длины каждого резонатора разные, но кратны половине длины волны. Длина резонатора второго яруса меньше, чем резонатора первого яруса, но больше длины резонатора третьего яруса.





в)

*Рисунок 41. – Ярусная хмелесушилка с источниками диэлектрического и конвективнонагрева: а) общий вид; б) общий вид в разрезе; в) резонатор второго яруса с основными узлами; 4, 10, 18 – объемные резонаторы; 6, 13, 24 – винтовые шнеки 1, 14, 20 – электроприводы шнеков; 3, 11, 19 – керамические вогнутые зеркала; 5, 15, 22 – волноводы с магнетронами воздушного охлаждения; 7, 12, 21 – воздухопроводы; 9, 17 – переходники; 8, 16, 23 – воздухоотводы - запердельные волноводы; 2, 26 – шлюзовые затворы; 28 – тепловые пушки*

Каждый резонатор усечен на уровне критического сечения, на значительном расстоянии от вершин конуса, практически не нарушая структуры электромагнитного поля, что позволяет создать отверстия для передвижения сырья в другой резонатор через соответствующие переходники. Размеры резонаторов подобраны таким образом, чтобы в сужающихся частях возникли условия отсечки для высших типов колебаний волн. Вследствие чего в резонаторах такого конструкционного исполнения создаются условия для возникновения резонансных колебаний за счет переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений. Диаметры вогнутых оснований резонаторов равны между собой и кратны половине длины волны. Длины резонаторов по ярусам уменьшены и кратны половине длины волны, т.е. самая короткая длина резонатора – это длина резонатора третьего яруса.

Внутри каждого неферромагнитного резонатора соосно установлены диэлектрические винтовые шнеки (6, 13, 24) с электроприводами (1, 14, 20). По периметру каждого вогнутого основания неферромагнитных резонаторов (4, 10, 18) со сдвигом на  $120^\circ$  установлены волноводы с магнетронами воздушного охлаждения (5, 15, 22). Приемная емкость со шлюзовым затвором 2 из неферромагнитного материала установлена на первый резонатор 4 со стороны вогнутого основания. Неферромагнитный шлюзовой затвор 26 для выгрузки установлен под третьим резонатором в неферромагнитном переходнике 25. Между неферромагнитными резонаторами (4, 10, 18) имеются неферромагнитные переходники (9, 17). К каждому резонатору со стороны вогнутого основания подведены неферромагнитные воздухопроводы (7, 12, 21) от индивидуальных тепловых пушек (28). Со стороны усеченной части резонаторов прикреплены воздухоотводы-запредельные волноводы (8, 16, 23) закрытые неферромагнитными мелкоячеистыми сетками. Длина второго резонатора больше третьего, но меньше первого резонатора. Сечение каждого резонатора изменяется по экспоненциальному закону. Причем значение экспоненты второго резонатора больше чем первого резонатора, но меньше, чем третьего резонатора. Экспоненты образующих резонаторов в каждом ярусе выше предыдущего резонатора. Хмелесушилка снабжена контрольно-измерительной техникой, датчиками влажности и температуры воздуха и сырья, в том числе прибором для контролирования мощности потока излучений. Допустимая мощность излучений  $10 \text{ мкВт/см}^2$ , при превышении которой следует сократить продолжительность работы обслуживающего персонала [20], [74].

Исследования показали, что сушилка должна обеспечить поэтапное снятие влаги из шишек хмеля, находящихся в поярусно расположенных резонаторах, например в трех резонаторах 4, 10, 18. Первый этап сушки осуществляется при напряженности электрического поля  $0,8\text{--}1,0 \text{ кВ/см}$  и температуре агента сушки  $31\text{--}35^\circ \text{С}$ . Второй этап сушки происходит при

напряженности электрического поля 1,0–1,5 кВ/см и температуре агента сушки 37–46 °С, третий этап сушки – при напряженности электрического поля 1,5–2,2 кВ/см и температуре агента сушки 65–75 °С. Для реализации такого технологического режима сушки предусмотрена регулировка: продолжительности нагрева в каждом резонаторе путем изменения частоты вращения соответствующих электродвигателей (1, 14, 20); производительности и мощности нагревательных элементов (ТЭН) соответствующих тепловых пушек 28; объема загрузки сырья в резонатор с изменением частоты вращения роторных питателей шлюзовых затворов 2, 26; мощности СВЧ генераторов 5, 15, 22. удельной мощности генератора, как отношение мощности генераторов к объему загрузки сырья в резонатор, и т.п.

Соответствующая высокая напряженность электрического поля в каждом резонаторе обеспечивается за счет интерференции концентрированных когерентных волн от керамических зеркал, обладающих малым значением тангенса угла диэлектрических потерь, а также из-за уменьшения поперечного сечения каждого резонатора по экспоненте, но с разными значениями экспоненты.

Технологический процесс сушки свежееубранного хмеля. Включаются все электрические тепловые пушки 28 на соответствующие производительности и мощности нагревательных элементов. Включаются электроприводы шнеков в следующей последовательности: третьего 20, второго 14, первого 1 шнеков. Частота вращения каждого мотора-редуктора разная, в пределах 0,25-1 об/мин, в зависимости от яруса. Обеспечивается температура сушильного воздуха на первом этапе сушки не более 31–35 °С. Загрузочная емкость заполняется свежееубранным хмелем и включается шлюзовой затвор 2, обеспечивающий дозированную подачу сырья в первый резонатор 4. После того как сырье с помощью первого диэлектрического шнека 6 начинает перемещаться внутри первого резонатора 4, включаются магнетроны 5 первого резонатора для возбуждения в нем электромагнитного

поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Волны за счет вогнутого керамического зеркала 3 концентрируются, и сырье в процессе перемещения вдоль резонатора подвергается воздействию ЭМП СВЧ. Под воздействием ЭМП СВЧ шишки хмеля эндогенно нагреваются равномерно по всему сечению, так как глубина проникновения волны соизмерима с размерами шишек хмеля. В связи с тем, что шаг винта разный и менее двух глубин проникновения волны (5-6 см) в хмель, поэтому сырье уплотняется и по толщине также равномерно нагревается. В процессе перемещения вдоль резонатора 4 с помощью витков шнека с переменными диаметром и шагом эндогенно нагретые шишки хмеля продуваются теплым воздухом, поступающим через воздуховод 7 от соответствующей тепловой пушки 28. В связи с тем, что при диэлектрическом нагреве градиенты температуры, влажности и давления направлены от центра к периферии шишек, поэтому выделенная влага с поверхности удаляется воздухом.

Отработанный влажный воздух уходит через воздухоотвод-запредельный волновод 8 и через перфорацию переходника 9. Скорость перемещения сырья через резонатор, а, следовательно, и продолжительность воздействия ЭМП СВЧ регулируется частотой вращения электродвигателя. Далее нагретое сырье до необходимой температуры просыпается через перфорированный переходник, где отсутствует излучение, так как резонатор усечен на уровне критического сечения, следовательно, волны отражаются от поверхности и направляются внутрь резонатора. Критическое сечение зависит от длины резонатора и показателя экспоненты (угла наклона) образующей. Показатель экспоненты второго резонатора выше, чем у первого, поэтому критическое сечение второго резонатора будет на уровне меньшей длины, т.е. длина второго резонатора меньше, чем длина первого резонатора, но больше, чем длина третьего резонатора. Далее сырье через переходник 9 попадает во второй резонатор 10, захватывается с помощью шнека 13, и тогда следует включить генераторы 15 на втором резонаторе. Частота вращения шнека 13 меньше, чем у шнека 1. В зауженной части

резонатора высокая напряженность электрического поля, и температура сырья в конце шнека достигает 46 °С. После того как частично высушенные шишки хмеля через перфорированный переходник 17 попадают в третий резонатор 18, следует включить генераторы 22. Тогда под воздействием ЭМП СВЧ сырье избирательно нагревается, поверхностная влага удаляется через воздухоотвод-запредельный волновод 23, высушенный хмель до 10-11 % выгружается с помощью роторного питателя 26 (шлюзового затвора) в приемную емкость 27. В данном резонаторе напряженность электрического поля достигает до 1,5-2,2 кВ/см, температура нагрева сырья достигает до 65-75 °С. В перфорированных переходниках 9, 17, 25 влажность и температура выравниваются по сечению шишек хмеля.

Итак, сушилка обеспечивает поэтапное снятие влаги из шишек хмеля, при движении через резонаторы, расположенные ярусами. Шишки хмеля подвергаются эндогенно-конвективному нагреву, высушиваются и выгружаются в приемную емкость. Во всех трех резонаторах доза воздействия ЭМП СВЧ, температура и напор подаваемого воздуха контролируются и регулируются в зависимости от влажности хмеля путем изменения мощности генераторов и нагревательных элементов, а также изменением частоты вращения электроприводов шнеков. Для соблюдения эффективных режимов нагрев шишек хмеля, регулирование осуществляется с разной скоростью в резонаторах (расположенных ярусами), в которых возбуждается электрическое поле разной напряженности, а сушка хмеля происходит в щадящем режиме, с сохранением потребительских характеристик и улучшением микробиологических показателей [75]. Шлюзовые затворы, воздухоотводы-запредельные волноводы и правильный выбор критического сечения на резонаторе обеспечивают электромагнитную герметичность без дополнительного экранирующего корпуса. Условия тепло- и массообмена при обдувании теплым воздухом зависит от параметров теплоносителя: температуры, скорости и относительной влажности.

Использование керамических вогнутых зеркал(сферическое зеркало –

собирающееся зеркало), как части резонаторов позволяет поддерживать свободные электромагнитные колебания разных видов.

Керамика обладает малыми тепловыми потерями, так как тангенс угла диэлектрических потерь всего  $3 \cdot 10^{-3}$ , следовательно, собственная добротность всех проектируемых резонаторов выше, чем без керамических зеркал. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению керамических вогнутых зеркал. Резонаторы с экспоненциальной образующей и керамическими вогнутыми зеркалами создают условия для рекуперации (повторного и многократного использования) электромагнитной мощности, излучаемой системой магнетронов [76], [35].

Хмелесушилку следует размещать в отдельном помещении, отгороженном неферромагнитной сеткой и снабдить пультом дистанционного управления.

Проведен предварительный расчет параметров процесса сушки хмеля воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Исходные данные: относительная начальная влажность хмеля  $W_1 = 72$  %, относительная конечная влажность высушенного хмеля  $W_2 = 10$  %, температура сушки конечная  $T_2 = 65$  °С, начальная  $T_1 = 20$  °С, плотность сухого хмеля  $\rho = 20$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость сухого хмеля  $C_2 = 1700$  Дж/кг·°С, теплоемкость воды  $C_e = 4190$  Дж/кг·°С.

Расчет мощности для нагрева хмеля и испарения влаги проведен на 1 кг исходного влажного хмеля. Приняты следующие обозначения:

- масса хмеля до сушки  $g_1 = 1$  кг;
- масса сухого хмеля  $g_0 = g_1 \cdot (1 - W_1) = 1 \cdot (1 - 0,72) = 0,28$  кг;
- масса удаленной влаги  $g_2 = g_1 \cdot (W_1 - W_2) = 1 \cdot (0,72 - 0,1) = 0,62$  кг;
- масса оставшейся влаги  $g_3 = g_1 \cdot W_2 = 1 \cdot 0,1 = 0,1$  кг;

Удельная энергия, необходимая для нагрева сухого хмеля:

$$\mathcal{E}_1 = g_0 \cdot C_2 \cdot (T_2 - T_1) = 0,28 \cdot 1,7 \cdot (65 - 20) = 364140 \text{ кДж/кг} = 101,15 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} \quad (83)$$

Удельная энергия на нагрев и испарение удаляемой влаги:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= g_2 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) + r \cdot g_2 = 0,62 \cdot 4,19 \cdot (65 - 20) + 2287,4 \cdot 0,62 = \\ &= 1522 \text{ кДж/кг} = 423 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \end{aligned} \quad (84)$$

где  $r$  – теплота пароиспарения, кДж/кг.

$$\begin{aligned} r &= 589 - 0,399 \cdot T_{cp} - 0,00125 \cdot T_{cp}^2 = 589 - 0,399 \cdot 42,5 - 0,00125 \cdot 42,5^2 = \\ &= 569,79 - 4190 = 2287,4 \text{ кДж/кг}; \end{aligned} \quad (85)$$

Удельная энергия на эндогенный нагрев воды:

$$\mathcal{E}_{2 \text{ энд.}} = g_2 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) = 0,62 \cdot 4,19 \cdot (65 - 20) = 104 \text{ кДж/кг} = 28,86 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (86)$$

Удельная энергия на испарение удаляемой влаги

$$r \cdot g_2 = 2287,4 \cdot 0,62 = 1418,19 \text{ кДж/кг} = 394 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг};$$

Удельная энергия на нагрев остаточной влаги:

$$\mathcal{E}_3 = g_3 \cdot C_6 \cdot (T_2 - T_1) = 0,1 \cdot 4190 \cdot (65 - 20) = 16760 \text{ Дж/кг} = 4,66 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (87)$$

Суммарная удельная полезная энергия при СВЧ нагреве и испарении влаги:

$$\mathcal{E}_{\text{сум. энд}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 101,15 + 423 + 4,66 = 528,81 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (88)$$

Суммарная удельная полезная энергия при СВЧ нагреве:

$$\mathcal{E}_{\text{сум. энд}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 101,15 + 28,86 + 4,66 = 134,67 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (89)$$

Общая энергия, необходимая для диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля и испарения влаги, с учетом термического КПД  $\eta_T = 0,76$  и КПД хмелесушилки  $\eta_{\text{суш}} = 0,8$ , будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = \mathcal{E}_{\text{сум.}} / (\eta_T \cdot \eta_{\text{суш}}) = 528,81 / (0,76 \cdot 0,8) = 870 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} = 0,87 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (90)$$

Общая энергия, необходимая для диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = \mathcal{E}_{\text{сум. энд}} / \eta_T = 134,67 / 0,76 = 233,15 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}; \quad (91)$$

Удельный расход тепла на диэлектрический нагрев  $233,15 \cdot 3600 = 0,84$  МДж/кг, на испарение удаляемой влаги  $394 \cdot 3600 = 1,42$  МДж/кг; общий расход тепла  $0,84 + 1,42 = 2,26$  МДж/кг.

Для сравнения: в многоярусной конвективной хмелесушилке расходуется 3,86 МДж/кг тепла, т.е. примерно на 38-40% выше, чем в

проектируемой ярусной хмелесушилке с источниками диэлектрического и конвективного нагрева.

Удельная энергия на испарение удаляемой влаги с помощью конвективного тепла 394 кВт·ч /кг, следовательно, для массы удаленной влаги 0,62 кг, необходимо тратить энергию  $394 \cdot 0,62 = 244,28$  кВт·ч. Далее можно вычислить необходимый расход воздуха, производительность, мощность электродвигателя вентилятора и нагревательного элемента.

Для определения продолжительности диэлектрического нагрева хмеля проведен расчет удельной мощности, генерируемой в шишках хмеля за счет диэлектрических потерь, при частоте  $f = 2450$  МГц. Вычислено изменение фактора диэлектрических потерь хмеля ( $k$ ) при изменении влажности от 20 до 72% ( $k = 0,2-2$ ). Предварительный расчет удельной мощности проведен при напряженности электрического поля в объемном резонаторе  $E = 1,6$  кВ/см.  $P_{уд} = 0,555 \cdot 10^{-12} \cdot k \cdot f \cdot E^2 = 0,555 \cdot 10^{-12} \cdot 1,1 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 1600^2 = 3829$  Вт/см<sup>3</sup>. Тогда удельная мощность, генерируемая в 1 кг сырья, составит  $P = P_{уд} / \rho = 3,829 / 0,17 = 22,52$  кВт/г = 22520 кВт/кг. Продолжительность нагрева  $\tau = 233,15$  Вт·ч/кг / 22520 = 0,0104 ч = 0,62 мин. Производительность сушилки по диэлектрическому нагреву  $1 / 0,0104 = 96,15$  кг/ч.

СВЧ-конвективная хмелесушилка разработана в виде трех состыкованных модулей для поэтапного равномерного снижения влаги, с использованием трех магнетронов по 850 Вт в каждом резонаторе (7,65 кВт). Производительность 95-100 кг/ч достижима, если нестандартная конструкция резонатора обеспечит возбуждение волны напряженностью электрического поля 1,6-1,7 кВ/см и продолжительность нахождения свежесобранного хмеля в каждом модуле по 20 мин. Объем сырья в каждом резонаторе 32-33 кг.

Для исследования динамики нагрева свежесобранного хмеля (влажность 79-82%) необходимо учесть изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ, а именно:

изменения в зависимости от температуры диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ), фактора диэлектрических

потерь ( $k$ ) при частоте 2450 МГц, теплоемкости ( $C$ ) и плотности ( $\rho$ ).

Для определения количества теплоты, выделяемой в единице объема сырья, надо рассчитать удельные диэлектрические потери по формулам 92, 93. Удельные диэлектрические потери зависят от частоты ( $f$ , Гц), квадрата напряженности электрического поля (ЭП) ( $E$ , В/см), и фактора диэлектрических потерь хмеля ( $k$ ). Удельную мощность можно определить также по формуле 93 при определенной скорости его нагрева ( $\Delta T/\Delta \tau$ ), зная термический КПД ( $\eta = 0,76$ ) и теплофизические параметры хмеля ( $C$ , Дж/кг·°C;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>):

$$P_{уд} = 8,85 \cdot 10^{-14} (\Phi/\text{см}) 2 \pi f 10^6 k E^2 10^{-4} (\text{В}/\text{см}^2) = 0,556 \cdot 10^{-10} \cdot 2450 k E^2 = 1362,2 \cdot 10^{-10} k E^2, \text{ Вт}/\text{см}^3; \quad (92)$$

$$P_{уд} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \rho C \frac{1}{\eta} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \rho C \frac{1}{0,76} = 1,32 \rho C \frac{\Delta T}{\Delta \tau}, \text{ Вт}/\text{см}^3; \quad (93)$$

Результаты экспериментальных исследований динамики диэлектрического нагрева свежесобранного хмеля при разных удельных мощностях генератора, приведены на Рисунок 42 и сведены в Таблица 13.

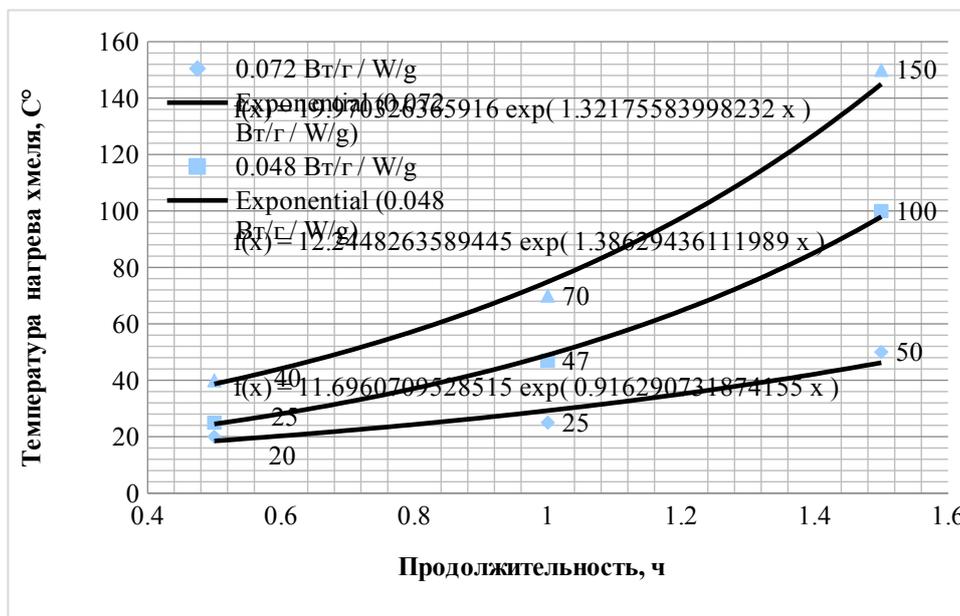


Рисунок 42. – Динамика диэлектрического нагрева хмеля при разных удельных мощностях генератора

Эмпирические выражения, характеризующие динамику нагрева хмеля

при разных удельных мощностях генератора:

$$T = 19,97 \cdot e^{1,32\tau} (0,072 \text{ Вт/г}); T = 12,245 \cdot e^{1,39\tau} (0,048 \text{ Вт/г});$$

$$T = 11,696 \cdot e^{0,92\tau} (0,024 \text{ Вт/г}); \quad (94)$$

Предварительные эксперименты показывают, что шишки хмеля, высушенные при температуре 65-70 °С по цвету, запаху и состоянию лупулиновых желез отнесены к первому сорту.

Для выявления эффективных режимов сушки свежесобранного хмеля воспользовались ротатбельным планированием второго порядка.

Таблица 13

### Уровни варьирования факторов

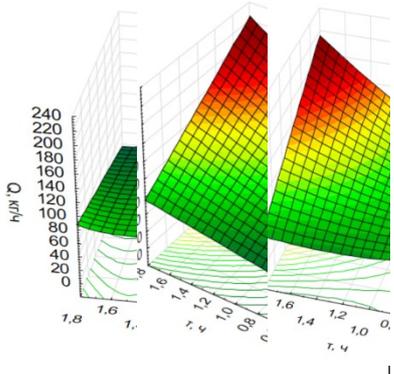
Факторы	Уровни факторов				
	- 1,414	-1	0	+1	+1,414
Продолжительность, ч	0,59 ч 35,36 мин	0,833 ч 50 мин	1,0 ч 60 мин	1,167 ч 70 мин	1,65 ч 99 мин
Мощность генератора, Вт	2400	3394	4800	5092	7200

Таблица 14

**Матрица ротатабельного планирования второго порядка  
(метод наименьших квадратов полинома второй степени)**

Номер опыта	Кодированная матрица		Рабочая матрица		Параметр оптимизации		
	$X_1$	$X_2$	продолжительность, ч	общая мощность генераторов, Вт	производительность, кг/ч ( $Y_1$ )	энергозатраты, Вт·ч/кг ( $Y_2$ )	температура, °C ( $Y_3$ )
1	+	+	1,167	5092	85,7	59,42	82
2	-	+	0,833	5092	120,5	42,26	50
3	+	-	1,167	3394	85,7	39,6	40
4	-	-	0,833	3394	120,5	28,17	30
5	-1,414	0	0,59	4800	169,5	28,32	26
6	+1,414	0	1,65	4800	60,6	79,21	110
7	0	-1,414	1	2400	100	24	26
8	0	+1,414	1	7200	100	72	70
9	0	0	1	4800	100	48	47
10	0	0	1	4800	100	48	47
11	0	0	1	4800	100	48	47
12	0	0	1	4800	100	48	47
13	0	0	1	4800	100	48	47

Результаты построения матрицы - поверхности отклика и сечение двухфакторной модели: а) производительности; б) энергозатрат; в) температуры в зависимости от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ и мощности генераторов:  $Y_1$  – производительность (кг/ч),  $Y_2$  – энергозатраты (Вт·ч/кг),  $Y_3$  – температура (°C),  $X_1$  – продолжительность воздействия (ч),  $X_2$  – мощность генераторов (Вт)



а)



б)



в)

*Примечание. Единовременная загрузка трех резонаторов 100 кг.*

В Таблица 13 и Error: Reference source not found приведены принципы кодирования, уровни варьирования и матрица проведения эксперимента при сушке свежесобранного хмеля, влажностью 79-82 % с источниками диэлектрического и конвективного нагрева в непрерывно-поточном режиме с

поярусно расположенными резонаторами в виде усеченных конусов с экспоненциальными образующими [37].

Регрессионная модель изменения производительности  $Q$  ( $Y_1$ , кг/ч), энергозатрат  $W$  ( $Y_2$ , Вт·ч/кг), температуры  $T$  ( $Y_3$ , °С) от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ на свежесобранный хмель ( $\tau$ , ч) и мощность генераторов ( $P$ , Вт):

$$Q = 270,9 + 0,11 \tau - 269,35 P + 4,8 \cdot 10^{-8} \tau^2 - 0,01 \tau P + 97,78 P^2; \quad (95)$$

$$W = -0,51 + 7,484 \cdot 10^{-5} \tau + 0,52 P + 1,93 \cdot 10^{-9} \tau^2 + 0,01 \tau P - 0,01 P^2; \quad (96)$$

$$T = 104 + 0,017 \tau - 144,76 P - 5,52 \cdot 10^{-7} \tau^2 - 0,033 \tau P + 30,5 P^2; \quad (97)$$

Из уравнений (104, 105, 106) следует, что оба фактора оказывают влияние на производительность, энергозатраты и температуру нагрева хмеля. Наглядное представление о закономерностях изменения критериев оптимизации при варьировании факторов можно получить с помощью двухмерных сечений поверхностей откликов, построенных в программном пакете для статистического анализа Statistica v12, которые позволяют с достаточной точностью прогнозировать значения критериев оптимизации и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Эффективный режим сушки свежесобранного хмеля при общей мощности девяти генераторов 7,2 кВт: температура 70 °С; производительность хмелесушилки составит 100 кг/ч, удельные энергетические затраты 72 Вт·ч/кг. Сушку хмеля в первом ярусе следует начинать при температуре 40-45 °С, а в третьем ярусе заканчивать при температуре 60-65 °С. Высушенный хмель до 10-12 % становится хрупким, поэтому для придания механической прочности следует провести процесс отлежки, чтобы влажность повышалась до 13%. Далее, для хранения при температуре 0-5 °С хмель следует плотно упаковать, в противном случае содержание альфа-кислоты и мягких смол снижается, содержание твердых смол увеличивается, изменяется цвет шишек.

Величина удельного расхода тепла зависит от параметров процесса сушки, способа сушки, влагосодержания хмеля. Удельный расход тепла на диэлектрический нагрев составляет 0,84 МДж/кг, на испарение удаляемой влаги 1,42 МДж/кг, общий расход тепла 2,26 МДж/кг. В многоярусной конвективной хмелесушилке базового варианта расходуется 3,86 МДж/кг тепла, а проектируемом варианте с источниками диэлектрического и конвективного нагрева на 38-40 % ниже.

Интенсификация процесса сушки хмеля СВЧ-конвективным методом способствует повышению производительности хмелесушилки, снижению удельных расходов тепла, сокращению затрат на его эксплуатации при высоком качестве высушенного хмеля. Интенсификация сушки на основе теории диэлектрического нагрева связана с повышением интенсивности внешнего и внутреннего теплообмена. Возможны следующие направления интенсификации процесса сушки хмеля:

- увеличение температуры конвективного нагрева до предельного значения (80-90 °С), при котором потребительские свойства хмеля остаются без изменения;
- турбулизация сушильного агента, обеспечивающего отрыв частиц влаги с поверхности шишек и вынос ее за пределы граничного слоя;
- применение определенной скважности технологического процесса (нагревание хмеля сопровождается охлаждением) с учетом толщины слоя, влажности хмеля;
- применение псевдооживленного слоя увеличивает поверхность контакта, следовательно, увеличивает коэффициент теплоотдачи.

## **Автоматический контроль зрелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла (Судник Ю.А., Махмуд А. Абделхамид)**

Зрелость является одним из наиболее важных факторов, связанных с оценкой качества томатов. Общие показатели зрелости включают такие физические свойства как цвет кожицы, упругость мякоти, размер, форма, содержание влаги и хлорофилла [77].

Хлорофилл - важный пигмент, содержащийся во всех растительных тканях, которые содержат хлоропласты, и необходимый для роста растений. После полной дифференциации пластид в хлоропласты, уровень хлорофилла становится высоким, что позволяет отдельным частям растения лучше поглощать свет. Когда плод достигает состояния зеленой зрелости, хлоропласт снова дифференцируется в хромопласт или другие типы протопластов, разлагающих хлорофилл [78].

Во время созревания плодов томата происходят различные изменения на физиологическом, биохимическом и молекулярном уровнях. Хлоропласты в плодоносящем околоплоднике преобразуются в хромопласты, и цвет поверхности плода меняется с зеленого на красный. Это изменение цвета хорошо характеризуется деградацией хлорофилла и накоплением каротиноидов, в основном ликопина. Однако, содержание хлорофилла в красных спелых плодах томатов значительно уменьшается в процессе созревания, но не всегда исчезает полностью [79], [80]. Контроль флуоресценции хлорофилла - неразрушающий и быстрый метод, который используется для оценки степени зрелости фруктов и овощей. Цель работы - разработка оптического метода и устройства для автоматического контроля степени спелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла.

В экспериментальном исследовании использовался сорт томата

«Лезгинка» (выращенный в теплицах РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) с 4 –мя стадиями зрелости (зеленая, розовеющая, розовая, красная).

*Разработка математических моделей интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла томата сорта «Лезгинка».* Модели были получены на основе результатов экспериментальных исследований, в которых были определены табличные данные и построены соответствующие кривые (рисунок 43) зависимости интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{fl}$ ) и их первых производных ( $dI_{fl}/dt$ ) от времени для томатов сорта «Лезгинка» и их четырех степеней зрелости (зеленой, розовеющей, розовой и красной). Из рисунка видно, что интенсивность флуоресценции хлорофилла начинает увеличиваться со временем до момента, когда  $t_1$  соответствует значению  $I_{fl}$ , после чего начинает незначительно уменьшаться с последующим увеличением. В этот промежуток времени первая производная  $dI_{fl}/dt$  кривой флуоресценции хлорофилла начинает изменяться от своего максимального до минимального значения времени  $t_1$ , соответствующего моменту перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла  $I_{fl}$ . Этот момент соответствует первому минимуму времени  $t_1$  на кривой первой производной исходной кривой флуоресценции хлорофилла. На рисунке 43 показано, что первая точка  $I_{fl}$  перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла определяет время  $t_1 = 123 \pm 5$  мс (что будет соответствовать контрольной частоте 8,11 Гц) для различных степеней зрелости томатов (рисунок 43а, 43б, 43с). Для красных томатов (рисунок 43д) эта зависимость незначительно (по амплитуде) изменяется со временем.

Изменение интенсивности флуоресценции хлорофилла томатов со временем отслеживалось с помощью высокоточного флуориметра (модель ХЕ-РАМ, Heinz Walz, Германия) [81].

Для нахождения аналитических выражений для графических зависимостей, полученных в результате экспериментальных исследований, применялся регрессионный анализ с использованием полиномиальных уравнений и математической компьютерной программы «Mathematica v.12».

Для оценки порядка полиномов при определении аналитических выражений (уравнений регрессии), соответствующих полученным графическим зависимостям (кривым изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла во времени) с помощью критерия Фишера (при уровне значимости 95%) определены полиномиальные уравнения третьей степени:

$$I_f = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c, \quad 0 \leq t < 250 \text{ ms}; \quad (98)$$

где  $I_f$  - интенсивность флуоресценции хлорофилла, отн. ед;  $t$  - время, мс;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $c$  - постоянные коэффициенты.

Виды уравнений кривых  $I_f = f(t)$  сорта «Лезгинка» для различных степеней его зрелости приведены в таблице 15.

Таблица 15

**Уравнения математических моделей сорта «Лезгинка» для разных степеней его зрелости**

Сорт томатов	Степень спелости	Уравнения математических моделей
Лезгинка	Зелёный	$I_f = 0,000790 t^3 - 0,2994 t^2 + 37,40 t + 721$
		$dI_f/dt = 0,002370 t^2 - 0,5989 t + 37,40$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,004741 t - 0,5989$ ( $t_f=126$ мс)
	Розовеющий	$I_f = 0,000230 t^3 - 0,0842 t^2 + 9,92 t + 229$
		$dI_f/dt = 0,000691 t^2 - 0,1684 t + 9,92$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,001381 t - 0,1684$ ( $t_f=122$ мс)
	Розовый	$I_f = 0,000088 t^3 - 0,032369 t^2 + 4,16 t + 147$
		$dI_f/dt = 0,000264 t^2 - 0,0647 t + 4,16$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,000528 t - 0,0647$ ( $t_f=122$ мс)
	Красный	$I_{fl2k} = 55 \pm 5$

Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов «Лезгинка» будет иметь вид (при этом  $t_{\text{сред}} = 123$  мс):  $I_f = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c$ , где,  $a_3 = 0,000790$ ;  $a_2 = 0,2994$ ;  $a_1 = 37,40$ ;  $c = 721$  (зеленая стадия),  $a_3 = 0,000230$ ;  $a_2 = 0,0842$ ;  $a_1 = 9,92$ ;  $c = 229$  (стадия розовения),  $a_3 = 0,000088$ ;  $a_2 = 0,032369$ ;  $a_1 = 4,16$ ;  $c = 147$  (розовая стадия),  $I_{\text{фл2к}} = 55 \pm 5$  (красная стадия).

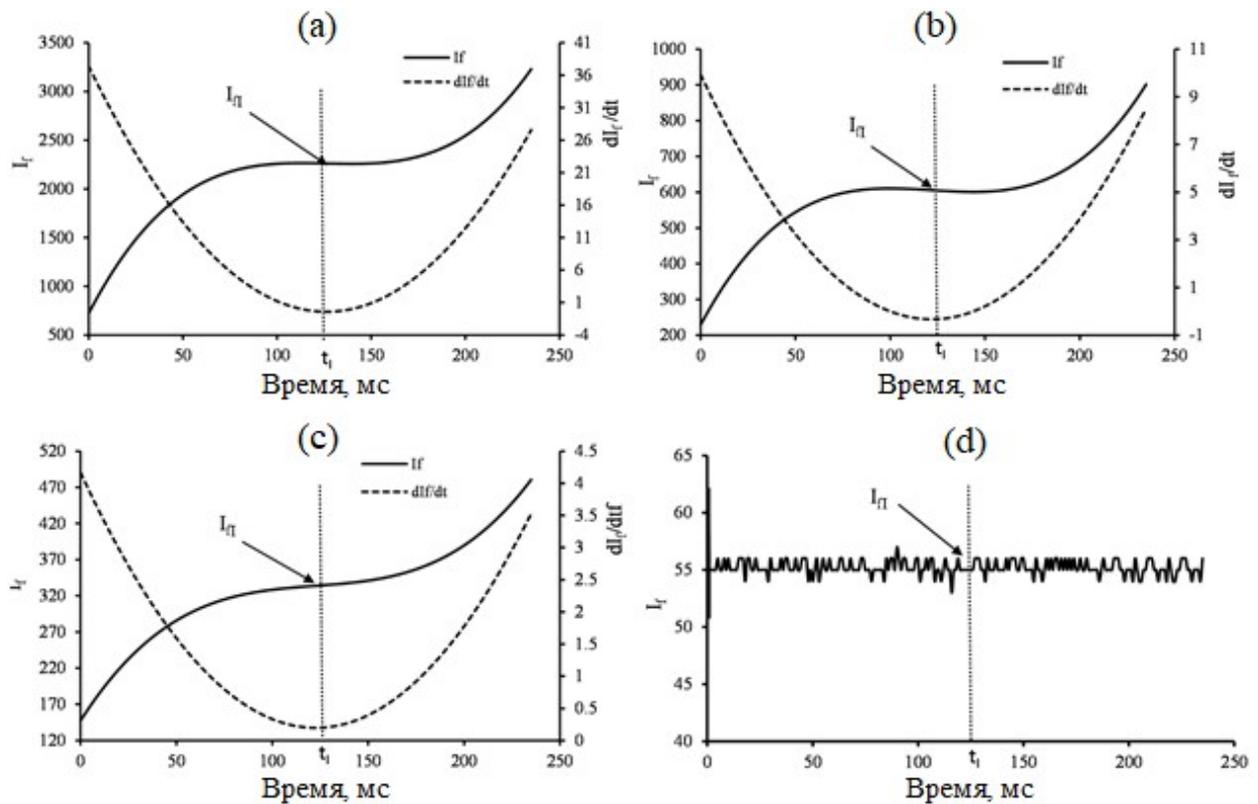


Рисунок 43. - Кривые зависимости интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_f$ ) и их первые производные ( $dI_f/dt$ ) для томатов сорта «Лезгинка» четырех степеней зрелости: а) зеленая; б) розовеющая; в) розовая; д) красная

Разработка устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов. С учетом необходимых частотных диапазонов излучаемого  $f_u$  ( $f_u = 470 \pm 8$  нм) и генерируемого  $f_c$  плодами томата ( $f_c = 650...820$  нм) световых потоков, их интенсивности, оптимального времени  $t_1 = 123 \pm 5$  для контроля степени зрелости томатов была разработана функциональная схема (рисунок 44) устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов.

Устройство работает следующим образом. Микроконтроллер 5 (на базе «Arduino») с установленной в нем программой формирует управляющий сигнал для светодиода 3, который направленно излучает световой поток с длиной волны  $470 \pm 8$  нм на объект исследования 1 (плод томата). Световой поток, генерируемый плодом, но с другой длиной волны ( $650...820$  нм) через

светофильтр 2 поступает на фотодиод PD. Сформированный в нем электрический сигнал через каскад усиления и согласования фотодиода ФД с микроконтроллером 4 поступает на микроконтроллер 5 и компьютер 6, в котором, согласно разработанной программе, обрабатывается сигнал светового потока с учетом уровней амплитуды и его спектрального состава, излучаемых и генерируемых от плода томата 1 световых потоков.

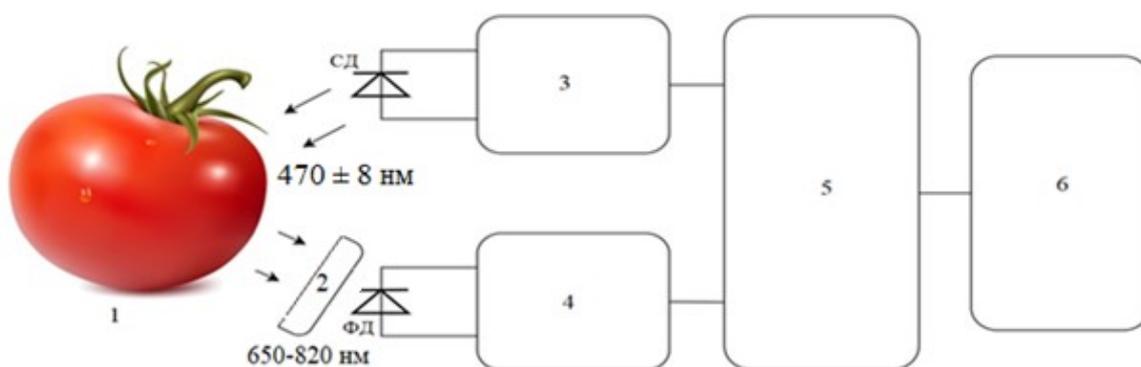


Рисунок 44. - Функциональная схема устройства для контроля степени зрелости томатов: 1 - объект исследования (томат), 2 - светофильтр, 3 - управляемый источник питания светодиода (светодиод, тип ARPL-3W-EPL40), 4 - усилитель для ФД (фотодиод, тип FD-7K), 5 - микроконтроллер, 6 - компьютер.

Для каждого плода томата с помощью разработанного прибора определялась интенсивность флуоресценции хлорофилла  $I_n$ . По результатам измерений во всех группах плодов томатов были определены уровни быстрой и медленной флуоресценции хлорофилла [81], после чего были определены средние значения интенсивности флуоресценции хлорофилла и время контроля степени зрелости томатов.

На рисунке 45 представлены графики зависимостей быстрой (по сравнению с медленной) флуоресценции хлорофилла от степени зрелости томатов сорта «Лезгинка». Анализ этих зависимостей показывает, что по мере созревания плодов томатов медленная  $F_m$  и быстрая  $I_n$  флуоресценции

хлорофилла уменьшаются. Для зеленой (первой степени) зрелости плоды томата характеризуются высокими значениями медленной  $F_m$  и быстрой  $F_i$  флуоресценций хлорофилла.

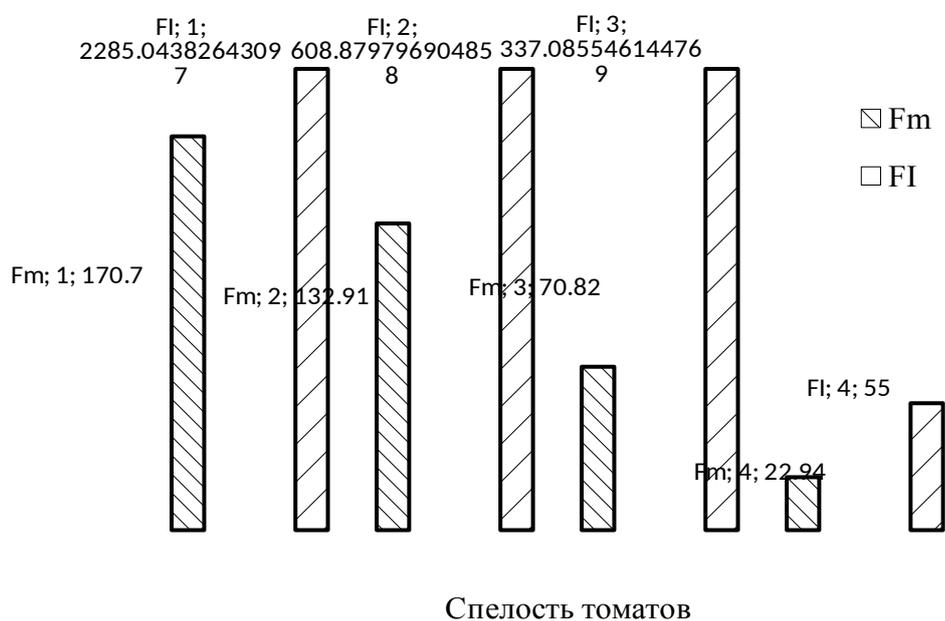


Рисунок 45. - Графики зависимостей медленной  $F_m$  и быстрой  $F_i$  флуоресценций хлорофилла для сорта «Лезгинка»

Стадия полной зрелости плодов томата характеризуется низкими значениями медленной  $F_m$  и быстрой  $F_i$  флуоресценций хлорофилла.

Полученные графики (рисунок 45) свидетельствуют о высокой корреляции между зависимостями медленной  $F_m$  и быстрой  $F_i$  флуоресценции хлорофилла для сорта «Лезгинка» и степенями зрелости томатов.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено, что использование разработанного (по предложенному способу) устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов значительно повышает оперативность, эффективность и надежность такого контроля.

**Технологии применения электрической энергии в процессе хранения  
корнеплодов и динамического мониторинга их качества  
(Занфирова Л.В., Чистова Я.С.)**

В настоящее время, направление развития науки и техники в РФ, преимущественно, задается стратегиями Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы и Национальной технологической инициативой 2035.

Целью Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства является обеспечение стабильного роста производства сельскохозяйственной продукции за счет внедрения и развития отечественных технологий, в том числе, производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, современных средств диагностики и методов контроля качества сельскохозяйственной продукции [82], Национальная технологическая инициатива (НТИ) направлена на развитие и создание в России перспективных технологических рынков и отраслей, предусматривает взаимодействие между государством, бизнесом и наукой. В рамках НТИ сформировано 13 ключевых рынков, таких как: Аэронет (воздушный транспорт), Автонет (автомобильный транспорт), Фуднет (пища), Энерджинет (энергетика), Технет (промышленность), Эдунет (образование) и прочие. Каждый из рынков развивается согласно своей дорожной карте, которые периодически дорабатываются и обновляются. Так, главной целью обновленной дорожной карты рынка Фуднет 2.0, стало формирование в России «пищевой индустрии 4.0», способной к конкуренции на мировых рынках, и основанной на цифровизации, сетевых рыночных моделях, биотехнологиях и ресурсоэффективности, видоизменении продуктов и услуг с учетом запросов современных потребителей.

В рамках данной работы, мы рассмотрим некоторые аспекты развития

технологий процесса оценки качества, закладки на хранение и сохранения товарной привлекательности сельскохозяйственной продукции, и ее пищевой ценности, в период от уборки до реализации.

Обеспечение граждан России качественными и доступными продуктами питания отечественного производства – одна из актуальных задач АПК. Корнеплоды являются важной составляющей продуктовой корзины населения России, а также используются в качестве сырья в перерабатывающей промышленности.

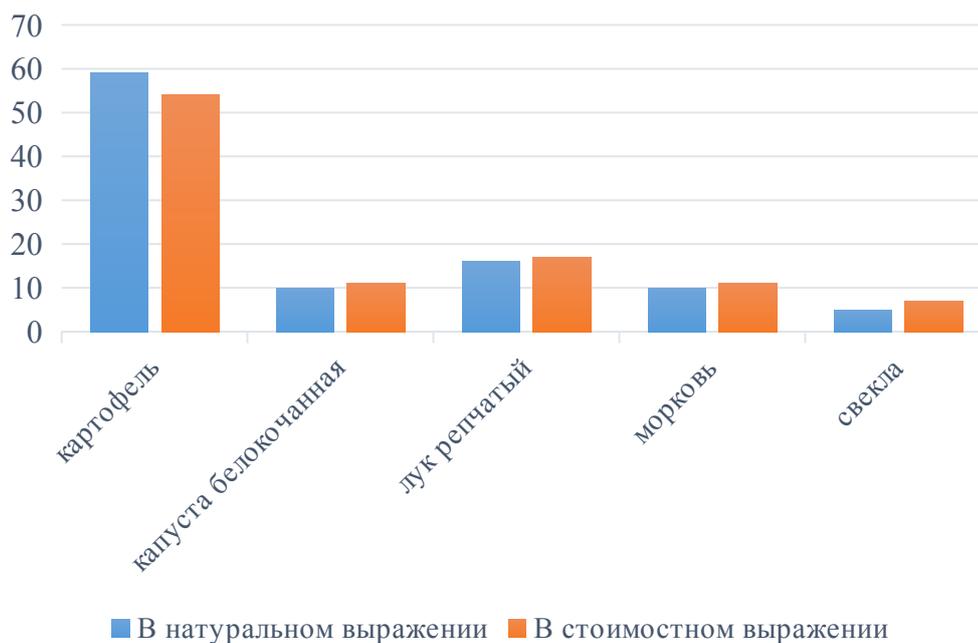
Корнеплоды – это овощные культуры, в корнях которых откладываются питательные вещества. К ним относят свеклу, морковь, редис, репу, брюкву, петрушку, сельдерей, цикорий и прочее. Мы будем рассматривать корнеплоды, входящие в так называемый «борщевой набор»

Борщевой набор – это определенный набор часто употребляемых среднестатистическим жителем нашей страны продуктов, из которых, в том числе, можно приготовить борщ. В состав борщевого набора входят: картофель, капуста, лук, свекла, морковь, чеснок.

Существует также, «индекс борща» (borsch index) – ВІ, который используется для формирования комплексной оценки покупательной способности россиян, по аналогии с «индексом Биг-Мака», который был впервые описан в сентябре 1986 года в журнале The Economist, как неофициальный способ оценки доступности потребительской корзины в разных странах мира.

То есть, термин «борщевой набор» – это экономический показатель, по которому осуществляется мониторинг динамики потребительских цен в РФ.

НаРисунок 46, показано процентное соотношение предлагаемых потребителю овощей входящих в борщевой набор. Наибольший процент, как в натуральном, так и в стоимостном выражении показывает картофель, так как он является компонентом многих других блюд, а затем, по нисходящей располагаются: репчатый лук, белокочанная капуста, морковь и свекла.



*Рисунок 46. – Специфика рынка борщевых наборов*

Минсельхоз РФ ожидает рост урожая овощей борщевых наборов, по сравнению с показателем за 2021 год в России. Об этом говорится в сообщении в Telegram-канале министерства. «По итогам года ожидаем роста урожая овощей «борщевых наборов», – говорится в публикации.

Столовые морковь и свекла – незаменимые компоненты борщевых наборов, одни из популярных корнеплодных овощных культур, имеющие важное значение в питании человека, благодаря своему химическому составу, включающему углеводы, минеральные вещества и витамины.

По данным ряда исследователей, потери выращенных корнеплодов в процессе уборки, сортировки, транспортировки, хранения, подготовки к переработке и реализации могут составлять до 40 % урожая [82].

Корнеплоды чувствительны к условиям и технологиям уборки хранения, поскольку малая толщина их покровных тканей, большое содержание питательных веществ и влаги способствуют их физическим и микробиологическим повреждениям.

Так, в качестве одной из основных причин снижения эффективности производства столовой свеклы следует считать ее значительные потери в процессе хранения. Причинами их возникновения является естественная

убыль массы, обусловленная испарением воды, а так же поражение грибными и бактериальными болезнями [83]. Масштабы потерь при хранении определяются суммой различных причин: сортом свеклы; условиями роста корнеплодов и агротехникой их возделывания; технологией и временем уборки; послеуборочной доработкой; особенностями хранения. Однако, основным фактором, определяющего величину потерь продукции при хранении, признана ее лёжкость – потенциальную способность храниться в течение определенного периода времени без значительных потерь и снижения качества, которая существенно зависит и от сортовой особенности культуры.

Результаты исследований по сохраняемости корнеплодов свеклы разных сортов и их устойчивости к болезням представлены в Таблица 15.

Таблица 15

**Сохраняемость и поражаемость болезнями некоторых сортов и гибридов свёклы столовой**

Сорт/гибрид	Товарная продукция%	Потери%		
		Всего	Массы	Болезни
<b>Селекция Россия</b>				
Бордо 237	91,5	8,5	7,0	1,5
Бордовая ВНИИО	89,2	10,8	6,8	4,1
Двусемянная ТСХА	88,8	11,2	7,2	4,0
Деметра	69,5	30,5	5,9	24,6
Детройт	53,8	46,2	8,2	38,1
Маришка	94,2	5,9	5,4	0,5
Мулатка	56,6	43,5	7,5	36,0
Одноростковая	73,2	26,8	6,1	20,7
Русская односемянная	91,1	9,0	5,9	3,1
Славянка	44,2	55,8	6,1	49,8
<b>Голландская селекция</b>				
Боро F1	53,2	46,9	7,0	39,9
ВоданF1	72,6	27,4	7,9	19,6 1
Пабло F1	88,1	11,4	7,7	3,7
Экшен F1	50,0	50,0	10,6	39,5

В процессе двухгодичного эксперимента, исследователи хранили

столовую свеклу в холодильниках, при диапазоне температур от 0 °С до + 1°С и относительной влажности воздуха 90-95%, в тканых полипропиленовых мешках.

Сохраняемость корнеплодов столовой свеклы оценивали после 7 месяцев хранения, по фактическому выходу товарной продукции. В качестве критериев оценки использовали измерения: общую убыль массы; потери от болезней; нарушения структуры. Сохранность и подверженность заболеваниям различалась в зависимости от сорта и погодных условий, предшествующих уборке: в сухую и теплую предуборочную погоду, корнеплоды полностью вызревали и меньше поражались заболеваниями.

Также, разница в длительности «успешного» хранения зависит от срока созревания корнеплодов: скороспелые сорта – хранятся менее продолжительный период времени и предназначены для ранней реализации или переработки; поздние и среднепоздние сорта – могут храниться до следующего урожая.

Следует также отметить, что значительная часть валовой продукции столовой свеклы закладывается на длительное хранение, а ее посевные площади составляют около 10% от всех посевных площадей овощных культур для открытого грунта выращиваемых в РФ. Морковь столовая занимает около 11% площадей, занятых овощными культурами на территории страны.

Усредненные результаты пятилетних исследований по сохраняемости корнеплодов моркови столовой разных сортов и их устойчивости к болезням представлены в .

Таблица 16

**Сохраняемость и поражаемость болезнями некоторых сортов и гибридов моркови столовой**

Сорт/гибрид	Товарная продукция%	Потери%		
		всего	массы	болезни
<b>Селекция Россия</b>				
Леандр	90,7	9,3	6,2	0
Лосиноостровская 13	90,4	9,6	5,6	4,1
Корсар	94,6	5,4	5,4	0
Факел	93,2	6,8	6,8	0
Осенний король	94,0	6,0	5,3	0,8
Шантенэ Королевская	94,0	6,1	5,1	0,8
Шантенэ Роял	90,1	9,9	7,2	2,7
Минор	90,8	9,2	6,3	2,9
НИИОХ 336	94,0	6,0	5,6	0,4
F1 Надежда	91,1	8,9	6,4	2,5
<b>Зарубежная селекция</b>				
F1 Берлин	94,5	5,5	5,5	0
F1 Канада	93,9	6,1	5,3	0,9
F1 Найджел	90,6	9,4	5,9	3,5
F1 Ньюс	85,7	14,3	8,2	5,5

Оценивание сохраняемости корнеплодов моркови, проводилось после семи месяцев хранения при температуре от 0°С до +1°С и относительной влажности воздуха 90-95%. Самые высокие показатели сохраняемости продемонстрировали: российский сорт Корсар (94,6%) и гибрид зарубежной селекции – F1 Берлин (94,5%).

В средней полосе свеклу убирают раньше, чем морковь, обычно в первой половине сентября. Объясняется это тем, что свекла более требовательна к теплу, а корнеплод у нее возвышается над поверхностью почвы и, следовательно, может быть поврежден заморозками.

Столовая свекла должна соответствовать требованиям ГОСТ 1722-85. Свекла столовая свежая заготавливаемая и поставляемая. Технические условия»[84], а столовая морковь – ГОСТ 1721-85. Морковь столовая свежая, заготавливаемая и поставляемая. Технические условия.

Корнеплоды свеклы и моркови, закладываемые на хранение, сначала проходят визуальную оценку и ручной отбор.

Во-первых, оценивается внешний вид корнеплодов: чистота (без

налипших комков земли, не более 1% к массе корнеплода); отсутствие излишней влажности; форма и окраска (согласно сорту, но не значительные отклонения возможны); длина оставшихся листовых черешков (без них или не более 2 см); отсутствие глубоких тещин и механических повреждений (допускаются поверхностные зарубцевавшиеся дефекты не более 3 мм); отсутствие повреждений вредителями и признаков заболеваний; не помороженные и не вялые.

Во-вторых, осуществляется оценка органолептических показателей: исследуются запах и вкус – они должны соответствовать ботаническому описанию тестируемых сортов корнеплодов, а также выявляется содержание токсичных элементов, пестицидов и нитратов. Для анализа берутся пробы из каждой партии поступающих корнеплодов.

Корнеплоды, не соответствующие требованиям – отбраковываются, идут на переработку или на корм сельскохозяйственным животным.

Перед закладкой нового урожая на хранение, хранилище дезинфицируют формалином, сернистым ангидридом, известковым молоком, хлорной известью, аэроионами, озоном и аэрозолем ВИЗР-10-11, причем последние три вида дезинфицирующих агентов, можно применять и в процессе хранения корнеплодов. Поскольку озон обладает бактерицидным и фунгицидным действием, но при этом не проникает внутрь хранящейся продукции, периодическое озонирование хранилищ позволяет сократить потери клубнеплодов от загнивания и их естественную убыль. Хотя следует отметить, что плесневые грибы не обладают абсолютной чувствительностью к озону.

Также, представляются перспективными исследования, касающиеся комплексной обработки корнеплодов электромагнитными полями крайне низких частот (частота 28 Гц, время обработки 30 минут, магнитная индукция 12 мТл) и биопрепаратом Витаплан (106 КОЕ/г), в результате которых установлено, что при обработке корнеплодов этим способом, в стандартных условиях хранения, общие потери уменьшаются на 5,5%.

Хранение столовой свеклы осуществляется несколькими способами: навалом; в секциях; закромах; таре (поддонах, ящиках, контейнерах). Способ хранения зависит как от назначения продукции (ранней или поздней реализации и др.), так и от возможностей хозяйства (его материально-технической базы). В хранилищах любого типа поддерживают благоприятный микроклимат, осуществляя вентиляцию (естественную, приточно-вытяжную, активную, принудительную) и искусственное охлаждение. В хранилищах современного типа применяют искусственное охлаждение и активную вентиляцию, что значительно увеличивает качество и количество сохраненного урожая.

Столовую морковь хранят подобными столовой свекле способами: в ящиках навалом; ящичных поддонах; в штабелях с укрытием полиэтиленовой пленкой; открытых полиэтиленовых мешках; тканевых мешках. Морковь сортируют по размеру и плотно укладывают вровень с краями тары и охлаждают (замедляя обмен веществ в корнеплоде). От уборки корнеплодов с поля, до закладки на хранение, в идеале, должно пройти не больше 24 часов.

Режим хранения всех корнеплодов подразделяют на три базовых периода:

- Лечебный (подготовительный);
- Охлаждения;
- Основного хранения.

Лечебный период хранения нужен для полноценной подготовки урожая к успешному хранению. В этот период, в среднем длящийся 8-10 суток, корнеплоды активно вентилируют при температуре от 10 °С до 12 °С и высокой относительной влажности воздуха (90-95%). Созданные условия, позволяют, поврежденным в процессе уборки и транспортировки корнеплодам, восстановить раневые поверхности и более эффективно противостоять увяданию и проникновению вредоносных агентов.

В период охлаждения, корнеплоды вентилируют холодным воздухом, постепенно понижая температуру (0,5-1 °С/сутки) и доводя ее до температуры оптимального режима хранения: корнеплоды свеклы от 0°С до +4°С (причем, при температуре от +2°С до +4°С потери от грибных болезней снижаются); корнеплоды моркови от 0°С до 2°С. Длительность периода охлаждения в среднем составляет от 10 до 15 суток. Период основного хранения наиболее длителен и может составлять от 4-6 месяцев и больше.

Крайне важным и трудоемким в период основного хранения становится контроль качества сохраняемых корнеплодов. Он предусматривает:

- периодический мониторинг технических и санитарных параметров в помещениях и тары хранения;
- измерение, оценка и поддержание показателей температуры и влажности в хранилище;
  - недопущение образования конденсата на сохраняемых овощах;
  - обязательный ежедневный визуальный осмотр сохраняемых корнеплодов;
  - ликвидация выявленных очагов поражения овощей и дезинфекцию мест их нахождения;
  - осуществление быстрой (при необходимости) товарной доработки корнеплодов и их реализации.

Тщательное проведение всех контрольных мероприятий, является залогом хорошего качества и минимальных потерь сохраняемой продукции. Но даже при строгом соблюдении регламента всех выше описанных элементов контроля, фиксируются достаточно весомые потери корнеплодов борщового набора (Таблица 15 и ). Это связано, в первую очередь, с естественными ограниченными возможностями анализаторной системы человека, и его общим утомлением от монотонного труда с многократно повторяющимися стереотипными действиями. Следовательно, активное внедрение современных технологий сбора и анализа данных [20], с их быстрой последующей обработкой, позволит облегчить труд людей в системе

АПК в целом [85], и эффективно осуществлять раннюю диагностику порчи корнеплодов в частности.

Наиболее интересными и перспективными, для оценки качества сохраняемой продукции, в режиме 24/7, являются технологии машинного зрения и Big Data (большие данные). Эти цифровые технологии позволяют удаленно «видеть», фиксировать, сравнивать и сопоставлять получаемые данные со множеством факторов и показателей одновременно. Машинное зрение и большие данные уже становятся неотъемлемой составляющей сельского хозяйства во многих странах мира. Они активно применяются для мониторинга полей сельскохозяйственного назначения: цифровые камеры позволяют отслеживать состояние и передвижение поголовья скота или проводить динамическую фиксацию роста и развития растений, определяя их потребности и своевременно предупреждая о возникших проблемах и путях их устранения. Машинное зрение и большие данные используются для дифференциации сельскохозяйственной продукции по виду, цвету, форме, наличию разнообразных повреждений и многим другим параметрам.

Применение технологии машинного зрения, позволяет успешно работать с биологическими объектами со сложной, отличной от линейной формой, какими и являются корнеплоды. Возможность восприятия и анализа многомерных объемных объектов системами технического зрения, достигается посредством лазерного луча, цифровых 3D камер высокого разрешения и чувствительности, фотоэлектрического преобразования информации и соответствующим алгоритмам обработки поступающей информации. Алгоритмы обработки формируются на основе максимально большого количества загруженных в память компьютера вариантов возможных дефектов корнеплодов (Big Data). На этой основе формируется цифровой эталон качественного корнеплода каждого вида, и закладываются возможные отклонения, которые также можно оценивать как вариант нормы. В результате сопоставления, «обученная» система машинного зрения может эффективно контролировать изменения параметров эталонного корнеплода:

цвет, форму, размер, температуру, влажность и прочие значимые характеристики.

Закладка качественных корнеплодов на хранение и тщательный мониторинг их состояния на всем протяжении этого процесса, позволяют существенно снизить потери продукции, но также немаловажным фактором являются условия длительного хранения. Наиболее эффективным способом длительного хранения корнеплодов, является хранение в овощехранилищах с активной вентиляцией. Это сложный комплекс вентиляционного оборудования в совокупности с различными системами воздуховодов, требующий точной установки на отведенные места контейнеров с корнеплодами в хранилище [86]. Одними из самых современных систем активного вентилирования являются следующие:

*Аспирационная стена.* Конструкция этой системы предполагает выстраивание внутри хранилища, параллельно внешней стене, специальной подпорной стены с вертикальными проемами. Контейнеры с корнеплодами выстраивают в определенном порядке вдоль проемов в стене. Система подготовки воздуха располагается между двумя стенами – основной и подпорной, здесь же, на высоте двух метров, монтируются высоконапорные вытяжные вентиляторы, которые выполняют несколько функций: удаление отработанного воздуха из коридоров через проемы, за счет чего между контейнерами создается зона пониженного давления и происходит продувка контейнеров; выброс отработанного воздуха из коридоров в окружающую среду или, после смешивания со свежим воздухом, возвращение обратно в хранилище.

Кроме вентиляторов, в здании хранилища, также необходима холодильная система, которая работает в теплые месяцы хранения. Для этого устанавливают специализированные воздухоохладители, в которых, с помощью определенного расположения вентиляторов, проталкивающих воздух, происходит циркуляция воздуха. Важным аспектом проектирования такой системы является грамотный расчет электропривода вентиляторов [60].

### **Щелевая стена**

Конструкция предполагает наличие щелей в стене, совпадающих с проемами в контейнерах для вил погрузчика. Контейнеры расставляют вплотную к стене, и циркуляция воздуха происходит по созданным каналам, вентилируя сохраняемые корнеплоды. Эффективность технологии достигается за счет правильного подбора и расположения технологического оборудования [83], к которому относятся: вентиляционная система; холодильная система; система увлажнения. Необходимые параметры в овощехранилище поддерживаются за счет системы автоматического контроля, которая регулирует работы всех компонентов систем, работающих от электрического привода.

*Напорная стена.* В отличие от предыдущих конструкций, в данной системе выстраивается подпорная стена (которая отгораживает вентиляционную камеру, где располагаются вентиляторы, впускные и выпускные клапаны), через отверстия в которой, воздух нагнетается не в сами контейнеры, а в коридоры, образованные выстроенными определенным способом этими контейнерами. Свежий воздух поступает в хранилище через приточные клапаны, проходя через вентиляторы. Под воздействием давления, воздух вынужден проходить через продукцию, насыщаясь влагой и удаляя CO<sub>2</sub>. Выходящий воздух, считается отработанным и естественным путем удаляется из хранилища через выпускные клапаны.

*Подпольные каналы.* Через впускные клапаны подпорной стены свежий воздух поступает в камеру смешивания, где, соединяясь с рециркуляционным воздухом хранилища, приобретает необходимую температуру и влажность, поступает в насыпь продукции по подпольным воздуховодам. Для коррекции температуры и влажности поступающего воздуха используются рециркуляционные клапаны, увлажнители, нагреватели и охладители. Напорные вентиляторы могут устанавливаться как непосредственно в каждый подпольный канал, так и в фальшпол камеры подготовки воздуха. В арочных ангарах вентиляторы устанавливаются группой необходимой

мощности с торца ангара.

Продукция борщевого набора играет важную роль в продовольственной безопасности страны. Ориентир на умное сельское хозяйство, заложенный в дорожной карте развития рынка Фуднет, говорит о том, что сохранность сельскохозяйственной продукции должна реализовываться на высшем технологическом уровне. Ключевыми моментами в этом процессе являются: выбор наиболее лежких сортов корнеплодов; тщательная подготовка хранилищ и корнеплодов перед закладкой на хранение; мониторинг состояния овощей в процессе хранения; правильный температурно-влажностный режим в хранилищах. Оценка качества овощной продукции перед закладкой реализуется различными способами, но наиболее эффективным на наш взгляд является применение системы машинного зрения со сложной оптической системой в совокупности с самообучающейся нейросетью. Сохраняемость товарного качества корнеплодов, будет иметь наибольший процент при использовании в хранилищах систем активного вентилирования, предполагающих принудительное нагнетание воздуха в помещения и наличие автоматизированного контроля за всеми элементами системы. Совокупность применения описанных методик, позволит снизить риск развития болезней внутри хранилища и минимизировать количество единиц испорченной продукции в период хранения.

## Энергетическая оценка технологий (Сторчевой В.Ф., Сучугов С.В.)

На сегодняшний день на первое место вышло продовольствие и наличие и доступность энергии. Продовольствие обеспечивает питание человека, а энергоресурсы – функционирование промышленного производства и комфорт человека.

События последнего времени показало, что денежная оценка затрат на технологические процессы производства и стоимость энергоресурса не дает реальной оценки затрат. Здесь существенное влияние оказывает инфляция, спекуляция, введенные запретные меры [87]. Следствием явилось то, что финансовая оценка не дает объективной оценки затрат на производство.

Продажа энергоресурсов, сырья и материалов через биржу и хаотическое формирование цены на них приводит к необходимости изучения и анализа реальных затрат.

Затраты энергетические, материальные и трудовые переводят с применением энергетических эквивалентов в общие затраты энергии ( $\Sigma Q$ ) выраженное в Джоулях [90].

Анализируется технология производства по видам затрат и составляется энергетический баланс [91].

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5; \quad (99)$$

Составляющие энергетического баланса  $Q_1 \dots Q_5$  рассчитываем по выражениям 109, 110, 111, 112, 113.

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n X_{1i} \cdot Y_{1i} \cdot Z_{1i}; \quad (100)$$

$$Q_2 = \sum_{j=1}^m X_{2j} \cdot Z_{2j}; \quad (101)$$

$$Q_3 = \sum_{K=1}^P X_{3K} \cdot Z_{3K}; \quad (102)$$

$$Q_4 = \sum_{\ell=1}^r X_{4\ell} \cdot Z_{4\ell}; \quad (103)$$

$$Q_5 = \sum_{q=1}^t X_{5q} \cdot Z_{5q}; \quad (104)$$

где:  $i, j, k, l, q$  – вид основных, оборотных средств производства и трудовых затрат;

$X_{1i}$  – энергетический эквивалент вида основных средств производства, МДж/ на 1 кг массы средств;

$X_{2j}, X_{3k}, X_{4l}$  – энергетический эквивалент оборотных средств, МДж/кг;

$X_{5q}$  – энергетический эквивалент трудовых затрат, МДж/Чел.ч;

$Y_{1i}$  – время работы машин, задействованной в технологическом процессе, ч;

$Z_{1i}$  – масса основных средств производства, кг;

$Z_{2j}, Z_{3k}$  – затраты оборотных средств, кг;

$Z_{4l}$  – расход энергоресурсов, кг или кВт.ч;

$Z_{5q}$  – трудовые затраты, чел.ч.

Таким образом, подетальный анализ затрат с применением энергетических эквивалентов позволяет:

- определить реальные затраты на технологический процесс;
- дать оценку применяемой техники:
- использовать оборудование, особенно в производстве, продовольствия которое позволяет улучшить производительность и сохранность, к примеру технологии, с созданием озонно -ионной воздушной среды.
- рассматривать много вариантность применяемых технологий и используемой техники с выбором наиболее экономичных.

## **Особенности применения комбинированного облучения в АПК** **(Овсянникова Е.А.)**

Для поддержания оптимальной температуры при содержании молодняка птицы и сохранения поголовья от болезней в сельском хозяйстве применяется инфракрасный обогрев и ультрафиолетовое облучение. Наибольшая эффективность использования этих двух типов обогрева может быть в комбинированном облучателе с равномерной зоной распределения и инфракрасного обогрева и ультрафиолетового облучения. Для решения этой проблемы предлагается сравнить расчет равномерного облучения ИК и УФ для облучателя ИКУФ и экспериментального облучателя.

Необходимо проанализировать на основании расчётов равномерность инфракрасного и ультрафиолетового облучения у существующих типов комбинированных облучателей, разработать конструкцию облучателя с равномерным распределением двух типов облучения.

Основу расчетов представляет точечный метод, использование которого обусловлено необходимостью учета неравномерности распределения облученности. Нужную равномерность облучения устанавливают в зависимости от допустимых по зоотехническим требованиям отклонений температуры от номинальной.

Задача расчета заключается в определении высоты подвеса облучателей и корректировки напряжения, подводимого к ним в соответствии с заданным значением ИК облученности, а также в обеспечении в зоне обогрева равномерного облучения.

Такой подход к расчету ИК облучательных установок отвечает требованиям минимизации энергозатрат в процессе локализованного обогрева молодняка животных и птицы.

На Рисунок 47 приведена кривая  $E(r)$  распределения облученности на

горизонтальной поверхности под облучателем.

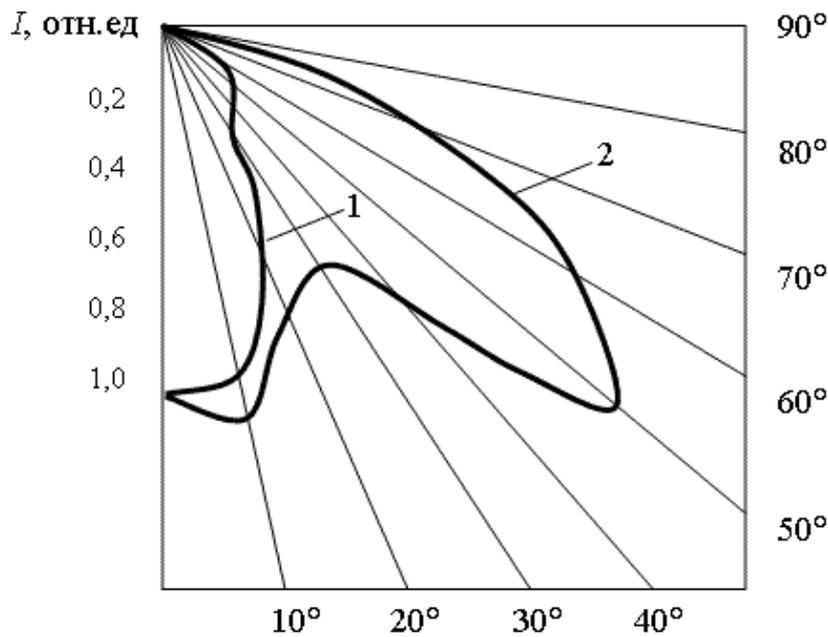


Рисунок 47. – Кривая  $E_{(r)}$  распределения облученности на горизонтальной поверхности под облучателем

Находим распределение ИК облученности на горизонтальной поверхности с лампой ИКЗК 215 – 225 – 250. По Рисунок 47 определяем силу света, значения приведены в Таблица 17.

Таблица 17

**Значения сил света лампы ИКЗК 215 – 225 – 250 в разном направлении**

$\alpha$	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
<b>I</b>	44	45	38	48	82	98	85	38	5	0

Для построения  $E_{ИК} = f(r)$ , принимаем высоту  $h_0 = 1$  м, тогда

$$E_{ИК} = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} \text{ упростим : } E_{ИК} = I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha ;$$

$\operatorname{tg} \alpha$  удобен для построения, так как при  $h_0 = 1$  м, радиус численно равен  $\operatorname{tg} \alpha$  для соответствующего  $\alpha$ ;  $E_{0 \max} = 155 \text{ Вт/м}^2$  - максимальная облученность в зоне обогрева для реперной высоты  $h_0$ .

Для уточнения расчетного количества ламп необходимо знать (минимальную или максимальную) фактическую облученность от одной лампы в зоне обогрева. Удобнее взять максимальную облученность от одной

лампы на расчетной высоте  $E_{1\text{max}}$  [92].

На основании уравнения светотехники  $E_{\text{ук}} = \frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$  вычисляем

$$E_{1\text{max}}:E_{1\text{max}} = E_{1\text{оmax}} \frac{h_0^2}{h^2} = 155 \frac{1,0}{(1,227)^2} = 102,95 \text{ Вт/м}^2;$$

На основании расчетов составляем яем таблицу и строим график ЕИК, по таблице строим график, по графику определяем значение радиусов зоны с равномерностью облучения не менее 0,7. Для  $h_0 = 1$  м, составляем таблицу и строим график ЕИК

Таблица 18

**Результаты расчетов**

$\alpha$	0	5	15	25	35	45	50	55
<b>I</b>	44	45	42	38	48	82	98	85
<b>Cos A</b>	1	0,988	0,9	0,74	0,55	0,35	0,27	0,19
<b>ЕИК</b>	44	44,46	37,8	28,12	26,4	28,7	26,46	16,15
<b>tg A</b>	0	0,09	0,27	0,47	0,7	1	1,19	1,43

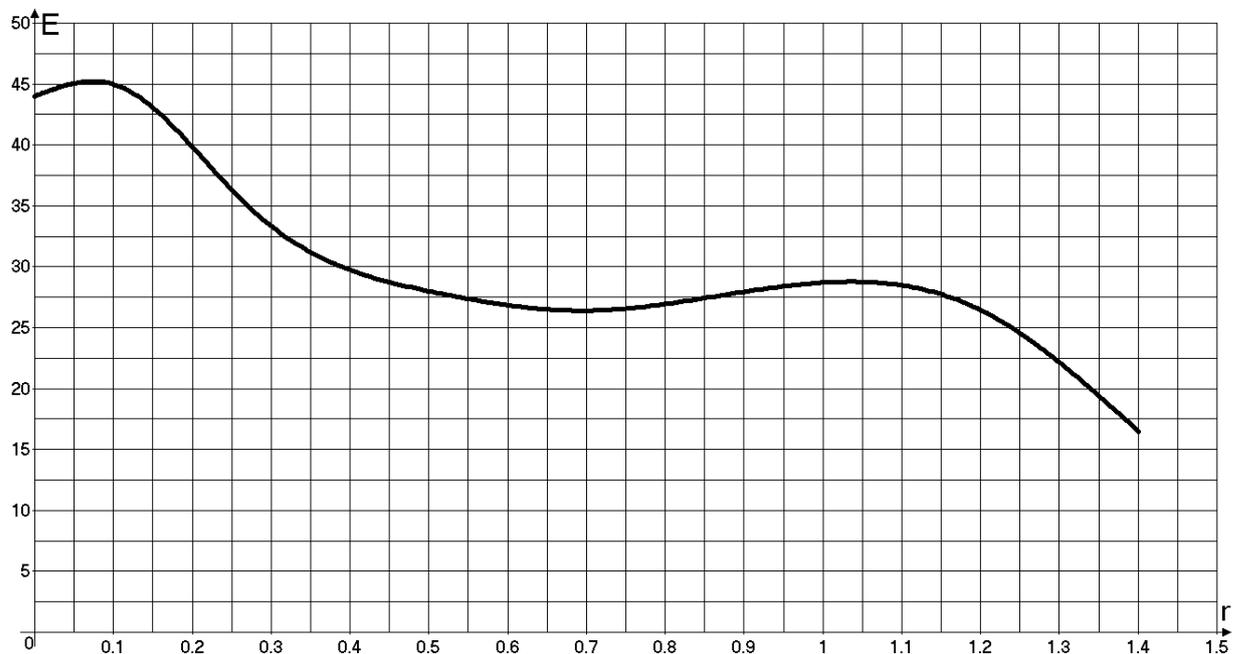


Рисунок 48. – График распределения E зоны обогрева в зависимости от удаления от эпицентра под облучателем

По графику находим радиусы зоны обогрева, затем по радиусам находим площадь зоны обогрева

$$R_0=1,2\text{ м} \quad R=0,28\text{ м};$$

Площадь зоны обогрева  $S=0,92\text{ м}^2$

Для нахождения расчетной высоты подвеса лампы, при которой будет выдержана требуемая равномерность, необходимо, исходя из формулы

$$hp = h_0 \frac{r_p}{r_o};$$

знать реперную (условную) высоту подвеса  $h_0$  и соответствующий ей реперный радиус зоны обогрева  $r_0$ . Реперный радиус зоны обогрева  $r_0$  можно найти из графика распределения ИК облученности под выбранной лампой.

$$E_{o \min} = E_{o \max} Z = 155 \cdot 0,764 = 118,42 \text{ Вт/м}^2;$$

Затем по графику находим  $r_o = 0,28 \text{ м}$

$$\text{Вычисляем } hp = h_0 \frac{r_p}{r_o} = 1 \cdot \frac{0,319}{0,28} = 1,227 \text{ м};$$

По такому же принципу расчет делаем для лампы ЛЭ15

Оси ламп у комбинированного облучателя ИКУФ находятся на одной линии расстояние между центром осей симметрии равно 30 см, можно определить площадь перекрытия.

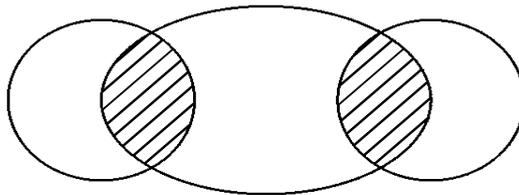


Рисунок 49. – Зоны ИК и УФ облучения комбинированного облучателя ИКУФ

На Рисунок 49 видно, что у комбинированного облучателя ИКУФ зона ИК и УФ одновременного облучения менее 25% от зоны ИК

Аналогично делаем расчет для комбинированного облучателя ЛУЧ, с условием, что лампы расположены под наклоном.

Находим распределение ИК облученности для облучателя ЛУЧ. Определяем силу света, значения приведены в Таблица 20.

Таблица 19

**Значения широкой кривой силы излучения для облучателя ЛУЧ в  
разном направлении**

$\alpha$	0	5	15	25	35	45	50	55
I	82	48	38	42	45	44	45	42

Таблица 20

**Значение глубокой кривой силы излучения для облучателя ЛУЧ в  
разном направлении**

$\alpha$	0	5	15	25	35	45	50	55
I	31	77	104	128	148	155	148	128

Для построения  $E_{ик} = f(r)$ , удобнее всего принять высоту  $h_0 = 1$  м, тогда

$$E_{ик} = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}, [93] \text{упростим : } E_{ик} = I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha ;$$

Для уточнения расчетного количества ламп необходимо знать (минимальную или максимальную) фактическую облученность от одной лампы в зоне обогрева. Удобнее взять максимальную облученность от одной лампы на расчетной высоте  $E_{1рmax}$ .

На основании уравнения светотехники  $E_{ик} = \frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$  вычисляем  $E_{1рmax}$ .

$$E_{1рmax} = E_{10max} \frac{h_0^2}{h^2} = 155 \frac{1,0}{(1,227)^2} = 102,95 \text{ Вт/м}^2;$$

На основании расчетов составляем , по таблице строим график, по графику определяем значение радиусов зоны с равномерностью облучения не менее 0,7.

Для  $h_0 = 1$  м, составляем таблицу и строим график  $E_{ик} = f(r)$

Таблица 21

**Расчет ЕИК для широкой кривой силы излучения**

A	0	5	15	25	35	45	50	55
I	82	48	38	42	45	44	45	42
Cos A	1	0,988	0,9	0,74	0,55	0,35	0,27	0,19
ЕИК	82	47,4	34,2	31,1	24,8	15,4	12,15	7,98
Tg A	0	0,09	0,27	0,47	0,7	1	1,19	1,43

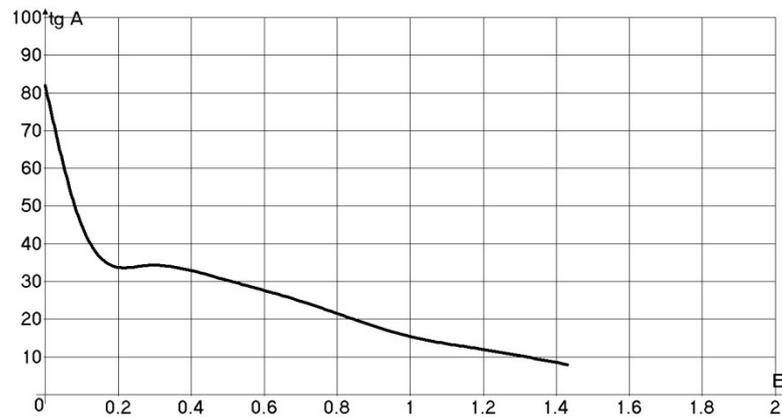


Рисунок 50. – График расположения радиусов зоны обогрева

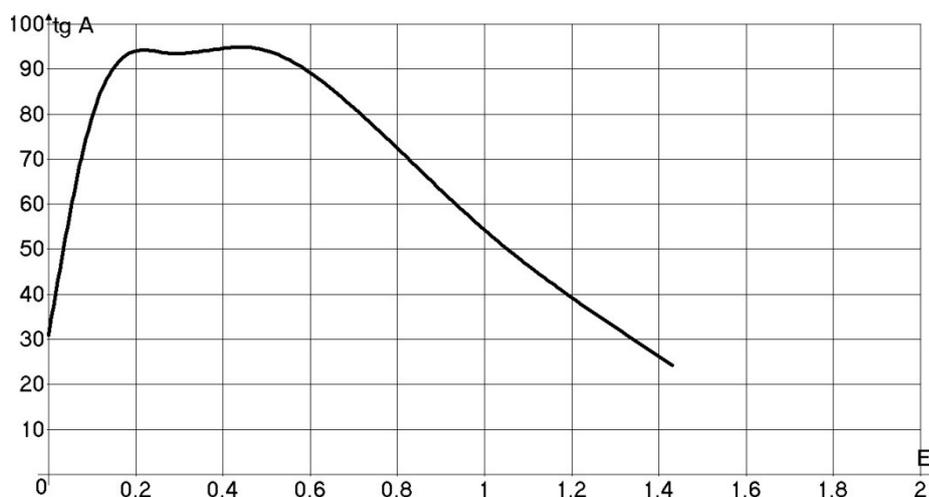
Судя по графику зона обогрева будет располагаться от  $E=0,1$  до  $E=0,8$ .

Аналогично делаем расчет для глубокой кривой силы света, результаты расчёта представлены в Таблица 22.

Таблица 22

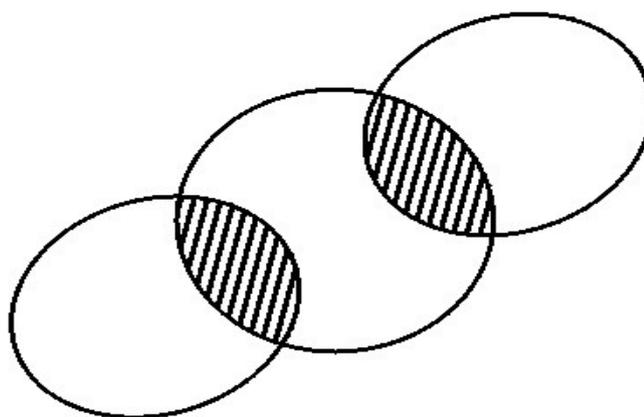
**Значения для глубокой кривой силы излучения**

A	0	5	15	25	35	45	50	55
I	31	77	104	128	148	155	148	128
Cos A	1	0,988	0,9	0,74	0,55	0,35	0,27	0,19
ЕИК	31	76,1	93,6	94,72	81,4	54,25	39,96	24,32
tg A	0	0,09	0,27	0,47	0,7	1	1,19	1,43



*Рисунок 51. – График расположения радиусов зоны обогрева*

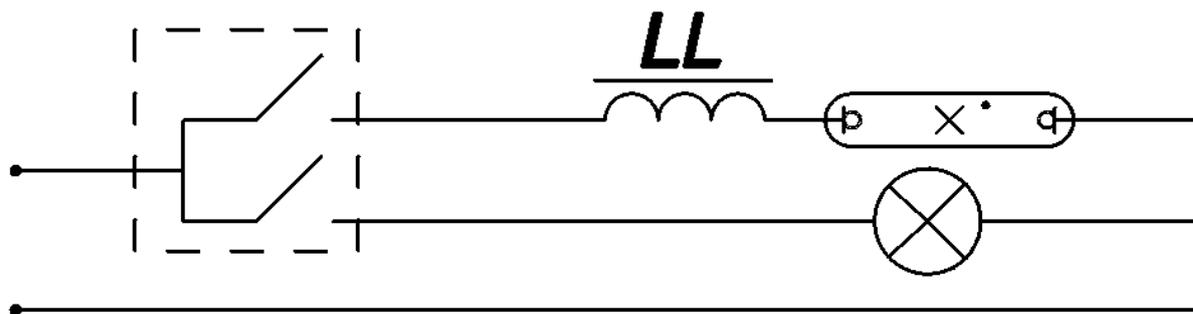
Так как оси симметрии ламп у комбинированного облучателя ЛУЧ расположены перпендикулярно, можно определить площадь перекрытия



*Рисунок 52. – Зоны ИК и УФ облучения комбинированного облучателя ЛУЧ*

Исходя из этого делаем вывод, зона перекрытия с равномерностью не менее 0,7 ИК и УФ одновременного облучения от зоны ИК не более 50%.

Из всего выше доказанного следует сделать вывод, что точки осей симметрий должны совпадать. Для этого необходимо сконструировать новый облучатель и исследовать его равномерность в зависимости от высоты подвеса облучателя.



*Рисунок 53. – Электрическая принципиальная схема проектируемой облучательной установки*

В проектируемом облучателе, для того, чтобы зоны ИК и УФ обогрева были совмещены, предлагается использовать кольцевую лампу для УФ облучения и лампу ИКЗК для ИК облучения. Для отражения потока излучения предлагается использовать промышленный светильник РСП 05 IP65 с ПРА Россия представлен на Рисунок 54.



*Рисунок 54. – Комбинированный облучатель*

Так как зоны инфракрасного и ультрафиолетового излучения имеют наиболее общую зону для двух излучений, чем проанализированные ранее облучатели ИКУФ и ЛУЧ, то можно сделать выводы, что, находясь под данным облучателем цыплята будут одновременно и получать дозу УФ излучения и тепло от ИК излучения.

Так как выращивание птиц на промышленной основе, происходит при без выгульном содержании птицы, в связи с этим проявляется сезонный недостаток солнечного излучения. Для уменьшения негативного последствия этого достигается правильной организацией ультрафиолетового облучения и режима освещения [34], [94], [95].

Разработанная конструкция позволяет повысить эффективность использования искусственного излучения, равномерность облучения молодняка, что даёт возможность получать больший выводок цыплят.

Выявлено, что равномерность облучения молодняка в меньшей степени зависит от расстояния между облучателями и в большей от высоты подвеса облучателя.

Теоретические исследования равномерности молодняка сельскохозяйственных животных и птицы показали, что минимальная высота подвеса облучателей над головами птицы не должна быть меньше 0,5 м.

Для увеличения облучаемой площади обогрева молодняка и определения конструкции облучателя необходимо, чтобы площадь облучения УФ спектра совпадала с ИК зоны облучения, поэтому источники излучения должны давать круговую зону облучения и ось симметрии источников УФ и ИК излучений должны совпадать, это возможно, если использовать кольцевую и ИКЗК лампы.

Была разработана облучательная установка типа ИЗКОМБ. Установка предназначена для выращивания молодняка сельскохозяйственных животных и птицы при отсутствии или недостатке естественной освещенности как в летний, так и в зимний период.

Установка оборудована серийными источниками света, используемыми для

условий выращивания молодняка сельскохозяйственных животных и птицы. Систему облучения составляют светильники с высокоэффективными кольцевыми лампами мощность 22 и 32 Вт и лампой ИКЗК, объединенных в единый модуль с общим пультом управления. Пульт управления обеспечивает одновременное включение всех ламп. Данная установка предназначена для использования в крупных сельскохозяйственных предприятиях.

Светильники предназначены для стационарной подвески на высоте не менее 30 см над уровнем птицы (в зависимости от световой зоны). Благодаря большой электрической мощности облучатели установки располагаются на высоте, не создающей помехи при уходе за птицей, и не требует демонтажа облучателей при проведении ремонтных и профилактических работ.

Установка обеспечивает удовлетворительную стабильность интенсивности, спектрального состава и равномерности облучения.

По сравнению с широко распространенными, но малоэффективными облучателями данная установка обеспечивает снижение удельной мощности и расхода электроэнергии на 10%, сокращение количества облучателей, расхода кабельной продукции, облегчает уход за молодняком сельскохозяйственных животных и птицы, сократить срок выращивания молодняка, увеличить возможность получать большее количество цыплят на выходе из цеха доращивания.

## **Интеграция систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока (Меликов А.В.)**

В настоящее время направление инноваций в электрических сетях приближает переход от крупных электростанций к множеству небольших децентрализованных местных и индивидуальных энергоисточников (в большинстве случаев электрогенерация которых осуществляется на основе ВИЭ) вместе с системами накопления энергии. Поэтому переход от архитектуры сетей переменного тока к архитектуре сетей постоянного тока получает всё большее одобрение специалистов. В частности, постоянно растущие нагрузки электронные постоянного тока (массовое использование электронных устройств) и необходимость разработки эффективных методов управления энергопотреблением в связи с широким применением ВИЭ являются одними из наиболее важных причин, которые подталкивают к созданию архитектуры сетей постоянного тока [96].

ВИЭ являются источниками постоянного тока или, по крайней мере, имеют в своём составе устройство постоянного тока. Более того, точка соединения нагрузок и накопителей энергии подпитывается постоянным током. Описанные выше особенности хорошо вписываются в топологию микросетей постоянного тока, объединяющих в себе генераторы и нагрузки, подключённые к одной шине постоянного тока. Другими словами, источник питания с выходом постоянного тока подключается к шине постоянного тока напрямую или с помощью преобразователей постоянного тока в постоянный.

Повышение эффективности работы сети достигается сокращением числа ступеней преобразования мощности. Кроме того, схема управления в микросетях постоянного тока проще соответствующей схемы микросетей переменного тока, поскольку в ней отсутствуют проблемы с потоком реактивной мощности и синхронизацией.

Архитектура микросетей постоянного тока, как правило, включает два

уровня напряжения, а именно шины высокого и низкого напряжений (Рисунок 55).

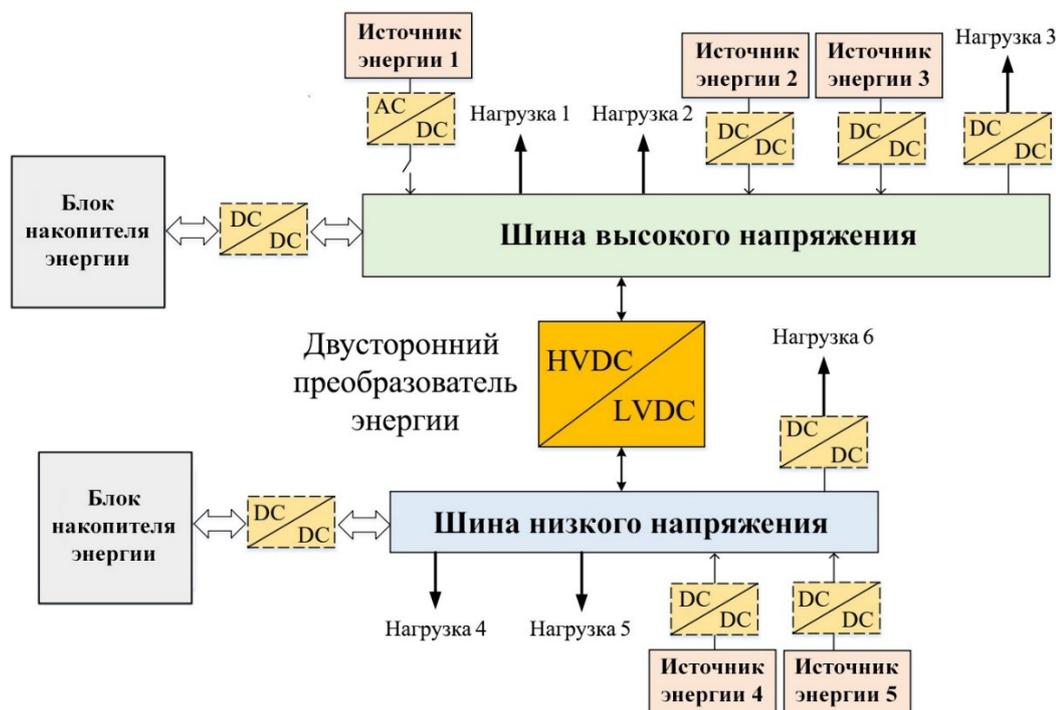


Рисунок 55. – Архитектура типичной микросети постоянного тока

Обе шины соединены с нагрузками и источниками питания посредством силовых электронных преобразователей, что в совокупности обеспечивает двунаправленный поток энергии между шинами и устройствами. Микросети постоянного тока могут содержать накопители энергии для компенсации переходных процессов напряжения и стабилизации нагрузки, а также для соответствия требованиям, предъявляемым к управлению энергопотреблением [34].

Очень вероятно, что будущие распределительные электрические сети будут основаны на архитектуре микросети постоянного тока [97], [98], [99], которая может быть интегрирована как в сеть, так и в рынок электроэнергии и мощности. Например, электрифицированные транспортные средства, станции зарядки электромобилей, жилые, коммерческие и промышленные объекты. В целом, развитие микросети будет способствовать повышению роли потребителя в управлении энергосистемой.

Однонаправленные преобразователи (см. Рисунок 55) соединяют

нагрузки и генераторные установки, такие как фотоэлектрические системы и/или (небольшие) ветряные турбины, с шинами высокого и низкого напряжений, в то время как двунаправленные преобразователи постоянного тока в постоянный (DC/DC) отвечают за взаимосвязь между шинами и накопителями энергии. К сегодняшнему дню отечественные и зарубежные учёные для применения микросетей постоянного тока предложили различные топологии построения силовой части преобразователя. Среди них весьма привлекательным решением являются преобразователи постоянного тока в постоянный со встроенным высокочастотным трансформатором. Такая топология сети обеспечивает высокий КПД, гальваническую развязку и возможность переключения при нулевом напряжении. Кроме того, к преимуществам высокочастотного трансформатора относят высокую надёжность, малые габариты и низкую стоимость [31].

В этой работе рассматривается трансформатор с воздушным сердечником в качестве средства для реализации высокочастотного трансформатора и как способ упрощения проводки при использовании нескольких рассредоточенных генерирующих устройств в микросетях постоянного тока. Последнее особенно важно в бытовых и коммерческих микросетях. Действительно, при установке фотоэлектрических систем в зданиях такой подход улучшает интеграцию силовой электроники модульного уровня, придавая гибкость проектированию электрических сетей при одновременном упрощении процесса установки оборудования и работы по техническому обслуживанию. Кроме того, замена распределительных коробок фотоэлектрических панелей беспроводными системами передачи энергии и сокращение количества кабелей положительно отражаются на балансе всей системы [12], её надёжности. На Рисунок 56 представлены два способа присоединения ВИЭ малой мощности к шинам микросети здания посредством преобразователей постоянного тока в постоянный и системы беспроводной передачи энергии.

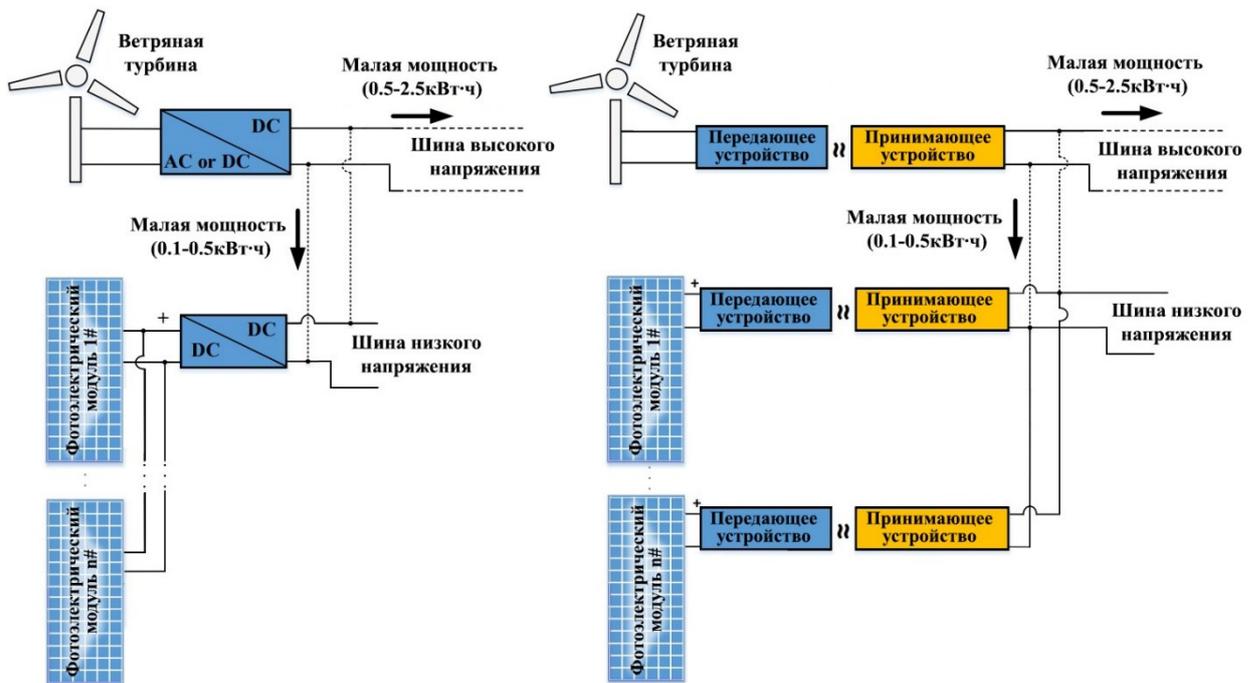


Рисунок 56. – Присоединение ВИЭ малой мощности к микросети здания:  
 а) преобразователями постоянного тока в постоянный,  
 б) системой беспроводной передачи энергии

Рассматриваемый в этой работе трансформатор с воздушным сердечником состоит из двух слабо связанных катушек для беспроводной передачи энергии между источником и нагрузкой. Известно, что недостатком системы беспроводной передачи энергии является её ограниченность (как и любая другая беспроводная технология, эта тоже имеет определённые границы). Однако недавние исследования показали, что при современном конструктивном исполнении электрических сетей система беспроводной передачи энергии, с точки зрения удельной мощности, может достичь результатов, сопоставимых с преобразователями электрической энергии (особенно в случаях применения в системах распределённой генерации с низким энергопотреблением). Более того, согласно научным трудам Г.А. Човича (и его коллег) системы беспроводной передачи энергии характеризуются высокой надёжностью.

Базовая идея интеграции системы беспроводной передачи энергии, – обычно состоящей из источника постоянного напряжения, высокочастотного преобразователя напряжения, первичной (передатчик) и вторичной

(приёмник) катушек, выпрямителей напряжения и нагрузки, – в микросети постоянного тока заключается в разработке распределённой сети преобразователей (инверторов), способных использовать все возможные источники энергии в здании (или транспортном средстве) в сочетании с различными накопителями энергии, такими как топливные элементы, аккумуляторы и суперконденсаторы. Широко распространёнными распределёнными источниками энергии являются фотоэлектрические модули (солнечные панели) или их массивы, малогабаритные ветряные турбины и микро-ТЭЦ. Вышеперечисленные источники энергии вполне могут быть интегрированы в здания с нулевым (или почти нулевым) потреблением, которые, как ожидается, станут важным компонентом будущих городских электрических сетей. В этом исследовании основное внимание уделяется системе беспроводной передачи электроэнергии с последовательной (продольной) компенсацией (Рисунок 57).

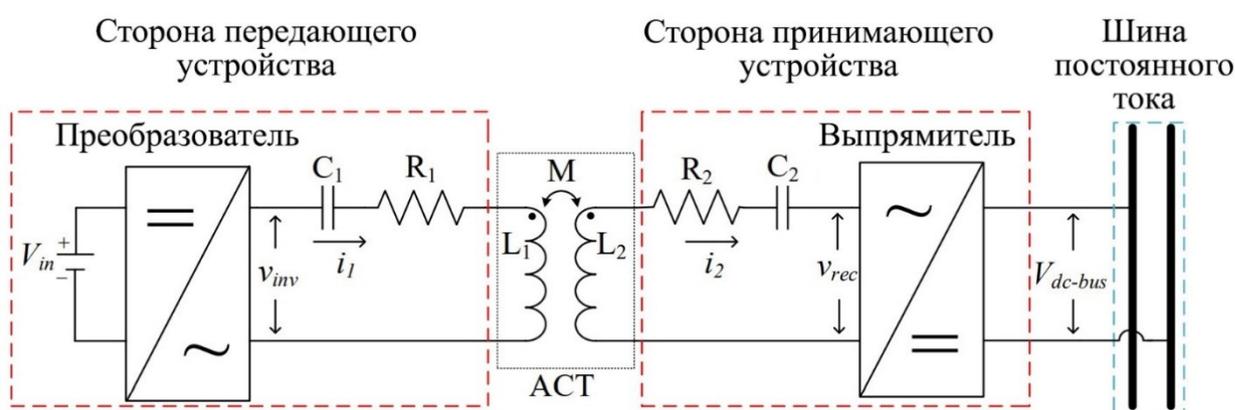


Рисунок 57. – Система беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией

Стоит отметить, что в некоторых случаях, например, с электромобилями существенным недостатком использования систем беспроводной передачи электроэнергии является наличие магнитного поля в зонах деятельности человека. Это, безусловно, критическая проблема, которая сегодня решается экранированием катушек в соответствии с требованиями Международной комиссии по защите от неионизирующего излучения.

Анализ системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией проводился в работах Э. Гатиса («Проектирование, конструирование и управление системами индуктивной передачи энергии», 2016 г.), А. Купермана («Выбор компенсационных конденсаторов для ...», 2020 г.), О. Кнехта и Дж.В. Колар («Оценка эффективности IPT-систем с последовательной компенсацией для ...», 2019 г.) и др.; однако это были исследования систем, передача мощности в которых осуществлялась при чисто активной (омической) нагрузке. Объектом их исследований были зарядные устройства, в которых поведение систем накопления энергии считается медленным. В этой работе анализ сосредоточен на характере нагрузки, которая рассматривается как источник (питания) постоянного напряжения. Поэтому это исследование системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией отличается от предыдущих учётом эквивалентного сопротивления участка сети. В частности, выпрямитель, связанный с шиной напряжения (см. Рисунок 57), не может быть смоделирован с эквивалентным сопротивлением, особенно в случаях работы системы за пределами резонансной области.

В статье Г. Гуиди и Дж.А. Суул «Минимизация требований к преобразователям индуктивных систем передачи энергии с нагрузкой постоянного напряжения», 2016 г. рассматривается усовершенствованная модель, представляющая выпрямительное устройство с источником напряжения, математическое описание которой [модели] строится на предположении, что в диодном мосту и катушках коэффициент реактивной мощности (выпрямителя) равен единице. Это моделирование является более репрезентативным, чем эквивалентное сопротивление, но оно приводит к неточным результатам при расчёте выходной мощности системы из-за отличного от единицы коэффициента мощности, с которым фактически работает диодный мост. Поэтому требуется более детальная модель системы беспроводной передачи энергии, учитывающая коэффициент реактивной мощности диодного моста не равный единице.

По этой причине в этой работе рассматривается полный диапазон гармоник напряжения/тока, чтобы определить точное значение коэффициент реактивной мощности (выпрямителя).

Основной целью исследования является внедрение систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока для генерации и хранения электроэнергии, осуществляемых различными (небольшими) устройствами, подключёнными к сети или распределительной системе. По этой причине автором предпринята попытка подробного описания и анализа поведения такой системы.

Математический анализ системы беспроводной передачи энергии, изображённой на Рисунок 57, проведён во всём диапазоне гармонических составляющих. Анализ схемы выполнен для случая, когда нагрузка является источником постоянного напряжения, что позволяет адекватно моделировать подачу энергии в шину постоянного тока, и при условии, что проводимость тока на диодный мост осуществляется в непрерывном (безразрывном) режиме. Следовательно, диодный мост вместе с нагрузкой постоянного тока может быть представлен источником (генератором) напряжения прямоугольной формы. Аналогично, преобразователь с источником постоянного тока на входе также может быть представлен источником (генератором) напряжения прямоугольной формы. Таким образом, исследуемая схема включает два источника (генератора) напряжения прямоугольной формы, а именно  $v_{inv}(t)$  и  $v_{rec}(t)$ . Эти источники (генераторы) напряжения могут быть выражены по теореме Фурье в следующих гармониках:

$$v_{inv}(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{inv,h} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{inv,h} \sin(\omega_h t); \quad (105)$$

$$V_{inv,h} = \frac{4}{\pi} V_i \frac{1}{h}; \quad (106)$$

$$\omega_h = h\omega_s; \quad (107)$$

где  $V_i$  – источник постоянного тока на входе в преобразователь;

$V_{inv,h}$  – пиковое значение соответствующей гармоники;

$\omega_h = \omega_s = 2\pi f_s, h=1$  – основная угловая частота.

Аналогично, выходное напряжение  $v_{rec}(t)$ , представляющее собой диодный мост вместе с нагрузкой постоянного тока, описывается соотношением:

$$v_{rec}(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{rec,h} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{rec,h} \sin(\omega_h t + \delta_h); \quad (108)$$

$$V_{rec,h} = \frac{4}{\pi} V_{dc-bus} \frac{1}{h}; \quad (109)$$

где  $\delta_h$  – разность фаз между  $v_{inv}(t)$  и  $v_{rec}(t)$ ,

$V_{rec,h}$  – пиковое значение соответствующей гармоники.

Для того, чтобы волна суммы гармоник имела прямоугольную форму ( $v_{inv}(t)$  и  $v_{rec}(t)$ ), угол каждой гармонической составляющей, согласно анализу Фурье, должен соответствовать угловой частоте  $\omega_h$ . Отсюда следует, что  $\delta_h$  можно выразить как:

$$\delta_h = h\delta_1, h > 1; \quad (110)$$

где  $\delta_1$  относится к основной гармонике.

Приведённое выше математическое описание позволит изучить систему беспроводной передачи энергии с точки зрения гармонических составляющих. Эквивалентная схема гармоники  $h$ -го порядка показана на Рисунок 58.

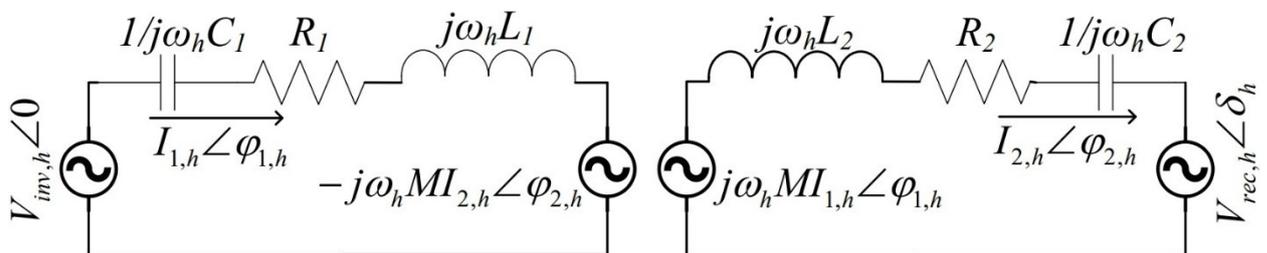


Рисунок 58. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией гармоники  $h$ -го порядка

Источник синусоидального напряжения  $V_{inv,h} < 0$  представляет гармонику  $h$ -го порядка выходного напряжения высокочастотного

преобразователя в первичном контуре. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  – паразитное сопротивление первичного и вторичного контуров, соответственно. Аналогично,  $C_1$  и  $C_2$  – конденсаторы постоянной ёмкости,  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности катушек.  $M$  – взаимная индуктивность.  $I_{1,h} < \varphi_{1,h}$  и  $I_{2,h} < \varphi_{2,h}$  – гармоники тока  $h$ -го порядка (амплитуда и угол) первичного и вторичного контуров, соответственно. Наведённое напряжение во вторичной обмотке, обусловленное током первичной обмотки, описывается соотношением:  $j\omega_h M I_{1,h} < \varphi_{1,h}$ , а наведённое напряжение в первичной обмотке (за счёт тока вторичной обмотки) характеризуется следующим неравенством:  $-j\omega_h M I_{2,h} < \varphi_{2,h}$ .

Согласно Рисунок 58, комплексное сопротивление на первичном и вторичном контурах определяются следующим образом:

$$\dot{Z}_{1,h} = R_1 + \frac{1}{j\omega_h C_1} + j\omega_h L_1; \quad (111)$$

$$\dot{Z}_{2,h} = R_2 + \frac{1}{j\omega_h C_2} + j\omega_h L_2; \quad (112)$$

Анализ эквивалентной схемы системы беспроводной передачи энергии можно продолжить применением теоремы о суперпозиции (см. Рисунок 59 и Рисунок 60), из которой вытекают следующие соотношения:

$$I_{11,h} < \varphi_{11,h} = \frac{(V_{inv,h} < 0) \dot{Z}_{2,h}}{M^2 \omega_h^2 + \dot{Z}_{1,h} \dot{Z}_{2,h}}; \quad (113)$$

$$I_{21,h} < \varphi_{21,h} = \frac{j\omega_h^3 C_1 C_2 M (V_{inv,h} < 0)}{\left[ -1 - j\omega_h (A_1 + A_2) + \omega_h^2 (A_3 + A_4 + A_1 A_2) + \dot{\imath} j\omega_h^3 (A_1 A_4 + A_2 A_3) + \omega_h^4 (A_3 \right]} \quad (114)$$

$$I_{12,h} < \varphi_{12,h} = \frac{j\omega_h M (V_{rec,h} < \delta_h)}{-M^2 \omega_h^2 - \dot{Z}_{1,h} \dot{Z}_{2,h}}; \quad (115)$$

$$I_{22,h} < \varphi_{22,h} = \frac{j\omega_h C_2 (-1 - j\omega_h A_1 + A_3 \omega_h^2) (V_{rec,h} < \delta_h)}{\left[ 1 + j\omega_h (A_1 + A_2) - \omega_h^2 (A_3 + A_4 + A_1 A_2) - \dot{\imath} j\omega_h^3 (A_1 A_4 + A_2 A_3) + \omega_h^4 (A_3 \right]} \quad (116)$$

$$A_1 = C_1 R_1, A_2 = C_2 R_2, A_3 = C_1 L_1, A_4 = C_2 L_2, A_5 = C_1 C_2 M^2; \quad (117)$$

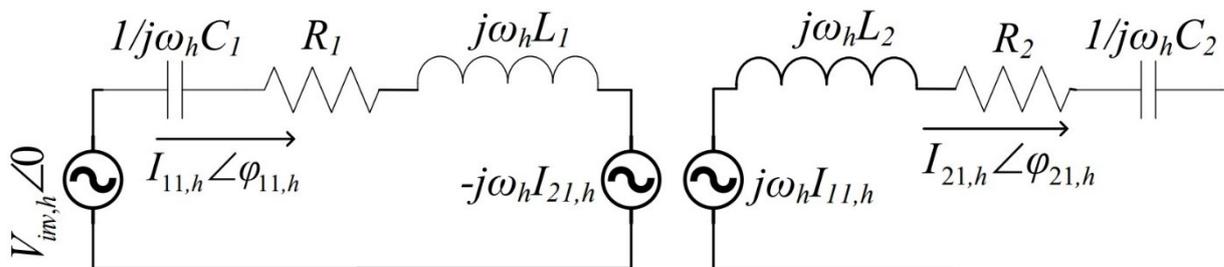


Рисунок 59. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии

без  $V_{rec,h} < \delta_h$

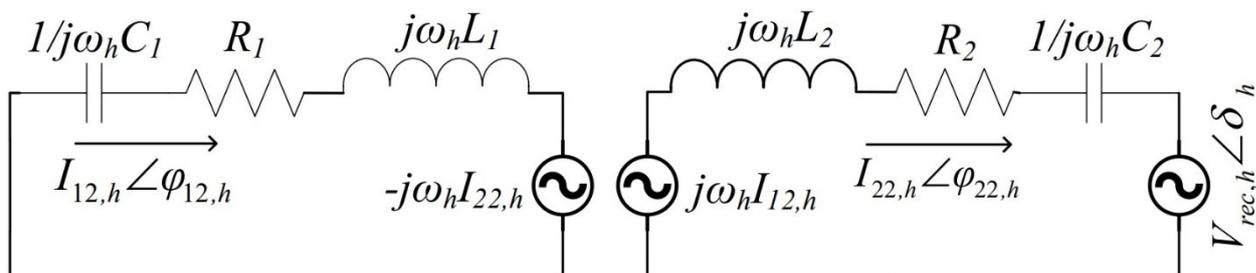


Рисунок 60. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии

без  $V_{inv,h} < 0$

Гармоники тока  $h$ -го порядка первичного и вторичного контуров описываются следующими соотношениями:

$$I_{1,h} \angle \varphi_{1,h} = I_{11,h} \angle \varphi_{11,h} + I_{12,h} \angle \varphi_{12,h}; \quad (118)$$

$$I_{2,h} \angle \varphi_{2,h} = I_{21,h} \angle \varphi_{21,h} + I_{22,h} \angle \varphi_{22,h}; \quad (119)$$

Суммарно гармоники токов  $h$ -го порядка, протекающих через первичную и вторичную обмотки, описываются следующим выражением:

$$i_j(t) = \sum_{h=1,3,5,..}^{\infty} I_{j,h} \sin(h\omega_s t + \varphi_{j,h}); \quad (120)$$

где  $j=1,2$  – первичный и вторичный токи, соответственно.

В формулах (127)-(129) угловая характеристика мощности  $\delta_1$  является неизвестным параметром, который можно вычислить, поскольку ток  $i_2(t)$  становится равным нулю только в интервалах перехода (см. выше о безразрывном режиме). В идеальных диодах переход происходит  $\omega_{com} = \pi - \delta_1$ . Поэтому угол  $\delta_1$  можно рассчитать следующим образом:

$$\sum_{h=1,3,5,..}^{\infty} I_{2,h} \sin(h\omega_s t_{com} + \varphi_{2,h}) = 0; \quad (121)$$

$$\delta_1 = \pi - \omega_s t_{com}, \omega_{com} = \omega_s t_{com}; \quad (122)$$

Значение угловой характеристики мощности  $\delta_1$  не может быть получено до тех пор, пока гармонический анализ не будет сделан в полном объёме. Это необходимо для того, чтобы выполнить условие перехода  $\varphi_{com} = \pi - \delta_1$  к безразрывному режиму. Использование в расчётах только первой гармоники приводит к значительным погрешностям в вычислении угла  $\delta_1$  и, как следствие, передаваемой активной мощности в зависимости от частоты. Поэтому предлагаемое моделирование системы во всём диапазоне гармонических составляющих имеет преимущество перед моделями, основанными на аппроксимации первой гармоники, заключающееся в более точном расчёте угловой характеристики мощности  $\delta_1$  и прогнозе передаваемой активной мощности.

На Рисунок 61, где  $\gamma_1$  – фазовый угол первой (основной) гармоники тока, представлены формы волны (сигнала) напряжения и тока в диодном мосту по схеме, изображённой на Рисунок 57, и с учётом элементов, сведённых в Таблица 23. Согласно результатам моделирования –  $f_s = 190 \text{ кГц}$ ,  $V_i = 24 \text{ В}$  и  $V_{dc-bus} = 28 \text{ В}$  – разность фаз между  $v_{rec,1}$  и  $i_{rec,1}$  составляет  $10^\circ$  (при условии, что  $v_{rec}$  и  $i_{rec}$  одновременно обнулялись во время переходов  $\varphi_{com} = \pi - \delta_1$ ) [100].

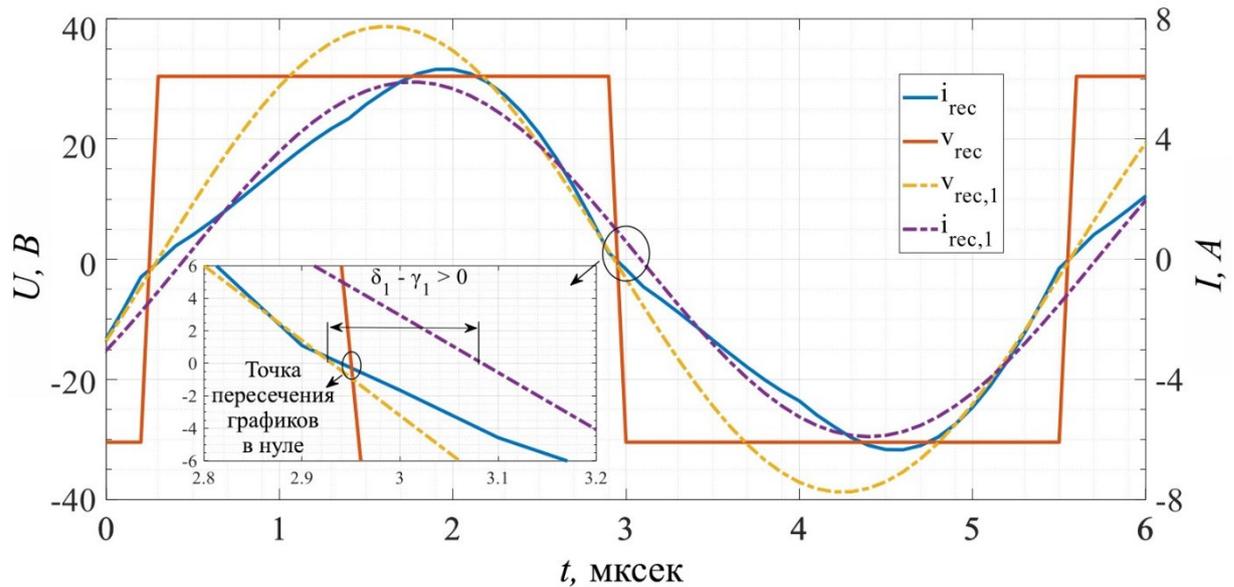


Рисунок 61. – Форма волны (сигнала) напряжения и тока в диодном мосту в первой гармонике и полном спектре гармонических составляющих

Активная мощность ( $P_{rec}$ ), поступающая в диодный мост, для  $j=2$  рассчитывается из формул (117) и (129) следующим образом:

$$P_{rec} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{V_{rec,h} I_{2,h}}{2} \cos(\delta_h - \varphi_{2,h}); \quad (123)$$

Наконец, активная мощность, подаваемая на шину постоянного тока, рассчитывается как разность  $P_{rec}$  и потерь на проводимость диодного моста (потери на переключение не учитываются, поскольку переходы происходят при нулевом токе):

$$P_{out} = P_{rec} - 2\Delta V_{on} I_{out}; \quad (124)$$

где  $\Delta V_{on}$  – падение напряжение каждого диода,

$I_{out}$  – выходной ток, поступающий на шину.

Представленная выше математическая модель описывает работу системы беспроводной передачи энергии в безразрывном режиме. Известно, что на значения выходной мощности и резонансной частоты влияет выбор значений индуктивности и ёмкости цепи. Хорошо, когда первичный и вторичный контуры настроены на одну и ту же частоту, но в реальных условиях работы системы беспроводной передачи энергии это не всегда

возможно из-за допусков катушек и конденсаторов этих контуров. Кроме того, на их [катушек и конденсаторов] технические характеристики влияют условия окружающей среды и эксплуатации. В этой работе характеристики выходной мощности системы беспроводной передачи энергии исследуются только для подачи энергии в шину низкого и высокого напряжений (см. Таблица 23). В обоих случаях для расчёта выходной мощности учитываются первые 21 гармоники напряжения и тока, так как влияние других гармонических составляющих ( $h > 21$ ) считается пренебрежимо малым.

Следует отметить, что резонансная частота  $f_r$  считается одинаковой как для первичного, так и для вторичного контуров и выражается соотношением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}; \quad (125)$$

Для определения добротности катушки индуктивности использовался математический аппарат, представленный в работе Г. Гуиди и Дж.А. Суул, в которой рассматривается источник питания постоянного напряжения:

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} = \sqrt{\frac{2\pi f_r L_1}{R_1} \cdot \frac{2\pi f_r L_2}{R_2}}; \quad (126)$$

При передаче энергии в шину низкого напряжения учитываются следующие технические характеристики:

- уровень напряжения ( $V_{dc-bus}$ ) составляет 28 В (соответствует типичному уровню напряжения полностью заряженных литий-железо-фосфатных батарей (аккумуляторов) с номинальным напряжением 24 В);
- уровень входного напряжения ( $V_i$ ) варьируется от 12 В до 36 В из-за относительно низкого уровня мощности распределённых генераторов (коммерческие фотоэлектрические модули);
- резонансная частота  $f_s$  варьируется от 160 кГц до 230 кГц (типичные значения резонансной частоты для рассматриваемых уровней мощности).

*Таблица 23*

**Параметры системы беспроводной передачи энергии  
(в шины низкого и высокого напряжений)**

Обозначение	Параметр	Шина низкого напряжения	Шина высокого напряжения
$L_1$	Индуктивность первичной обмотки	9,25 мкГн	187,73 мкГн
$L_2$	Индуктивность вторичной обмотки	8,84 мкГн	188,97 мкГн
$R_1$	Сопротивление первичной обмотки	252 мОм	0,47 Ом
$R_2$	Сопротивление вторичной обмотки	356 мОм	0,457 Ом
$C_1$	Ёмкость конденсатора первичного контура	85 нФ	15,495 нФ
$C_2$	Ёмкость конденсатора вторичного контура	89,5 нФ	15,515 нФ
$M$	Взаимная индукция	4,066 мкГн	84,3225 мкГн
$k$	Коэффициент связи	0,449	0,447
$f_r$	Резонансная частота	180 кГц	93 кГц
$C_i$	Ёмкость конденсатора на входе	233,5 мкФ	233,5 мкФ
$C_{out}$	Ёмкость конденсатора на выходе	1000 мкФ	1000 мкФ

При передаче энергии в шину высокого напряжения учитываются следующие технические характеристики:

- уровень напряжения ( $V_{dc-bus}$ ) составляет 270 В (соответствует уровню напряжения литий-железо-фосфатного аккумулятора для гибридной фотоэлектрической системы);
- уровень входного напряжения ( $V_i$ ) варьируется от 180 В до 230 В (совместим с преобразователями мощности в небольших ветроустановках и микро-ТЭЦ);
- резонансная частота  $f_s$  варьируется от 85 кГц до 110 кГц;
- номинальный уровень мощности составляет 1,2 кВт.

Для проверки результатов математического анализа, в дополнение к имитационному моделированию исследуемой системы в MATLAB/Simulink, была построена экспериментальная установка относительно малой мощности (для передачи энергии на шину низкого напряжения, номинальное напряжение 28 В), принципиальная схема и элементная база которой представлены на Рисунок 62 и в , соответственно.

Для реализации устройства были изготовлены две кольцевые катушки спиралевидной конфигурации, представляющие собой первичную и вторичную обмотки. Согласно статье С. Бандиопадхьяй (и др.) «Сравнение магнитных соединителей для зарядки электромобилей с использованием

многокритериальной оптимизации», 2019 г. спиральная конфигурация улучшает коэффициент связи между двумя катушками. Наружный диаметр обеих катушек составляет 90 мм, расстояние между ними – 12 мм, что приводит к коэффициенту связи, равному 0,449. Для установления требуемого входного напряжения используется источник питания постоянного тока. Управление первичной обмоткой катушки осуществляется посредством полной мостовой схемы (H-образный мост). Мостовой преобразователь работает с модуляцией прямоугольными импульсами. Ко вторичной обмотке подключен полный выпрямительный диодный мост (двухполупериодный выпрямитель), предназначенный для выпрямления индуцированного переменного напряжения. При этом на выходе выпрямителя для стабилизации напряжения используется конденсатор  $C_{out} = 1000 \text{ мкФ}$ . Экспериментальная установка работает без обратной связи, чтобы подтвердить описанный выше теоретический анализ.

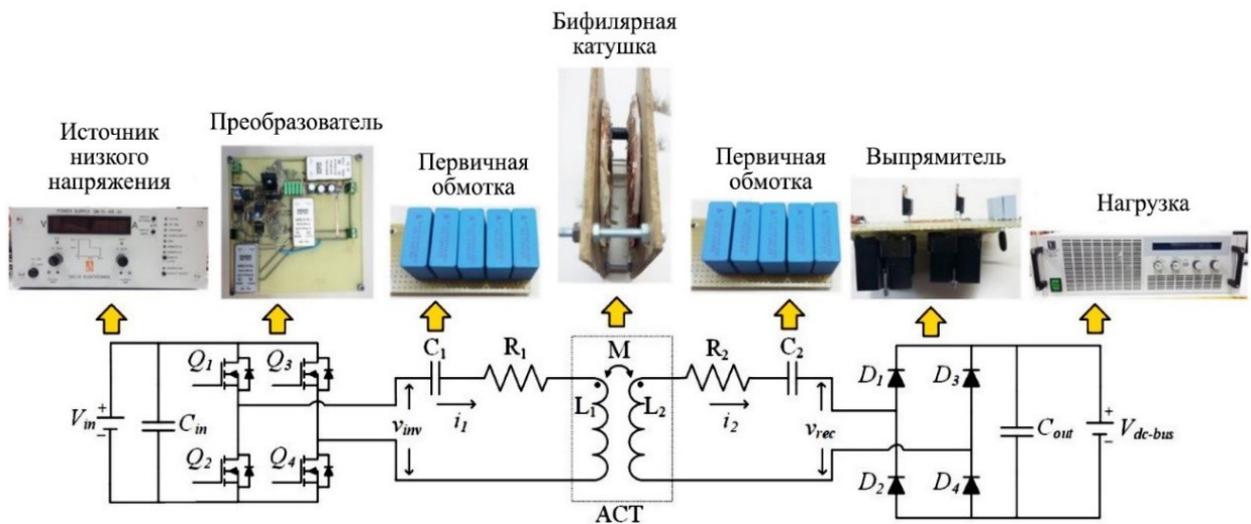


Рисунок 62. – Принципиальная схема экспериментальной установки

Таблица 24

## Элементы экспериментальной установки

Обозначение	Наименование	Устройство
$Q_1 - Q_4$	Преобразователь на транзисторах со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП-транзистор)	STW69N65M5
$D_1 - D_4$	Ультрабыстрые диоды	VS-HFA15TB60-N3
$V_i$	Источник низкого напряжения	DELTA ELEKTRONIKA SM 70-AR-24
$V_{dc-bus}$	Электронная нагрузка	EA-EL 9750-25 2400W 800R

Для сравнения на Рисунок 63 представлены результаты теоретических расчётов, моделирования и эксперимента, касающиеся зависимости выходной мощности  $P_{out}$  системы от резонансной частоты  $f_s$ . Экспериментальные и имитационные результаты соответствуют теоретическим расчётам, наблюдаемые отклонения обусловлены допущением при вычислениях наличия в цепи элементов, пропускающих ток только в одном направлении (идеальный диодный мост).

По кривым мощности (Рисунок 63) видно, что выходная мощность остаётся достаточно стабильной (по результатам эксперимента её отклонение составило менее 10%), что подтверждает способность системы функционировать в качестве постоянного источника питания.

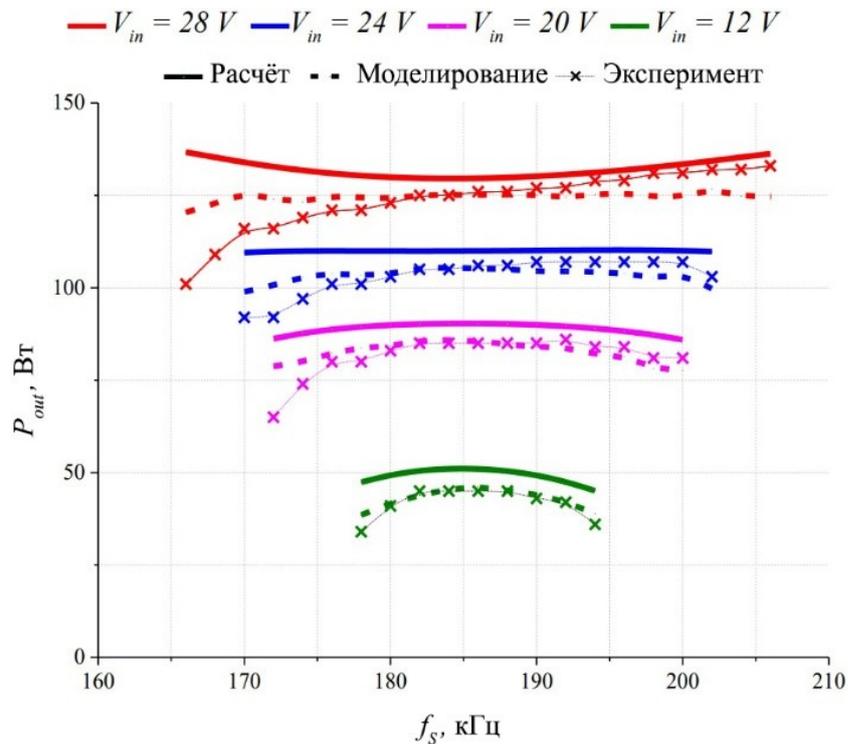


Рисунок 63. – Зависимость выходной мощности системы от резонансной частоты

Стоит отметить, что в диапазоне постоянной выходной мощности выбор резонансной частоты не является критичным, поскольку выходная мощность не зависит ни от рабочей частоты, ни от фактической резонансной частоты обоих контуров. Поэтому любое отклонение, возникшее в значениях параметров этих контуров (из-за допусков катушек и конденсаторов или влияния механизма старения и т.д.), не повлияет на передачу энергии нагрузке в силу непрерывной её выработки в широком диапазоне частот. Таким образом, применение, например, простой проверки выходного напряжения на преобразователе значительно облегчает определение точки максимальной мощности [101]. Кроме того, непрерывный режим выработка энергии является сравнительным преимуществом для распределённых генераторов, питающих микросети постоянного тока. При этом приведённые выше рассуждения могут быть использованы в инженерно-педагогической практике при формировании технического мышления будущих инженеров [102].

## Интервальные синтез и анализ систем автоматического управления (Судник Ю.А.)

Большинство реальных систем автоматического управления (САУ) имеют неопределённые параметры, внешние возмущения и начальные условия, которые имеют интервалы с заданными границами. Из-за невозможности достаточно точного описания, например, мобильных сельскохозяйственных агрегатов (МСА) как объектов управления (ОУ), интервальная неопределённость присуща любому их виду – непрерывным, дискретным, линейным, нелинейным, распределённым.

Для решения задач идентификации таких ОУ, анализа и синтеза их САУ широко используют методы имитационного моделирования. При этом в качестве моделей применяют в основном детерминированные или стохастические, использование которых (из-за введения различных допущений и имеющихся погрешностей измерений) не позволяет гарантировать точность результатов исследований. Так, известная система предпосылок, в основном статистического характера (детерминированность входных переменных параметров, равноточность и некоррелированность выходных, нормальный закон их распределения), на которых базируется классический регрессионный анализ, широко применяемый для идентификации ОУ, в реальных задачах нередко не соблюдается. К тому же, в известных методах их моделирования не всегда учитываются погрешности и ошибки измерений, величины которых в отдельных случаях могут быть соизмеримы с уровнями контролируемых полезных сигналов [103].

В последнее время в качестве вычислительных методов, гарантирующих точность результатов исследований, используют аппарат интервальной математики, в котором реальные числа  $a, b, \dots$  заменяют такими, как  $[a], [b], \dots$ .

Под интервалом  $[a]=[a^-,a^+]$ ,  $a^- \leq a^+$  следует понимать замкнутое ограниченное подмножество  $R$  всех вещественных чисел  $x$  вида  $[a]=[a^-,a^+]=\{x \in R \wedge a^- \leq x \leq a^+\}$ , то есть  $a$  может принимать любое значение внутри него, левая и правая границы которого обозначаются соответственно, как  $a^-$  и  $a^+$ . Существуют правила [104], [70] выполнения арифметические операций с интервалами, оперирования с их функциями, векторами и матрицами.

Разработан метод интервальной идентификации ОУ, позволяющий использовать нестатистический подход. Так, измеренное значение сигнала  $\tilde{y}(x)$  на его выходе имеет вид:  $\tilde{y}(x)=y(x)+e_y$ , где  $y(x)$ - истинное значение сигнала на выходе;  $x$  - значение сигнала на входе;  $e_y$  - помеха на выходе обусловленная ошибками измерений, случайными, систематическими, прогрессирующими погрешностями преобразователей, различными неопределенностями, шумами, неконтролируемыми возмущениями и др.

Примем также допущения относительно значения помехи  $e_y$ : измерение точных (истинных) значений выходного сигнала невозможно из-за помехи, искажающей его истинное значение; амплитуда помехи ограничена и может принимать любые значения в заданном интервале  $[-\Delta;+\Delta]$ , причем абсолютная погрешность  $\Delta$  известна, то есть  $e_y < |\Delta|$ ; закон распределения помехи не определяется, нередко он имеет неслучайный характер.

Объект управления, для которого свойственны изложенные предпосылки, называют с ограниченной по амплитуде ошибкой или с интервальной неопределенностью.

Алгоритм построения интервальных моделей ОУ предусматривает:

проведение эксперимента, принятие математической и её оценка, определение интервальных и точечных параметров, адекватности и характеристика точности, проверка значимости коэффициентов и прогноз выходных сигналов.

Классическая процедура моделирования заключается в определении значений выходного сигнала при подаче на вход различных воздействий. Рассмотрим вариант построения интервальных моделей базовых МСА как ОУ при наличии ошибок измерений только выходного сигнала (допущение – ошибки определения входных сигналов отсутствуют).

Проведение эксперимента: допустим ОУ содержит вектор  $\vec{x}_i$ . В результате с  $N$  опытами получены значения  $\vec{x}_i, [y_i]$ , где каждому будет соответствовать интервал  $[y_i]$ , т. е.  $x_i \Rightarrow [y_i]$ , где  $i=1, \dots, N$  - число опытов, наблюдений входного вектора  $\vec{x}_i$  и выходной переменной  $[y_i]$ .

При сформулированных выше предпосылках истинное значение сигнала  $y_i$  на выходе в каждом из опытов гарантированно принадлежит заданному интервалу  $[y_i]$ :  $y_i - \Delta \leq y_i \leq y_i + \Delta; e \Rightarrow \Delta$ .

Математическая модель ОУ:

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}) ; \quad (127)$$

где  $a_j$  - неизвестные параметры (коэффициенты);  $\phi_j(\vec{x})$  - известные базисные функции модели.

При этом в условиях интервальной неопределённости  $[y_i]$  существует бесчисленное множество параметров  $a_j$  модели, которые принадлежат некоторому множеству  $\Omega_a$  (Рисунок 64а):  $a_j \in \Omega_a$

Так как область  $\Omega_a$  имеет сложную форму, то обычно её заменяют

прямоугольной призмой  $[\vec{a}]$ , которая определяет отдельные интервалы коэффициентов  $a_j: [\vec{a}] = [a_1], [a_2], \dots, [a_n]$ .

На Рисунок 64а такая замена в виде прямоугольника показана пунктирными линиями.

Таким образом, в методе интервальной идентификации задача построения модели ОУ заключается в нахождении множества  $\Omega_a$ , которое не противоречит экспериментальным данным. При этом интервальная модель (136) не противоречит экспериментальным данным только тогда, когда она проходит через все N- интервалы (Рисунок 64б).

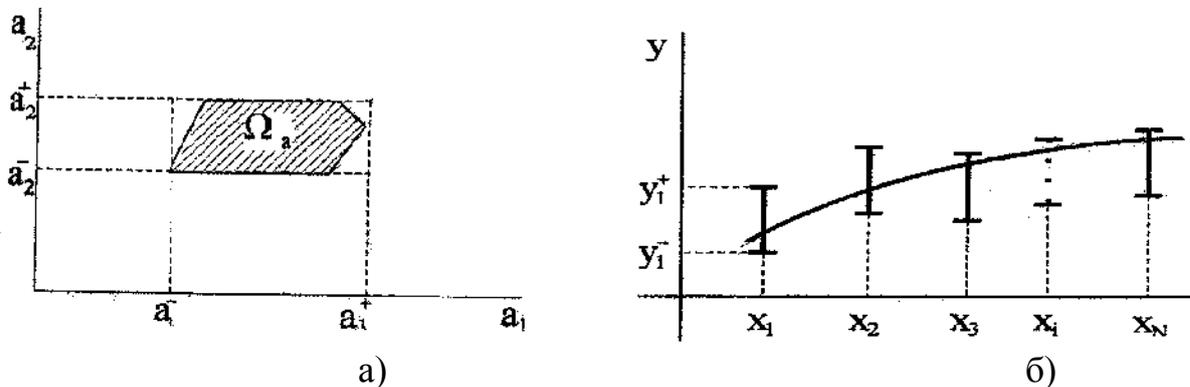


Рисунок 64. – Область множества значений параметров модели МСА как ОУ (для случая  $n=2$ ) и модель ОУ, адекватная интервальным измерениям

Таким образом, в методе интервальной идентификации задача построения модели ОУ заключается в нахождении множества  $\Omega_a$ , которое не противоречит экспериментальным данным.

При этом интервальная модель (136) не противоречит экспериментальным данным только тогда, когда она проходит через все N- интервалы (Рисунок 64б).

$$\sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(\vec{x}) \in [y_i^-, y_i^+]; \text{ или } y_i^- \leq \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(\vec{x}) \leq y_i^+, i = \overline{1, N}; \quad (128)$$

Для фиксированных значений  $\vec{x}_i$  (для каждого  $i$ -го опыта) соотношения (137) являются системой линейных неравенств (в пространстве

параметров  $a_j$ ), решив которые можно найти множество  $\Omega_a$  допустимых моделей исследуемого ОУ.

Область  $\Omega_a$  является выпуклой фигурой в виде многогранника (Рисунок 64а), а вектор неизвестных параметров  $\vec{a}_j$  принадлежит области  $\Omega_a$ , то есть  $\vec{a}_j \in \Omega_a$  если число опытов  $N \rightarrow \infty$ , то  $\lim \Omega_a \rightarrow a_o$  ( $a_o$ -точечная оценка параметра).

Интервальная оценка параметров (коэффициентов) модели определяется из условия:

$$a_j^- = \min a_j \text{ и } a_j^+ = \max a_j, \text{ причем } \vec{a} \in \Omega_a, a; a_j \in [a_j^-, a_j^+], j = \overline{1, n}$$

Точечная оценка  $a_j$  - любой вектор  $\vec{a}$ , в области  $\Omega_a$ . Так, средняя:

$$a_j = \frac{a_j^- + a_j^+}{2} \text{ при } j = \overline{1, n}.$$

Выбранная модель (137) не должна противоречить экспериментальным данным и требует включения всех необходимых базисных функций  $\varphi_j(\vec{x})$ . При этом, если множество  $\Omega_a \neq 0$ , то она считается адекватной объекту. Точность  $\delta$  модели ;

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+ + y_i^-};$$

При  $\delta \leq \varepsilon$  она считается работоспособной и удовлетворяющей допустимому значению ошибки  $\varepsilon$ .

Если интервал параметра  $[a_j] = [a_j^-, a_j^+] \neq 0$ , то коэффициент  $a_j$  является значимым и должен быть включенным в модель (137).

В противном случае  $a_j$  исключается из нее, так как он может иметь нулевое значение.

Точечный прогноз выходного сигнала ОУ описывается выражением:

$$\hat{y}_o(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}), \quad \text{где } a_j - \text{точечная оценка параметров ОУ.}$$

Интервальный прогноз выходного сигнала ОУ описывается выражением:  $[y(\vec{x})] = [y^-(\vec{x}), y^+(\vec{x})]$ ;

Определяется он по зависимостям:

$$y^-(\vec{x}) = \min_{j=1}^n \sum a_j \phi_j(\vec{x}) \quad \text{при } a_j \in \Omega_a;$$

$$y^+(\vec{x}) = \max_{j=1}^n \sum a_j \phi_j(\vec{x}) \quad \text{при } a_j \in \Omega_a;$$

Таким образом, представленный алгоритм построения моделей МСА как ОУ позволяет комплексно оценить их основные параметры и характеристики.

Представим модель МСА (как сложный динамический объект) в виде соединения статического и динамического звеньев, взаимосвязанных между собой. Статическое звено, согласно (136), описывается уравнением

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j(\vec{x}), \quad t = \overline{1, N}; \quad (129)$$

а динамическое – разностными линейными уравнениями:

$$y(t) = \sum_{j=1}^m b_j \cdot y(t-j) + \sum_{j=0}^m c_j x(t-j), \quad t = \overline{1, N}; \quad (130)$$

где  $b_j, c_j$  - неизвестные параметры.

Рассмотрим случай, когда

$$\tilde{y}(t) = y(t) + e_y;$$

$$\tilde{x}(t) = x(t) + e_x; \quad (131)$$

где  $e_x$  - помеха на входе ОУ.

Примем известными структуру модели, параметры системы  $a_j, b_j, c_j$  с точностью до интервалов, а также величины  $n, m$  и функции  $\varphi_j$ . Выражения (138), (139), (140) являются достаточно универсальными и позволяют моделировать широкий класс МСА как сложных динамических ОУ.

Для данного случая задача моделирования заключается в расчете интервального прогноза значения сигнала на его выходе:

$$[y(t)] = [y^-(t), y^+(t)], \quad t = \overline{1, N} \quad \text{при заданных на входе } [\vec{x}(t)] = [x^-(t), x^+(t)] \quad \text{и}$$

интервалах параметров  $[a_j], [b_j], [c_j]$ . При этом должны выполняться

$$\text{условия: } \hat{y}(t) \in [y(t)], \delta[y(t)] \Rightarrow \min, t = \overline{1, N};$$

где  $\delta[y(t)]$  - ширина интервала прогноза значений выходного сигнала.

Интервальный прогноз значений выходных сигналов для моделей статики (138) и динамики (139) соответственно:

$$[y] = \sum_{j=1}^n [a_j] \cdot \phi_j \{ [\vec{x}] \}; \quad (132)$$

$$[y(t)] = \sum_{j=1}^m [b_j] [y(t-j)] + \sum_{j=0}^m [c_j] [x(t-j)]. \quad (133)$$

Если  $\delta[y(t)] \leq \varepsilon$ , условие требуемой точности модели выполняется, если же больше, то необходимо снизить уровень неопределенности за счёт усложнения структуры модели или увеличения числа опытов и интервалов входных сигналов. Аналогичный алгоритм оценки точности моделирования

целесообразно использовать и для моделей динамики.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет моделировать МСА, как сложные динамические ОУ и контролировать точность их построения, что предопределяет создание эффективных по качеству и устойчивости САУ.

На мобильный агрегат действует многообразие различных контролируемых и неконтролируемых возмущений, функцию минимизации суммарного эффекта которых должна качественно выполнять САУ. Для интервального анализа проведена оптимизация качества управления (технологическими и энергетическими режимами работы) МСА согласно критерию минимизации значений дисперсии  $[D_y]$  или среднеквадратического отклонения  $[\sigma_y]$  управляемой величины:

$$[D_y] = [\sigma_y]^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [|\Phi_{YF}(j\omega)|]^2 S_{ff}(\omega) d\omega \Rightarrow \min,$$

$$\forall |\Phi_{yf}(j\omega)| \in [|\Phi_{yf}^-(j\omega)|, |\Phi_{yf}^+(j\omega)|]. \quad (134)$$

где  $[|\Phi_{YF}(j\omega)|]$  - интервал модуля комплексной частотной характеристики системы,  $S_{ff}(\omega)$  - спектральная плотность эквивалентного, приведенного непосредственно к выходу объекта, возмущения  $F(t)$ .

Особенностью  $F(t)$  является то, что оно доступно для непосредственного измерения и позволяет его корреляционную функцию и спектральную плотность оценивать экспериментально. Для реализации этого возмущения необходимо прекратить управление объектом как ручное, так и автоматическое.

Для нахождения точных границ интервала (143) необходимо вычислить наибольшее и наименьшее значения  $D_y$  при изменении  $|\Phi_{YF}(j\omega)|$  в известных пределах. По аналогии с точечными оценками в теории автоматического управления пределы в виде интервала ее частотной

характеристики можно записать:

$$[\Phi_{\text{YF}}(j\omega)] = \frac{1}{\{1 + [W_{\text{oy}}(j\omega)][W_{\text{yy}}(j\omega)]\}}; \quad (135)$$

где  $[W_{\text{oy}}(j\omega)], [W_{\text{yy}}(j\omega)]$  - интервалы частотных характеристик объекта и узла управления.

Непосредственное же использование точечной оценки частотных характеристик для (143) и (144) в рассматриваемом случае будет недостаточно эффективным, так как такие оценки на практике являются, как правило, неточными и носят неопределённый характер. В связи с этим для МСА как ОУ необходимо использование интервальных моделей амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-фазовых (АФХ) характеристик с интервалом множества.

Примеры построения по результатам эксперимента интервальных АЧХ и АФХ МСА приведены на Рисунок 65а и Рисунок 65б. При этом,  $A^+(w), A^-(w), \overset{i}{A}(w), A_{\text{Э}}(w)$  - соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АЧХ и экспериментальная (Рисунок 65а), полученная на моделирующем стенде, а  $A^+(w), A^-(w), \overset{i}{A}(w), A_{\text{Э}}(w)$  - соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АФХ и экспериментальная (Рисунок 65б), полученная на моделирующем стенде.

Различные расчёты и графические построения интервального анализа были осуществлены с использованием математического пакета «Matlab», позволяющего проводить анализ и синтез систем автоматического управления.

Согласно исследованиям Ротача В. Я., установлено, что существенный эффект автоматизированного управления достигается тогда, когда спектр  $S_{\text{ff}}(w)$  эквивалентного возмущения находится в низкочастотном диапазоне

( $0 < \omega < \omega_1$ ), где характеристика  $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 \ll 1$ .

Однако, как показал анализ наших экспериментов, диапазон возмущающих воздействий различных МСА включает не только низкочастотный спектр ( $\omega \in [0, \omega_1]$ ) фильтрации возмущающих воздействий, где  $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 < 1$ , но и существенную часть резонансных частот ( $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$ ), где  $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 > 1$ , что не позволяет использовать известный подход минимизации дисперсии выходной величины.

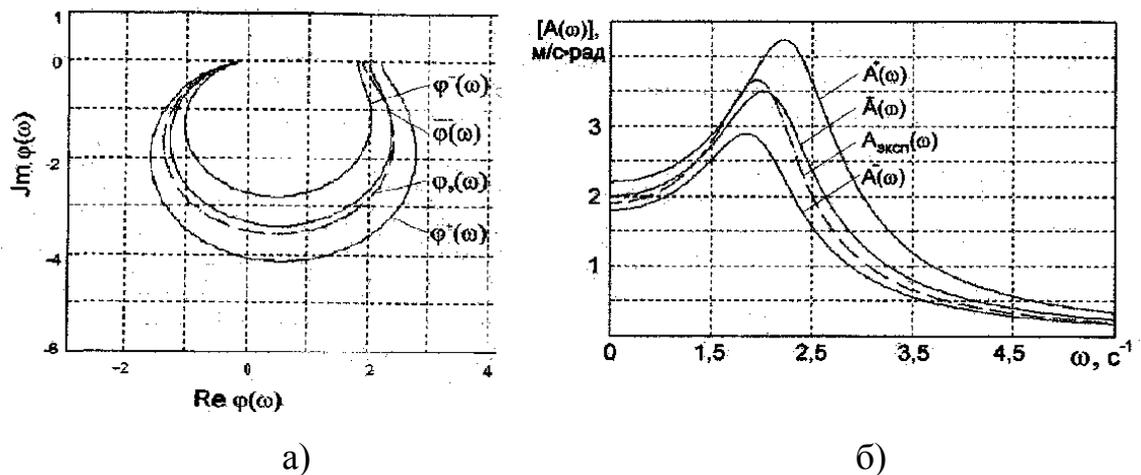


Рисунок 65. – Интервальные амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ОУ

С помощью интервального анализа установлено, что для частотного диапазона возмущений реальных МСА справедливо правило уменьшения

интервала отношения  $\left[ \frac{T_u}{k_{yу}} \right]$  с целью минимизации значений дисперсии  $[D_y]$ .

Для определения конкретных значений параметров настройки узла управления существуют различные методы, наиболее эффективным из которых является частотный подход с критерию минимизации  $[a_o]^{-1}$ , используемому для оптимизации параметров технических средств управления. Намного упрощается оценка оптимальных параметров настройки с применением известного (для точечной оценки параметров) метода вспомогательной функции  $f$  (согласно исследованиям Шаврова А.В.

и Солдатов В.В.), на основе которого определены выражения для интервальной  $[f]$  и параметров настройки узла управления. Рассмотренные интервальные оценки АЧХ и АФХ позволяют проводить анализ устойчивости, качества и синтез СУ с учётом неточностей описания ОУ.

Используя такие оценки, можно применять частотные критерии, например Найквиста, для анализа устойчивости и качества стохастических САУ режимами работы МСА.

Расположением интервальной АФХ разомкнутой системы  $W(j\omega)$  и точки с координатой  $(-1; j0)$  определяют условия критерия устойчивости Найквиста для стохастических систем: замкнутая система устойчива, если все точки интервальной оценки не охватывают точку с координатами  $(-1, j0)$ , и неустойчива, когда все точки (часть точек) интервальной оценки охватывают точку с координатами  $(-1, j0)$ .

Использование интервальной оценки для анализа устойчивости систем может предъявить более жёсткие требования к точности и структуре моделей объекта и узла управления, но при этом гарантировать результат применения частотного критерия. Предлагаемый метод интервального анализа распространяется и на многомерные системы [55].

Интервальные модели позволяют оценивать возможные значения показателей качества (время регулирования, статическая ошибка и др.) переходных и установившихся процессов в САУ, а также определять влияние ошибок идентификации ОУ на точность этих показателей, для оценки которых определяют реакцию интервальной модели на входное, например, скачкообразное, гармоническое, ступенчатое псевдослучайное воздействия. При этом строятся верхняя и нижняя границы интервала прогноза на выходную величину ОУ, по которым определяют интервальные оценки показателей качества функционирования САУ МСА [46], [105].

Использование детерминированных и стохастических моделей ОУ не позволяет гарантировать точность результатов исследования. Метод

интервальной идентификации ОУ, позволяет использовать нестатистический подход. Интервальные оценки АЧХ и АФХ ОУ позволяют гарантировать результат исследования и проводить анализ устойчивости, качества и синтез автоматической системы с учётом неточностей описания ОУ.

**Эксплуатация солнечных сетевых фотоэлектрических установок  
потребителей системы централизованного электроснабжения  
(Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И.)**

Большинство электропотребителей нашей страны получают высококачественную электроэнергию (ЭЭ), произведенную согласно ГОСТ 32144 – 2013, от высоконадежной системы централизованного электроснабжения (СЦЭС). Однако, такое производство ЭЭ, связано с низко энергоэффективным использованием – сжиганием углеродных топлив: нефти, природного газа угля [23] и экологическим вредным воздействием на атмосферу планеты [106]. Кроме того, потребление энергии в современном мире постоянно растет, постоянно растут и цены на энергоносители. Поэтому многие компании в мире: Тесла, Солар, Хевел и др. стараются как можно скорее стать на путь альтернативной энергетики и повысить энергоэффективность производства ЭЭ и понизить её себестоимость, и соответственно улучшить экологию производства электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одним из перспективных направлений альтернативной энергетики является солнечная энергетика. В России развитием и продвижением солнечных технологий занимается компания Хевел. Установленная мощность проектов, реализованных компанией в России, Казахстане и Монголии, составляет 1300 МВт. Данные установки работают как на отдельные объекты (монастырь на острове Валаам, автозаправочные станции) так и на СЦЭС (Волгоградская СЭС, Ахтубинская СЭС).

В соответствии, с Концепцией развития и использования

нетрадиционной энергетики, в нашей стране предлагается провести модернизация СЦЭС путем внедрения распределенной генерации [107] с использованием ВИЭ и [интеллектуальных сетей Smart grid](#) [108], [109].

Одним из первых проектов внедрения ВИЭ в СЦЭС является сетевая солнечная фотоэлектрическая установка (СФУ), эксплуатируемая на базе компании GOOD-WOOD с 2013 года [110], основное производство которой находится в Московской области. Компания специализируется на производстве экологически чистых клееных домов из бруса, с евроотделкой помещений и установкой в них современного оборудования и мебели. Предприятие не только полностью обеспечено тепловой энергией, производимой из отходов производства (опилки, опилы) и используемой на собственные нужды производства, отопление и горячее водоснабжение, но и производит топливные брикеты на продажу.

Электроснабжение предприятия осуществляется от двух ТП 10/0,4кВ, мощностью каждой по 320 кВА. Предусмотрена возможность взаимного резервирования при выходе одного из трансформаторов из строя или аварии в сети. В нормальном режиме каждая ТП питает свой участок сети предприятия. Также, возможно резервирование предприятия от дизель-генераторных

Руководство предприятия существенное внимание уделяет экологии и охране окружающей среды и поэтому компанией GOOD-WOOD было принято решение об использовании энергии Солнца, и тем самым улучшении экологической ситуации в регионе. В 2013 году компания закупила и установила на предприятии СФУ, предназначенную для обеспечения электроэнергией цеха по производству клееного бруса. Основу электростанции составляют 850 солнечных панелей марки Virtus Model ПС255М-24/Vbs, расположенные на 10000 м<sup>2</sup> крыши (Рисунок 66) и южной стене цеха по производству бруса. Каждая панель способна выработать до 255 Вт энергии.



*Рисунок 66. – Солнечные модули на крыше завода GOOD-WOOD*

Общая установленная мощность составляет более 200 кВт, т.е. электростанция является самой крупной СФУ солнечной электростанцией (СЭС) в Центральном Федеральном округе и самой крупной частной СЭС в стране, работающей параллельно с СЦЭС.

Электроэнергия, вырабатываемая солнечными 850 панелями, передается на 12 инверторов, которые преобразуют постоянный ток солнечных батарей в переменный. Управление инверторами, работающими параллельно с централизованной сетью, осуществляется встроенными в каждый инвертор контролерами. При возникновении сбоя в работе одного из инверторов, контролер автоматически отключает его от шины нагрузки, что позволяет изолировать поврежденный инвертор, без отключения нагрузки от остальных модулей.

Информационная связь между инверторами осуществляется по стандарту RS-232. Вся информация о работе системы передается на персональный компьютер. В соответствии с алгоритмом работы инверторов, подача выработанной электроэнергии осуществляется только во внутреннюю

электрическую сеть предприятия, если она необходима для производства.

В соответствии с алгоритмом работы, вся выработанная ЭЭ СФУ цеха по производству клееного бруса компании GOOD-WOOD используется на производство клееного бруса. При недостатке энергии, недостающая ЭЭ потребляется из СЦЭС, а при её избытке часть инверторов СФУ отключается, переводя подключенные к ним солнечные панели на холостой ход.

Проведенный анализ графиков нагрузки, за годы эксплуатации показывает, что СЭС компании GOOD-WOOD в летние солнечные дни обеспечивала до 50% нагрузки цеха по производству клееного бруса, в осенние и весенние дни до 10%. В зимние дни, при выпадении снега, солнечные панели, установленные на крыше, отключались от сети и производство энергии снижалось до одного процента.

В соответствии, с проведенными расчетами по выбору мощности СЭС, установлено что затраченные средства на сооружение СЭС компании GOOD-WOOD практически полностью окуплены. Срок окупаемости сетевой СЭС компании GOOD-WOOD составляет 10,4 года, и на настоящее время СФУ не утратила свою работоспособность. Это позволяет сделать вывод о возможности использования таких сетевых СФУ для электроснабжения жилых, социальных и производственных объектов и улучшения экологии не только в Московской области, но и в других регионах страны.

Наряду с вышеуказанными проектами: СЭС компании Хевел, сетевой СФУ компании GOOD-WOOD в нашей стране эксплуатируются много частных и производственных СФУ малой мощности. Как, правило, это автономные СФУ, но есть гибридные и сетевые установки. В автономных СФУ надежность электроснабжения достигается с помощью аккумулялирования ЭЭ; в гибридных – с использованием источника ЭЭ другого вида, например, дизельной или бензиновой электростанции, дополнительно может быть использовано аккумулялирование ЭЭ; в сетевых – с использованием СЦЭС, которая используется как аккумулялирование ЭЭ: при

недостатке энергии на объекте электроснабжения (ОЭС), недостающая ЭЭ потребляется из СЦЭС; при её избытке она передается в СЦЭС и используется другими ОЭС СЦЭС.

Кроме того, СФУ могут работать как самостоятельно, так и быть объединены под эгидой производителя инверторов или солнечных панелей.

Компания Sofar Solar (основана в 2012 году), специализируется на исследованиях, разработках и выпуске инверторов для СФУ. Фиксаций и обработкой данных, поступающих от инверторов, занимается компания Solarman, с которой у SofarSolar заключены партнерские соглашения. Компания Solarman объединила на своём сайте СФУ малой мощности от 1 до 25 кВт. В настоящее время с сайтом поддерживает связь 253 СФУ, расположенных на территории Российской Федерации: 61,3% из них работают автономно; 17,8% являются гибридными, а 20,9% – сетевыми СФУ. Следует отметить, что с 2020 намечилось увеличение количества подключаемых сетевых СФУ.

С инверторов СФУ с помощью Wi-Fi на сайт solarmanpv.com передаются данные: о выработанной энергии, ее качестве, ошибках в работе СФУ, а также о рабочих параметрах солнечных панелей. На сайт формируется ежедневный отчет о работе СФУ, а также приводятся графики выработки ЭЭ СФУ: суточные, месячные, годовые.

В качестве примера, в Таблица 25 представлены сводные данные с сайта solarmanpv.com, о генерации энергии СФУ малой мощности, расположенные на территории РФ. Данные о генерации СФУ представлены за 6 месяцев: с апреля по сентябрь 2021 года.

Величина выработанной ЭЭ СФУ определяется: установленной мощностью СФУ; солнечной инсоляцией в месте установки СФУ; углом наклона солнечных панелей СФУ относительно поверхности земли; коэффициентами полезного действия (КПД) оборудования СФУ и условиями в месте установки СФУ, например, затенения.

### СФУ, действующие на территории Российской Федерации

Вид СФУ	Установленная мощность, кВт	Генерация за 6 месяцев, кВт*ч	Территория расположения	Вид нагрузки
гибридная	1,1	1134,0	Московская область	Бытовая
сетевая	1,1	1528,0	р.п. Романовка, Саратовская область	Бытовая
автономная	1,136	1289,0	Иркутская область, д. Непа, (Алроса)	Производственная
автономная	1,0	727,0	Тверь, (Тверьэнерго)	Производственная
сетевая	1,0	1950,6	Ростовская область, Сальск	Бытовая

В данной работе основное внимание уделено проектированию, внедрению и эксплуатации сетевой СФУ ОЭС – частный сельский дом в рабочем поселке (р.п.) Романовка, Саратовской области, подключенного к СЦЭС села. Площадь дома составляет  $120 \text{ м}^2$ , а максимально потребляемая мощность  $P_{\text{макс}} = 2,2$  кВт.

С учетом поправок, внесенных в Федеральный закон № 471-ФЗ от 27.12.2019 г. в части развития микрогенерации, для более эффективного использования частной солнечной электростанции экономически выгодно проектирование СФУ ОЭС, подключенного к СЦЭС, без аккумулирования энергии, с возможностью выдачи избытков сгенерированной электроэнергии в СЦЭС, с целью снижения энергетических потерь во время заряда/разряда аккумуляторов и экономии средств на закупку оборудования по аккумулированию энергии, его обслуживание, ремонт и замену. Алгоритм работы СФУ мощностью  $P_{\text{СФУ}}$  с СЦЭС, определяется потребляемой мощностью ОЭС, при:

- $P_{\text{ОЭС}} \geq P_{\text{СФУ}}$  – недостающая ЭЭ потребляется ОЭС из сети;
- $P_{\text{ОЭС}} < P_{\text{СФУ}}$  – избыток ЭЭ отдается в сеть, при этом необходимо

установить двунаправленный счетчик ЭЭ и заключить договор с территориально сетевой организацией о купле-продаже ЭЭ.

С учетом вышеизложенного и юридически не решенных вопросов о присоединении СФУ малой мощности к СЦЭС, принято решение о строительстве СФУ частного дома в р.п. Романовка, Саратовской области с выходной пиковой мощностью 1,1 кВт.

В результате проведенных расчетов по выбору СФУ и моделирования и режимов работы СФУ [111], [112] выбраны 4 современные солнечные монокристаллические панели марки TW Solar TW310MWP-60-H мощностью 310 Вт каждая. Одна панель содержит в себе 60 солнечных элементов. Данная марка панелей выбрана за счет технологии PERC (Passivated Emitter Real Cell), которая используется в их конструкции. Основным отличием панелей с данной технологией от обычных кремниевых, является наличие диэлектрического слоя (пассивации), который располагается по всей поверхности панели между кремниевой основой и тыльным контактом. Дополнительный слой представляет из себя отражатель солнечного излучения, что приводит к повышению КПД панелей до 20%.

Монтаж солнечных панелей проводился на крыше дворовой постройки. Место монтажа выбиралось исходя из направления солнечных панелей на юг, отсутствия факторов, влияющих на затенение панелей и удобства проведения работ по установке и подключению панелей. В качестве основы для строительства несущего каркаса панелей был выбран деревянный брус. Для каждой СП был собран собственный твердый неподвижный каркас, обеспечивающий угол наклона панели в  $30^{\circ}$ . Панели закреплены на каркасах жестко, с обеспечением их естественной вентиляции (Рисунок 67а).

Панели соединены последовательно между собой для выработки достаточной для запуска и работы инвертора энергии. Соединение панелей выполнено с помощью стандартных коннекторов MC4. Данные коннекторы обеспечивают герметичность соединения панелей, а также его надежность, скорость и простоту выполнения.

Для преобразования постоянного тока в переменный выбран инвертор марки Sofar 1100TL-G3 производства компании Sofar Solar (Рисунок 67б).



а)

б)

*Рисунок 67. – Установленные солнечные панели и инвертор Sofar СФУ*

Инверторы серии TL уникальны, так как могут самостоятельно снижать мощность по команде делимитера (устройства, отслеживающего передачу электроэнергии в сеть). Датчики делимитера устанавливаются перед счетчиком. Делимитер дает команду инвертору снизить вырабатываемую мощность, если фиксируется превышение разрешенного значения электроэнергии, выдаваемой в сеть. Данный инвертор содержит один встроенный контроллер точки максимальной мощности (MPPT). Инвертор включен непосредственно в электрическую сеть дома через два автомата переменного тока АВВ по 16 ампер после счетчика электрической энергии. Инвертор монтируется жестко на стене. Обязательным условием его эксплуатации является отсутствие прямых солнечных лучей и влияния дождя и снега. Инвертор должен быть установлен вертикально с возможным углом положительного наклона не более  $15^{\circ}$ . Так как инвертор не снабжен системой активного охлаждения, то для его нормального функционирования необходимо свободное пространство не менее 50 см с торцевых и нижней стороны и не менее 80 см с верхней стороны.

Средняя продолжительность работы СФУ частного дома в р.п. Романовка, Саратовской области в летние месяцы составляет 14-15 часов в

сутки. Среднедневная выработка электроэнергии составляет 5,5 кВт\*ч в сутки за месяц эксплуатации, максимальное значение – 6,8 кВт\*ч. в сутки. Результаты выработки ЭЭ за август 2020 года представлены на Рисунок 68.

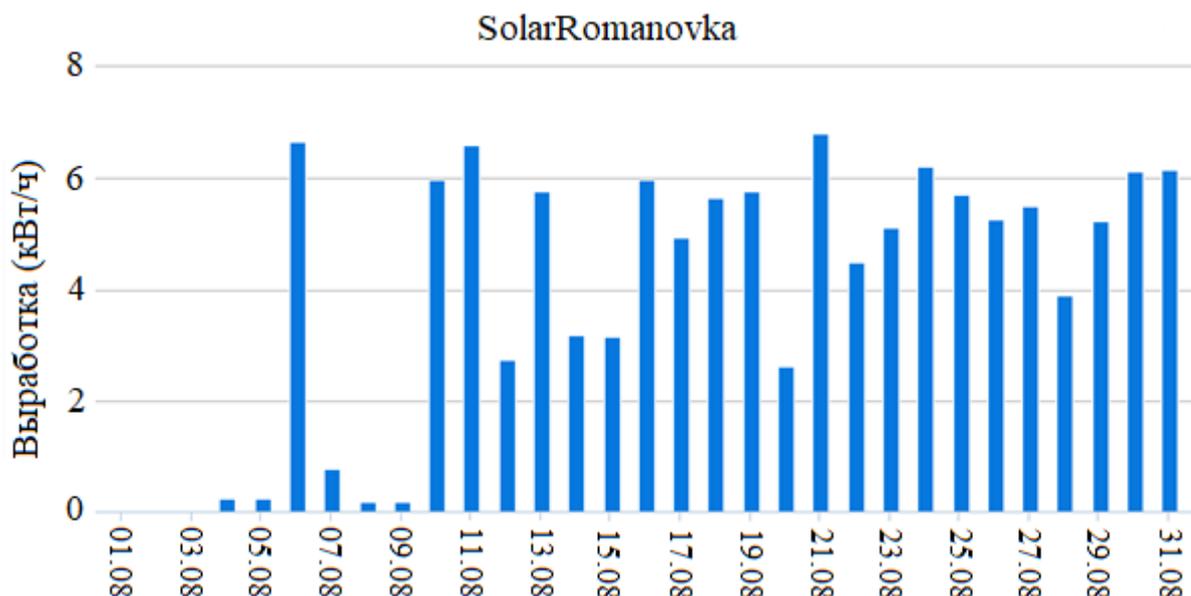


Рисунок 68. – Выработанная станцией электроэнергия в августе 2020 по дням

Результаты эксплуатации СФУ в течении одного дня представлены на графике (Рисунок 69). Как можно увидеть из графика при равномерной освещенности в течении дня установка достигает своей пиковой мощности во временном промежутке с 13.00 до 15.00.

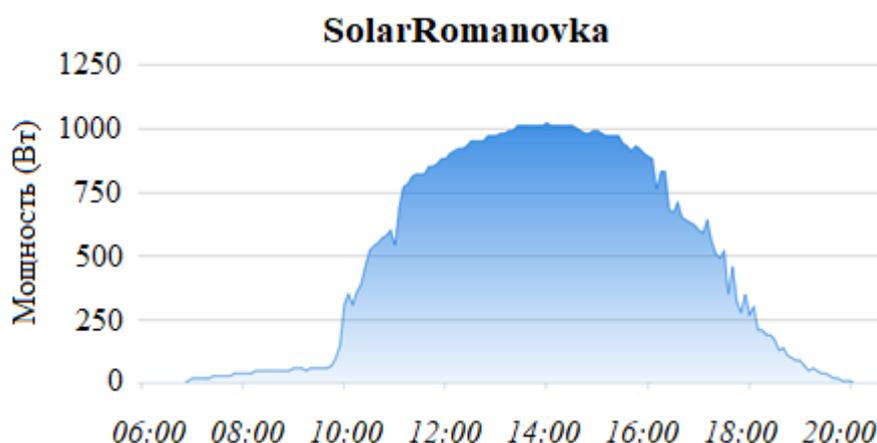


Рисунок 69. – Эксплуатация СФУ в течении одного дня (21 августа 2020 г.)

Проведенный анализ графиков нагрузки, показывает, что за годы

эксплуатации, СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка, Саратовской области в летние солнечные дни СФУ способна обеспечивать до 100% нагрузки дома и даже превышать необходимую дому электроэнергию, в осенние и весенние дни до 80%. В зимние дни, при выпадении снега, солнечные панели, установленные на крыше, отключаются.

Кроме того, алгоритм работы сайта [solarmanrv.com](http://solarmanrv.com) позволяет на основе количества выработанной СФУ энергии рассчитать влияние конкретной установки на мировую экологию. По данным сайта строительство СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка позволило за время эксплуатации:

- снизить выбросы CO<sub>2</sub> в окружающую среду на 3,79 тонны;
- сохранить от вырубки 207 деревьев;
- снизить потребление твердого топлива на 1,52 тонны.

Поведенные расчеты по методике расчета и выбора СЭС показали, что срока окупаемости СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка, Саратовской области составит 17,8 года.

В большой степени на величину срока окупаемости СФУ, влияет не только величина солнечной инсоляции в месте установки СФУ, но и в большой степени тариф по оплате за ЭЭ. Так, если бы в месте установки действовал бы тариф Московской области, то срок окупаемости составил бы 11,5 года.

В связи с принятием Федеральным законом № 471-ФЗ от 27 декабря 2019 г. в части развития микрогенерации, с 2020 количество подключаемых сетевых СФУ в стране постоянно увеличивается, по сравнению с автономными и гибридными СФУ.

На величину срока окупаемости СФУ, влияет не только стоимость оборудования СФУ и величина солнечная инсоляцией в месте установки СФУ, но и величина тарифа по оплате за электроэнергию.

## **Влияние работы электроактиватора воды на содержание животных в критических условиях (Кравченко В.Н.)**

Внедрение электроактивированной воды в животноводстве позволит [113] существенно снизить затраты на водоподготовку ферм и комплексов, заболеваемость животных и птиц исключить использование антибиотиков при приготовлении кормов и поении животных, увеличить привес, повысить качество продукции животноводства, снизить затраты на обеззараживание и дезинфекцию животных, оборудование, помещений, близлежащих территорий. Способствовать созданию оптимального микроклимата и стимулировать метаболические процессы животных. Внедрение системы опрыскивания близлежащих территорий, прилегающих к фермерскому хозяйству, будет способствовать резкому снижению бактериальной обсемененности и вирусных атак, что будет способствовать экологической безопасности фермерских хозяйств и комплексов.

Процесс управления всем комплексом работ поддается цифровизации по принципу больших массивов данных и может быть реализован с применением информационных технологий.

Целью работы является применение электроактиватора в области новых технологий по кормлению, поению и дезинфекции животных и птиц, а также дезинфекции оборудования и помещений ферм и агрокомплексов АПК с целью повышения их рентабельности:

- Снижение заболеваемости животных и птицы, падежа;
- Увеличение надоев, яйценоскости, привеса животных и птицы;
- Исключение из профилактических мероприятий антибиотиков для КРС, птиц и т.д.;
- Повышение качества животноводческой продукции.

Внедрение технологии бактериологической и вирусной очистки

оборудования ферм и комплексов с использованием активированной воды.

Технология обработки воды в диафрагменных реакторах состоит в одновременном синтезе определенных объемов католита и анолита [114] – соответственно католит и анолит обработанной воды или раствора (Рисунок 70).

В нашем случае используя незначительные объемы активированной воды для проведения эксперимента применили бытовой активатор «Ива 2»

Применяя активаторы фирмы «Ива-2» (Рисунок 70) и другие ионизаторы воды можно насытить её молекулярным водородом используя стандартную заводскую методику и повысить её отрицательное значение ОВП до - 900 mV с учетом изменения водородного показателя (pH).



Рисунок 70. – Общий вид прибора

Предварительно перед активацией у контрольного образца водного раствора определяют два основных показателя: окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) прибором MARTINI instruments (PH 58) и водородный показатель (pH). Далее, водой заполняют две ёмкости активатора - выемной (3) и нижний сосуд (1) до верхних меток (6). Колпак (9) одевается на нижний сосуд (1) так, чтобы темный электрод попал в выемной сосуд (3). После включения переключателя (20) на колпаке загорается индикатор (14) а на таймере (16) высвечиваются буквы pH и кстанавливается в минутах и задается индикатором режима продолжительности работы (16).

Значения рН могут изменяться в пределах от 0 до 14 единиц (для щелочной воды - от 8 до 11 единиц, для кислотной воды от 6 до 2,4 единицы). По окончании устанавливаемого времени прибор отключается автоматически с звуковым сигналом [115], [116].

При серебрении воды на активаторе Ива-2 (Рисунок 70) необходимо на колпаке (9) вернуть серебряный электрод (17) и вынуть выемной сосуд (3). Заполнив водой ёмкость активатора до указанной метки надеть колпак (9) на нижний сосуд (1) и включить переключатель (20). После загорания индикатора (14) в таймере (16) высвечивается буква S. Продолжительность работы прибора устанавливаем кнопкой индикатора времени (16) и запускаем работу прибора кнопкой START. По истечении назначенного времени прибор выключается автоматически.

Методикой проведения исследований предусматривалось получение следующих показателей на исходных и активированных водных растворах:

- Водородный показатель (рН);
- Соляной баланс жидкостей;
- Проводимость жидкостей;
- Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) жидкостей;
- Кластерность (проникающая способность жидкостей).

В качестве образцов были задействованы следующие источники воды:

1. Водопроводная вода из скважины (80 м) п. Лунево, Московская область;
2. Вода из пруда Тимирязевской академии;
3. Централизованное водоснабжение г. Москва;
4. Бутилированная вода «Минерале» из магазина;
5. Очищенная водопроводная вода «Источник БИО»; \*
6. Водопроводная вода из п. Заречье, Одинцовского р-на, М.О;
7. Бутилированная вода (Шишкин лес).

Изменение ОВП растворов во времени по отношению к исходному состоянию распределилось следующим образом:

- По анолиту. По всем растворам наблюдается снижение показателя ОВП (до 30%) с дальнейшей стабилизацией снижения до оптимального состояния ( $ОВП_{\text{опт}} = +150...+250 \text{ mV}$ ) в течении 12...14 суток. Все значения ОВП растворов положительные и находились в пределах от +150 до +1150 mV.

- По католиту. По всем растворам наблюдалось снижение отрицательного показателя ОВП с переходом в положительный. Наиболее активно ОВП снижалось в течение 4-х суток. До нулевого значения ОВП растворы достигали в течение 6... 12 суток, в зависимости от полученного заряда. Дальнейшее ОВП снижается в 2...3 раза медленнее и достигает оптимальных положительных показателей до 22 суток.

Все активированные растворы имели отрицательный заряд, который находился в пределах от -1200 до -350 mV.

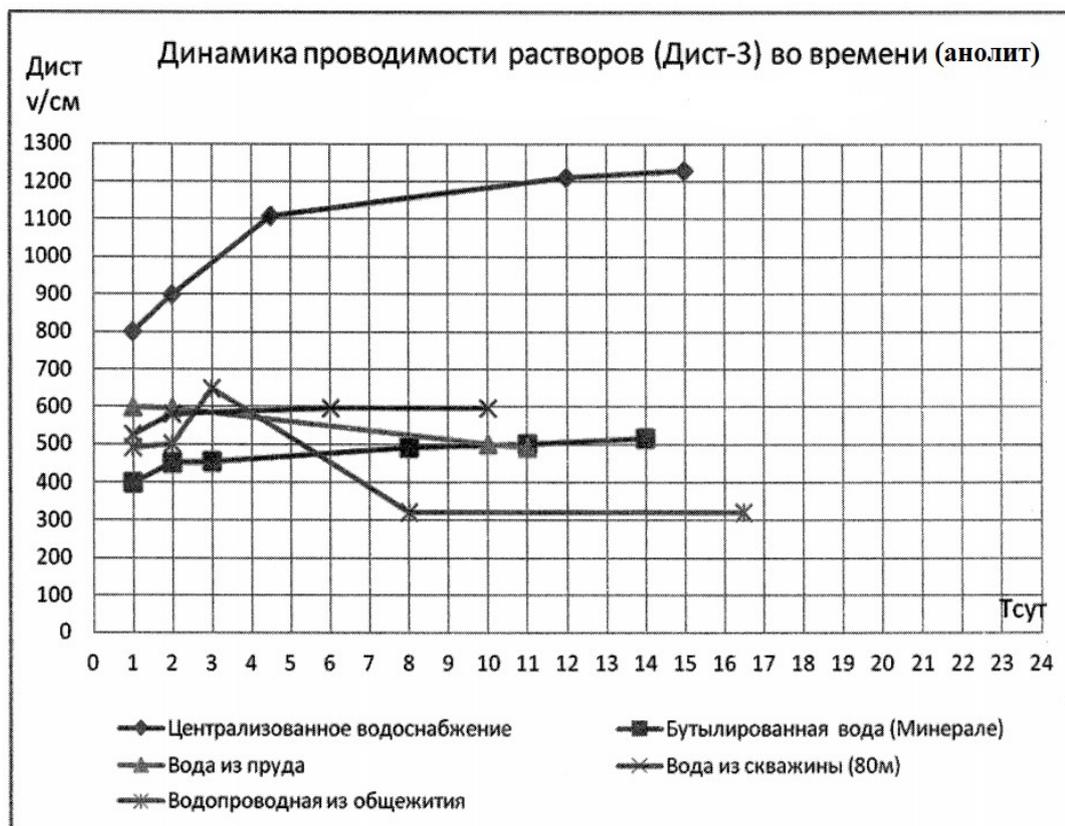




Рисунок 71. – Определение значений проводимости активированных водных растворов в динамике времени

При активации водных растворов происходит резкое изменение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в катодите, а также солевого баланса и электропроводности в анолите.

Прослеживается прямо пропорциональное изменение показателей солевого баланса и электропроводности в анолите.

С учетом основных показателей католита после активации можно определить оптимальную зону и объемы долива (разбавления) исходной (не активированной) водой с целью увеличения полезного объема при поении и кормлении животных и снижения себестоимости активации.

Полученные после активации показатели анолита (ОВП и  $R_n$ ) на всех диапазонах растворов показывают полное устранение бактериальной обсемененности, что говорит о целесообразности применения в животноводстве в качестве дезинфицирующего средства.

**Влияние зарядного напряжения на снижение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (Карлаков Д.С., Лештаев О.В., Стушкина Н.А.)**

Накопители энергии широко используются в электроснабжении для регулирования и выравнивания нагрузки потребителей, в альтернативной электроэнергетике [117], [118], в промышленных и сельскохозяйственных энергоустановках [68], [83], в системах автономного питания электроприемников и измерительных приборов [119]. Наиболее широкое распространение и применение получили свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (АКБ). Свинцово-кислотная батарея, будучи изобретённой ещё в 1859 году, до сих пор остаётся наиболее распространённым типом аккумуляторных батарей, благодаря их низкой стоимости, простоте изготовления и налаженному методу утилизации [120].

Энергетические показатели свинцово-кислотных батарей и их оценка, во многом зависит от их режима заряда-разряда и области применения. Например, для хранения энергии возобновляемых источников требуется частичный заряд-разряд батареи. В автомобильных системах запуска и электропотребления, АКБ в основном работает в режиме плавающего заряда-разряда. Хорошо известно, что различные режимы заряда-разряда влияют на износ АКБ и сокращение срока службы батареи [121].

Согласно ГОСТ Р 53165-2008, напряжение полностью заряженных батарей с номинальным напряжением  $U_{н12} = 12$  вольт, после не более 24 ч выдержки при температуре 25°C при разомкнутой цепи для герметичных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей должно быть не ниже 12,8 вольт. Так как такая свинцово-кислотная аккумуляторная батарея содержит 6 аккумуляторов (секций, ячеек, элементов), то напряжение на отдельно взятом аккумуляторе при разомкнутой цепи должно составлять не менее 2,13 вольт.

Для заряда аккумулятора с номинальным напряжением,  $U_{н2} = 2$  В

рекомендовано использовать зарядное напряжение от 2,3 до 2,4 вольт.

Для глубоко разряженного аккумулятора допустимо проводить заряд повышенным зарядным напряжением от 2,5 до 2,7 В. Заряд более высоким напряжением сопровождается активном электролизом, что влечёт за собой осыпание активной массы пластин и выход аккумулятора из строя [121].

Несмотря на большое количество исследований различных режимов заряда, влияние зарядного напряжения на характеристики батареи требует дальнейшего изучения. Данная работа посвящена исследованию и анализу влияния пониженного зарядного напряжения (ниже рекомендованного зарядного напряжения 2,3-2,4 вольт на аккумулятор, но превышающего потенциал разомкнутой цепи аккумулятора 2,13 вольта, согласно ГОСТ Р 53165-2008), на характеристики аккумуляторных батарей и срок их службы.

В данном исследовании использовались шесть герметичных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, изготовленных по технологии AGM, номинальной емкостью 5 А·ч и номинальным напряжением  $U_{нб} = 6$  вольт. Каждая батарея состоит из 3 аккумуляторов с номинальным напряжением  $U_{н2} = 2$  В. Исследуемые АКБ разделены на 3 группы, по 2 батареи в группе.

Исходя из требований ГОСТ Р 53165-2008, напряжение полностью заряженной батареи с номинальным напряжением  $U_{нб} = 6$  вольт, после не более 24 ч выдержки при температуре 25°C при разомкнутой цепи для герметичных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей должно быть не менее 6,4 вольт. Следовательно, для оценки влияния пониженного зарядного напряжения на характеристики свинцово-кислотных АКБ, зарядное напряжение аккумуляторных батарей с  $U_{нб} = 6$  вольт должно превышать 6,4 вольт, но быть менее 6,9-7,2 вольт [121].

Исследования характеристик батарей проведем при следующих величинах зарядного напряжения: для первой группы АКБ – 6,5 вольт (101,5%); для второй группы – 6,75 вольт (105,5%); для третьей группы – 7

вольт (109,5%).

Для проведения заряда аккумуляторных батарей использовался прибор «Кулон – 715d». Начальный зарядный ток, равный 0,5 ампера, был выбран исходя из рекомендации производителя АКБ. В процессе заряда аккумуляторных батарей током равным 0,5 ампера, при достижении заданного зарядного напряжения на клеммах АКБ (соответственно для групп: 6,5, 6,75 и 7,0 вольт), режим заряда при постоянном токе автоматически менялся на режим заряда при постоянном (заданном для данной группы) зарядном напряжении. Заряд аккумуляторных батарей прекращался через 10 минут после снижения зарядного тока до нуля, согласно табло устройства.

Для определения снижения ёмкости АКБ, был проведен их разряд с использованием электронного модуля нагрузки «WEL3005». Перед началом испытаний все 6 АКБ были полностью заряжены при заданном для каждой группы зарядном напряжении. В первом цикле испытаний на «WEL3005», АКБ были разряжены током 0,25 ампер до падения напряжения до 5,25 вольт на клеммах батарей и проведено измерение их действительной ёмкости в А·ч, согласно ГОСТ 53165-2008. В следующих восьми циклах проводился заряд АКБ на приборе «Кулон – 715d», до заданных напряжений заряда групп, а затем разряд батарей на «WEL3005» током 0,25 ампера, до падения напряжения до 6 вольт, без измерения ёмкости АКБ. В 10 цикле, после проведения заряда, разряд АКБ проводился до падения напряжения до 5,25 вольт, т.е. испытания проводились аналогично испытаниям в первом цикле.

По результатам испытаний в 1-ом и 10-ом циклах «заряд-разряд» аккумуляторных батарей, в соответствии с измеренными действительными ёмкостями АКБ, для каждой из трёх групп батарей были рассчитаны средние значения ёмкостей (А·ч), при зарядных напряжениях: 6,5 вольт (101,5%); 6,75 вольт (105,5%) и 7 вольт (109,5%).

Результаты расчетов средних ёмкостей АКБ в А·ч, при оценке влияния пониженного зарядного напряжения на снижение ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей по результатам испытаний в 1-ом и 10-

ом циклах «заряд-разряд» представлены в Таблица 26.

Таблица 26

**Среднее снижение ёмкости АКБ после десяти циклов «заряд-разряд» и зарядных напряжениях ниже рекомендованного инструкцией по эксплуатации АКБ**

№ цикла	Среднее значение ёмкости АКБ (А·ч), при заряде напряжением 6,5v (101,5%)	Среднее значение ёмкости АКБ (А·ч), при заряде напряжением 6,75v (105,5%)	Среднее значение ёмкости АКБ (А·ч), при заряде напряжением 7v (109,5%)
1	4,94	4,945	4,93
10	4,35	4,46	4,625

В соответствии с измеренными и рассчитанными средними значениями ёмкости АКБ (Таблица 26), проведено определение:

- снижения емкости АКБ:

$$\Delta C = C_1 - C_{10}; \quad (136)$$

- деградация емкости АКБ, в %:

$$D_E = \frac{C_1 - C_{10}}{C_1} \cdot 100\%; \quad (137)$$

где  $C_1, C_{10}$  – средние значения ёмкости АКБ, определенные, соответственно, в 1-ом и 10-ом циклах «заряд-разряд» АКБ.

Результаты расчетов: снижение емкости  $\Delta C$  по (145) и деградация емкости АКБ  $D_E$  по (146), в зависимости от значения пониженного зарядного напряжения, относительно рекомендованного инструкцией по эксплуатации АКБ, представлены в .

Таблица 27

**Характеристики АКБ после десяти циклов «заряд-разряд» и зарядных напряжениях ниже рекомендованного инструкцией по эксплуатации АКБ**

Параметры АКБ	Среднее снижение ёмкости АКБ А·ч, при заряде напряжением 6,5v (101,5%)	Среднее снижение ёмкости АКБ А·ч, при заряде напряжением 6,75v (105,5%)	Среднее снижение ёмкости АКБ А·ч, при заряде напряжением 7v (109,5%)
$\Delta C$ , А·ч	0,59	0,485	0,305
$D_E$ , %	11,94	9,81	6,19
Уравнение связи	$C=5,006-0,0656 \cdot k$	$C=4,999-0,0539 \cdot k$	$C=4,964-0,0339 \cdot k$
$k$ , количество циклов	38,2	46,4	72,7

В соответствии с измеренными и рассчитанными средними значениями ёмкости АКБ (Таблица 26), построены графики изменения ёмкости АКБ  $C$  в зависимости от количества циклов «заряд-разряд» АКБ (Рисунок 72) и определено линейное уравнение: изменение ёмкости АКБ в зависимости от количества циклов «заряд-разряд» АКБ:

$$C = C_{нач} - b \cdot k ; \quad (138)$$

где  $C_{нач}$  – начальная ёмкость АКБ, т.е. ёмкость АКБ до проведения испытаний, А·ч;  $b$  – коэффициент чувствительности снижения ёмкости АКБ к количеству циклов «заряд-разряд» АКБ, А·ч/цикл;  $k$  – количество циклов «заряд-разряд» АКБ.

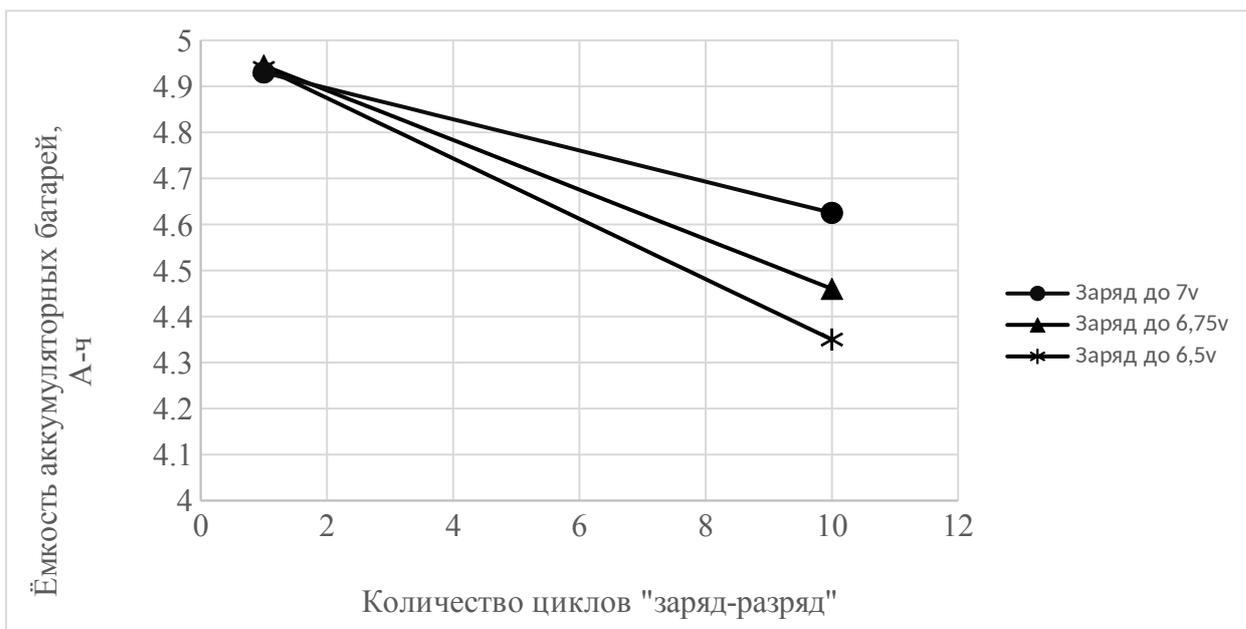


Рисунок 72. – Изменение ёмкости аккумуляторных батарей (с номинальной ёмкостью 5 А·ч), в зависимости от количества циклов «заряд-разряд» АКБ

В соответствии с проведенными исследованиями, для трех групп испытуемых АКБ (Таблица 26) и графиками изменения их ёмкости в зависимости от количества циклов «заряд-разряд» АКБ (Рисунок 72) определены уравнения связи (147) для каждой из групп АКБ и представлены в .

Приняв ёмкость АКБ при котором происходит её списание (утилизация)  $C_p = 0,5$  от номинальной ёмкости 5 А·ч, и преобразовав (147), определено количество циклов «заряд-разряд» АКБ до списания при заряде напряжением, соответственно 6,5v (101,5%); 6,75v (105,5%) и 7v (109,5%). Результаты расчетов  $k$  также занесены в .

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при низком зарядном напряжении ёмкость аккумуляторных батарей быстро снижается. При повышении зарядного напряжения данная тенденция, напротив, уменьшается. Можно предположить, что снижение ёмкости аккумуляторных батарей при заряде малым напряжением происходит из-за сульфатации пластин.

В то же время, можно предположить, что при повышении зарядного напряжения электролиз происходит более активно, что способствует перемешиванию электролита, а образующиеся в результате электролиза пузырьки газа разрушают частички сульфата и отделяют их от пластин аккумуляторов, что снижает интенсивность утраты батареей первоначальной ёмкости.

Для улучшения характеристик АКБ их заряд необходимо производить при зарядном напряжении выше напряжения полностью заряженной батареи, рекомендованного ГОСТом Р 53165-2008. При этом происходит минимальное снижение ёмкости АКБ и увеличивается допустимое количество циклов «заряд-разряд». Следовательно, заряд напряжением 109,5% от напряжения полностью заряженной аккумуляторной батареи рекомендованного ГОСТом Р 53165-2008 способствует улучшению параметров, продлению срока службы АКБ и, как следствие, снижению затрат на приобретение новых аккумуляторных батарей.

## **Использование ионисторов в блоках питания слаботочных электропотребителей (Андреев С.А., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е.)**

При разработке блоков питания слаботочных потребителей обычно встает вопрос о выборе заряжаемых накопителей энергии. Ранее этот выбор однозначно определялся в пользу химических аккумуляторов. Современные химические аккумуляторы обладают достаточно высоким КПД, однако их рабочие характеристики сильно зависят от температуры и режимов отбора запасенной энергии, а срок эксплуатации невелик. В последнее время возрастающее значение в качестве накопителей электрической энергии приобретают конденсаторы сверхбольшой емкости (суперконденсаторы или ионисторы), обладающие рядом преимуществ [122]. Ионисторы допускают эксплуатацию в произвольных режимах, безопасны, легко утилизируются, способны выдержать чрезвычайно большое количество циклов «заряда-разряда», а их характеристики стабильны с изменением температуры. Вместе с тем ионисторы характеризуются довольно низкой плотностью аккумулированной энергии, а напряжение на них начинает убывать сразу после подключения нагрузки. Традиционное решение проблемы за счет использования параметрической стабилизации напряжения малоэффективно, поскольку при этом часть накопленной энергии не используется. Кроме того, при таком подходе превышение напряжения над номинальным значением сопровождается уменьшением внутреннего сопротивления стабилитрона, увеличением тока и повышением тепловых потерь. Таким образом, актуальными задачами являются исследование процесса извлечения запасенной энергии и его оптимизация с учетом необходимости поддержания постоянства напряжения на нагрузке.

Целью работы является исследование процесса разряда ионистора, определение энергетических потерь на различных участках схем питания и обоснование способа динамической коммутации ионисторов при их использовании в качестве накопителей энергии в блоках питания

низкоэнергетических потребителей.

В качестве материала исследований использовались ионисторы, переменные резисторы, имитирующие активные сопротивления участков цепи, и магнитоэлектрические измерительные приборы. При выполнении теоретических исследований применялись сведения из теории переходных процессов и классические приемы расчета электрических цепей.

Для оценки количества энергии, доставленной потребителю мощностью  $P$  в течение времени  $t$ , воспользуемся выражением:

$$W = P \cdot t; \quad (139)$$

Энергия, накапливаемая ионистором, определяется формулой:

$$W = \frac{C U^2}{2}; \quad (140)$$

где  $C$  – емкость ионистора; Ф;

$U$  – напряжение на обкладках ионистора, В

В процессе разряда ионистора напряжение на его зажимах уменьшается с  $U_{max}$  до  $U_{min}$ . В связи с этим фактически использованная часть энергии представляет собой разность между полной энергией, сосредоточенной в ионисторе при  $U = U_{max}$ , и энергией, оставшейся в нем по окончании разряда при  $U = U_{min}$ . Таким образом, если  $W_{полн.} = \frac{C U_{max}^2}{2}$ , и  $W_{ост.} = C U_{min}^2$ , то

$$W_{исп.} = \frac{C (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}; \quad (141)$$

Величину емкости ионистора, необходимую для накопления энергии, определим из соотношения:

$$C = \frac{2W}{U_{max}^2 - U_{min}^2} = \frac{2Pt}{U_{max}^2 - U_{min}^2}; \quad (142)$$

С целью увеличения запасенной энергии необходимо либо увеличить  $U_{max}$ , либо уменьшить  $U_{min}$ . Однако значительное увеличение  $U_{max}$  сдерживается техническими ограничениями, связанными с вероятностью

пробоя ионистора. В то же время чрезмерное уменьшение  $U_{min}$  недопустимо из-за соответствующих требований потребителя. Если принять во внимание, что полная энергия, запасаемая ионистором, составляет 100%, то доля использованной энергии может быть оценена соотношением:

$$X = \frac{100 \cdot W_{исн}}{W_{полн}} = \frac{100 \cdot (C U_{max}^2 - C U_{min}^2) \cdot 2}{2 C U_{max}^2} = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{U_{max}^2} \% ; \quad (143)$$

Выразив  $U_{min}$  в выражении (5) через  $U_{max}$ , и введя обозначение  $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$ ,

получим:

$$X = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - \frac{U_{max}^2}{k})}{U_{max}^2} = \frac{100 \cdot U_{max}^2 - \frac{100}{k} \cdot U_{max}^2}{U_{max}^2} = 100 - \frac{100}{k} ; \quad (144)$$

Из выражения (153) следует, что процентная доля энергии, используемой ионистором, зависит от соотношения напряжений. Задаваясь рядом значений  $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$ , построим график зависимости доли используемой энергии ионистором от отношения  $U_{max}$  и  $U_{min}$  (Рисунок 73).

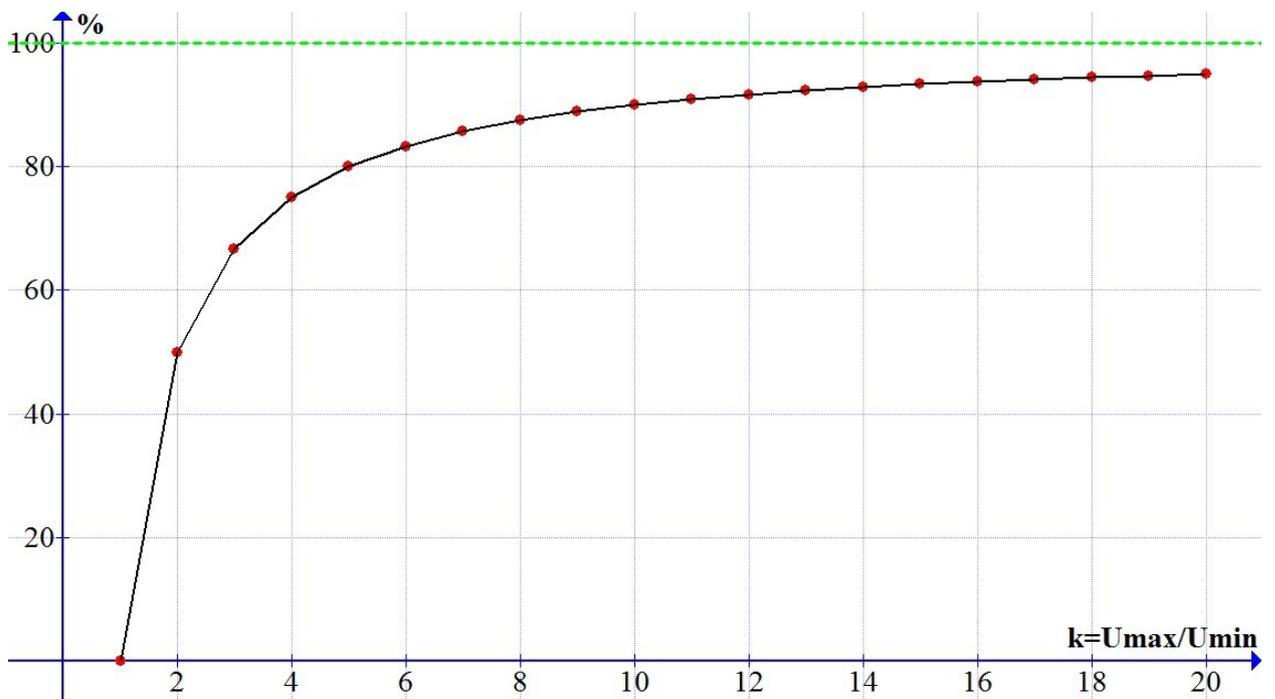


Рисунок 73. – График зависимости процентной доли использованной энергии ионистором от отношения  $U_{max}$  и  $U_{min}$

Рассматривая график, можно сделать вывод, что если  $U_{max}$  в два раза превышает  $U_{min}$ , то использованию подлежат 50% запасенной энергии. Если же это превышение окажется двадцатикратным, то доля используемой энергии достигнет 95%. Для обеспечения постоянства напряжения на нагрузке к ионистору традиционно подключают стабилитрон (или иной полупроводниковый элемент), внутреннее сопротивление  $R_q$  которого изменяется при изменении условий работы [123]. В таком случае цепь разряда ионистора представляется схемой замещения, изображенной на Рисунок 74.

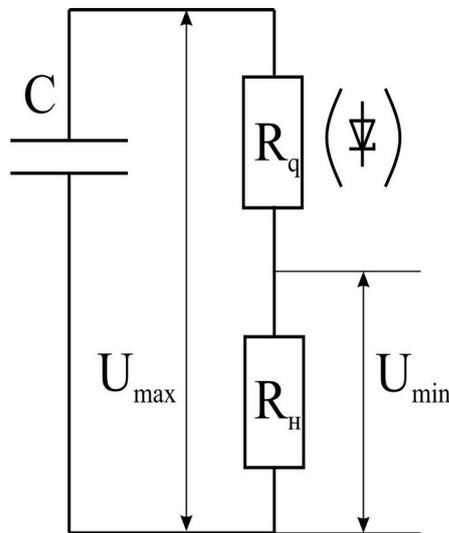


Рисунок 74. – Схема замещения цепи разряда ионистора

Для схемы замещения справедливо равенство:

$$U_{max} = I_n \cdot (R_q + R_n) = I_n R; \quad (145)$$

В результате деления всех членов выражения (154) на  $I_n$  получим:

$$\frac{U_{max}}{I_n} = R_q + R_n;$$

Следовательно,

$$R_q = \frac{U_{max}}{I_n} - R_n; \quad (146)$$

В то же время, при минимально допустимом напряжении на нагрузке

значение тока можно определить как  $I_n = \frac{U_{min}}{R_n}$ .

В результате подстановки этого выражения в условие (155) формируется запись:

$$R_q = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}} - R_n;$$

Представим сумму  $R = R_q + R_n$  в следующей форме:

$$R = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}} - R_q + R_n = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}}; \quad (147)$$

При разряде ионистора на активное сопротивление  $R$  напряжение на его зажимах будет меняться в соответствии с законом:  $u = u_0 e^{\frac{-t}{RC}}$ ,

где  $t$  – время, с;  $u_0$  – напряжение на ионисторе при  $t=0$ , В [124].

Принимая во внимание выражение (156), запишем:

$$u = U_{max} e^{\frac{-t U_{min}}{U_{max} R_n C}}; \quad (148)$$

По Рисунок 74 можно видеть, что полное сопротивление  $R$  определяется постоянным сопротивлением нагрузки  $R_n$  и переменным полупроводниковым эквивалентом  $R_q$ . Примечательно, что сопротивление контура разряда ионистора зависит и от времени, и от значения напряжения на его зажимах. Вследствие зависимости напряжения на ионисторе от сопротивления выражение (157) приобретает рекурсивный характер.

Определим значения напряжения на ионисторе через равные промежутки времени  $\Delta t$  (при  $\Delta t = 0,01$ ;  $0,1$  и  $1$  с), когда  $U_{max} = 2U_{min}$ . Используем символ « $n$ » для обозначения номера интервала времени. При этом примем, что  $C = 1$  Ф и  $R_n = 100$  Ом:

$$u(0) = U_{max} \cdot e^{\frac{-0 \cdot U_{min}}{U_{max} \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(1) = U(0) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(0) \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(2) = U(1) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(1) \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(n) = U(n-1) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(n-1) \cdot R_n \cdot C}};$$

Результаты расчета представлены в Таблица 28.

Таблица 28

**Напряжение на обкладках ионистора в процессе его разряда**

t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с	t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с
	Напряжение U, В				Напряжение U, В		
0	6	6	6	50	4,50	4,50	4,50
1	5,97	5,97	5,97	51	4,47	4,47	4,47
2	5,94	5,94	5,94	52	4,44	4,44	4,44
3	5,91	5,91	5,91	53	4,41	4,41	4,41
4	5,88	5,88	5,88	54	4,38	4,38	4,38
5	5,85	5,85	5,85	55	4,35	4,35	4,35
6	5,82	5,82	5,82	56	4,32	4,32	4,32
7	5,79	5,79	5,79	57	4,29	4,29	4,29
8	5,76	5,76	5,76	58	4,26	4,26	4,26
9	5,73	5,73	5,73	59	4,23	4,23	4,23
10	5,70	5,70	5,70	60	4,20	4,20	4,20
11	5,67	5,67	5,67	61	4,17	4,17	4,17
12	5,64	5,64	5,64	62	4,14	4,14	4,14
13	5,61	5,61	5,61	63	4,11	4,11	4,11
14	5,58	5,58	5,58	64	4,08	4,08	4,08
15	5,55	5,55	5,55	65	4,05	4,05	4,05
16	5,52	5,52	5,52	66	4,02	4,02	4,02
17	5,49	5,49	5,49	67	3,99	3,99	3,99
18	5,46	5,46	5,46	68	3,96	3,96	3,96
19	5,43	5,43	5,43	69	3,93	3,93	3,93
20	5,40	5,40	5,40	70	3,90	3,90	3,90
21	5,37	5,37	5,37	71	3,87	3,87	3,87
22	5,34	5,34	5,34	72	3,84	3,84	3,84
23	5,31	5,31	5,31	73	3,81	3,81	3,81
24	5,28	5,28	5,28	74	3,78	3,78	3,78
25	5,25	5,25	5,25	75	3,75	3,75	3,75
26	5,22	5,22	5,22	76	3,72	3,72	3,72
27	5,19	5,19	5,19	77	3,69	3,69	3,69
28	5,16	5,16	5,16	78	3,66	3,66	3,66
29	5,13	5,13	5,13	79	3,63	3,63	3,63
30	5,10	5,10	5,10	80	3,60	3,60	3,60
31	5,07	5,07	5,07	81	3,57	3,57	3,57
32	5,04	5,04	5,04	82	3,54	3,54	3,54
33	5,01	5,01	5,01	83	3,51	3,51	3,51
34	4,98	4,98	4,98	84	3,48	3,48	3,48
35	4,95	4,95	4,95	85	3,45	3,45	3,45
36	4,92	4,92	4,92	86	3,42	3,42	3,42
37	4,89	4,89	4,89	87	3,39	3,39	3,39

38	4,86	4,86	4,86	88	3,36	3,36	3,36
39	4,83	4,83	4,83	89	3,33	3,33	3,33
40	4,80	4,80	4,80	90	3,30	3,30	3,30
41	4,77	4,77	4,77	91	3,27	3,27	3,27
42	4,74	4,74	4,74	92	3,24	3,24	3,24
43	4,71	4,71	4,71	93	3,21	3,21	3,21
44	4,68	4,68	4,68	94	3,18	3,18	3,18
45	4,65	4,65	4,65	95	3,15	3,15	3,15
46	4,62	4,62	4,62	96	3,12	3,12	3,12
47	4,59	4,59	4,59	97	3,09	3,09	3,09
48	4,56	4,56	4,56	98	3,06	3,06	3,07
49	4,53	4,53	4,53	99	3,03	3,03	3,04
				100	3,00	3,00	3,01

С целью повышения наглядности расчет напряжений был повторен при  $\Delta t=10, 20$  и  $50$  с. По причине значительных различий полученных результатов утрачивается необходимость статистической обработки полного массива.

Таблица 29

**Напряжение на обкладках ионистора при  
укрупненных временных интервалах**

n	$\Delta t=10$ с	$\Delta t=20$ с	$\Delta t=50$ с
	Напряжение $U$ , В		
0	6,00	6,00	6,00
1	5,70	5,42	4,67
2	5,41	4,86	3,39
3	5,12	4,29	–
4	4,83	3,73	–
5	4,54	3,18	–
6	4,25	–	–
7	3,96	–	–
8	3,67	–	–
9	3,38	–	–
10	3,09	–	–

По расчетным значениям напряжения построим кривую разряда ионистора, представленную на Рисунок 75. В тех же координатах изобразим график разряда ионистора при постоянном сопротивлении  $R_q$ .

Из представленных на Рисунок 75 кривых видно, что графики, иллюстрирующие изменение напряжения от 6 до 3 В, находятся между кривой разряда ионистора при постоянном сопротивлении:  $u(t)=6 \cdot e^{\frac{-t}{(100+100) \cdot 1}}$  и прямой линией  $u(t)=-3t/100$ . Последняя линия представляет собой касательную, проведенную к кривой разряда в точке  $t=0$ . Несложно заметить, что при  $\Delta t \rightarrow 0$  кривая изменения напряжения стремится к касательной.

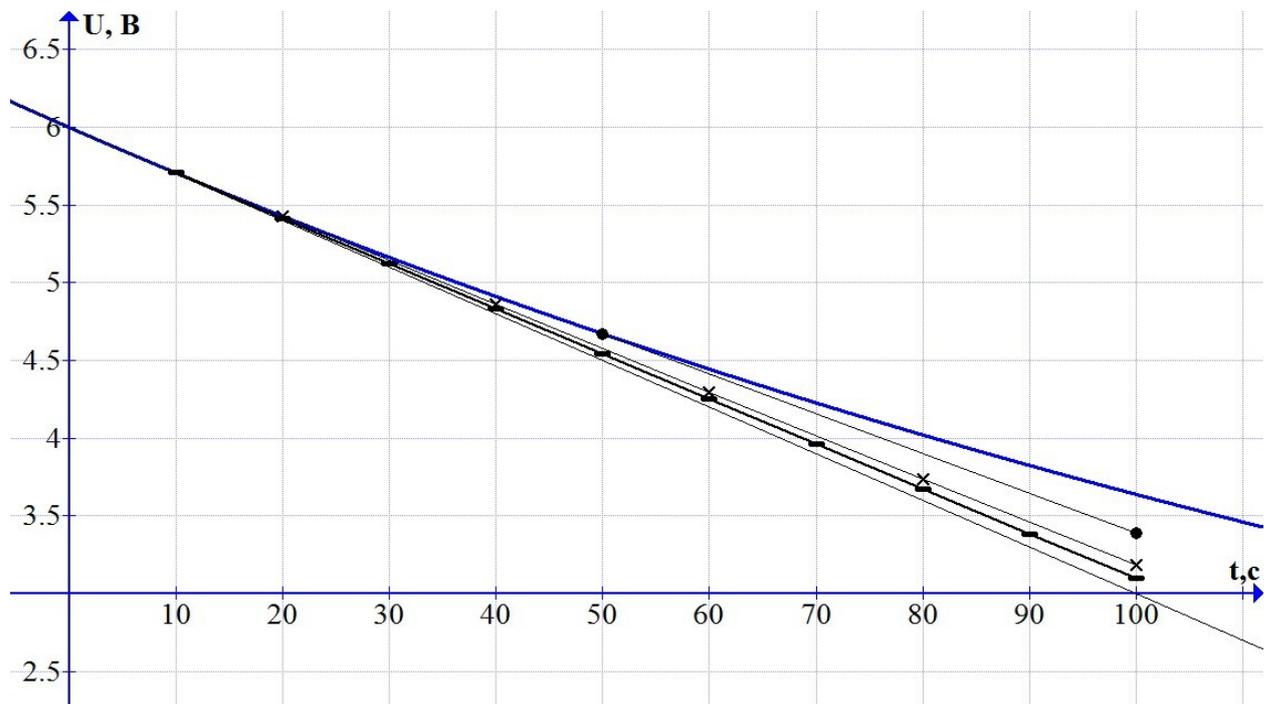


Рисунок 75. – Кривые разряда ионистора при различных нагрузках

Уравнение линии касательной к кривой, описываемой выражением (157), получим с применением известного математического приема [85]:

$$f(t) = f'(t_0) \cdot (t - t_0) + f(t_0); \quad (149)$$

В наших рассуждениях в качестве функции  $f(t)$  выступает выражение (157)

Учитывая закономерность  $f'(t) = f'(v) \cdot v'$ , и приняв обозначение  $u = f'(t)$ , представим выражение (157) в виде:

$$f(t) = U_{\max} e^{\frac{-t U_{\min}}{U_{\max} R_n C}}; \quad (150)$$

Обозначим:

$$v = \frac{-t \cdot U_{min}}{U_{max} \cdot R_H \cdot C}; \quad (151)$$

Тогда:  $u = U_{max} e^v$ .

В результате дифференцирования выражения (160) по  $t$  получим:

$$v' = \left( \frac{-t U_{min}}{U_{max} R_H C} \right)' = \frac{-U_{min}}{U_{max} R_H C};$$

После подстановки будем иметь:  $f'(t) = U_{max} e^v \cdot \frac{-U_{min}}{U_{max} R_H C}$

$$\text{или } u = f'(t) = \frac{-U_{min}}{R_H C} \cdot e^{\frac{-t U_{min}}{U_{max} R_H C}}$$

В соответствии с условием (158) можно записать:

$$u = \frac{-U_{min}}{R_H C} \cdot t + U_{max}; \quad (152)$$

Выражение (161) является искомым уравнением касательной, описывающей разряд ионистора в условиях меняющегося эквивалентного сопротивления  $R_q$  при изменении напряжения от  $U_{max}$  до  $U_{min}$ . Для определения длительности соответствующего разряда ионистора воспользуемся зависимостью:

$$t = \frac{R_H \cdot C \cdot (U_{max} - u)}{U_{min}}; \quad (153)$$

В то же время емкость ионистора может быть рассчитана по формуле:

$$C = \frac{t \cdot U_{min}}{R_H \cdot (U_{max} - U_{min})}; \quad (154)$$

Определенный интерес представляет влияние соотношения максимального и минимального напряжений на величину потерь энергии на эквивалентном сопротивлении. Протекание электрического тока по исследуемой цепи сопровождается выделением тепловой энергии. При этом мгновенная мощность может определяться как

$$p = \left( \frac{-U_{min}}{R_n C} \cdot t + U_{max} \right) \cdot \frac{U_{min}}{R_n} = \frac{U_{min} \cdot U_{max}}{R_n} - \frac{t U_{min}^2}{R_n^2}; \quad (155)$$

Оценка количества полезно затраченной энергии на нагрузке характеризуется произведением:

$$W_n = P \cdot t = I^2 \cdot R_n \cdot t;$$

Подставим в последнее выражение вместо  $t$  соотношение (162). При этом будем считать, что разряд ионистора происходит до минимально допустимого значения  $U_{min}$ .

Таким образом,

$$W_n = \left( \frac{U_{min}}{R_n} \right)^2 \cdot R_n \cdot \dot{t} \quad (156)$$

Объем энергии, рассеиваемой на эквивалентном сопротивлении, определим в результате вычитания [125]:  $W_q = W_n - W_n$ . Или

$$W_q = \left( \frac{C U_{max}^2 - C U_{min}^2}{2} \right) \cdot \dot{t} \\ \frac{C(U_{max}^2 - 2U_{min}U_{max} + U_{min}^2)}{2} = \frac{C(U_{max} - U_{min})^2}{2} \dot{t}; \quad (157)$$

Подводя промежуточные результаты рассуждений, рассмотрим зависимость всех составляющих уравнения энергетического баланса от отношения  $\frac{U_{max}}{U_{min}}$ . Рассмотрению подлежат:

- полная энергия, накопленная в заряженном ионисторе  $W = \frac{C U_{max}^2}{2}$ ;
- энергия, переданная ионистором в цепь разряда  $W_{омд.} = \frac{C(U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}$ ;
- энергия, полезно используемая нагрузкой  $W_n = U_{min} \cdot C \cdot (U_{max} - U_{min}) \dot{t}$ ;
- энергия, утрачиваемая на стабилитроне  $W_q = \frac{C(U_{max} - U_{min})^2}{2}$ ;
- неиспользованная энергия  $W_{ост.} = \frac{C U_{min}^2}{2}$ ;

Значения энергий, рассчитанные по вышеприведенным выражениям,

представлены на Рисунок 76.

Здесь график 1 характеризует изменение  $W_q$ , график 2 – изменение  $W_n$ , график 3 – изменение  $W_{ост.}$  и график 4 – величину  $W$ .

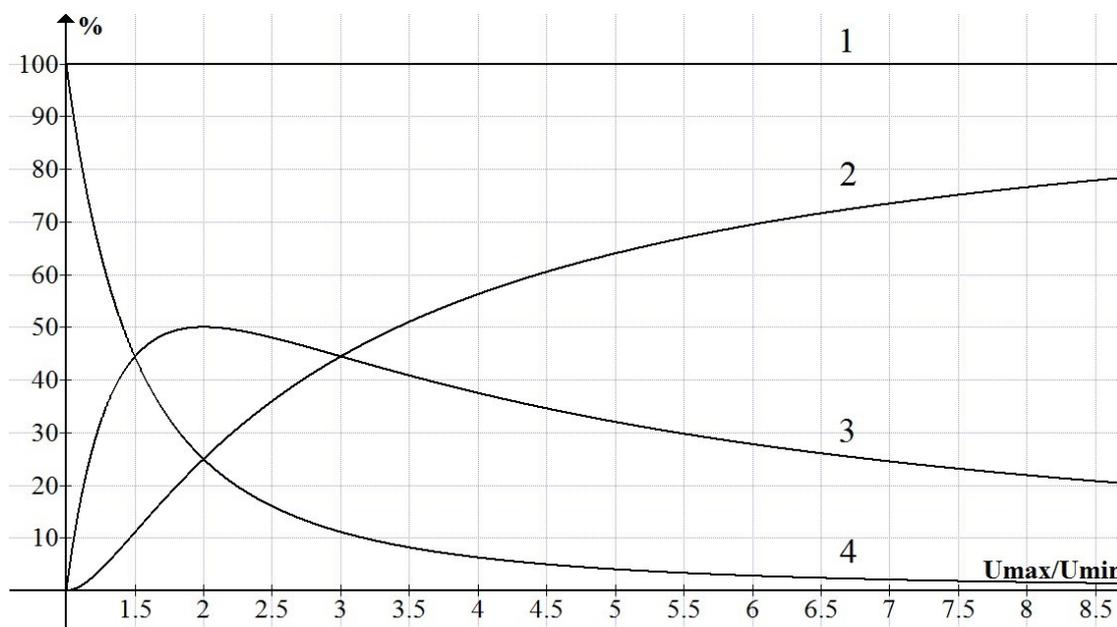


Рисунок 76. – Зависимости составляющих уравнений энергетического баланса от отношения  $\frac{U_{max}}{U_{min}}$

Нетрудно заметить, что при использовании стабилизатора значительная часть сосредоточенной в ионисторе энергии расходуется нерационально. Например, при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат не более 50% запасенной энергии. Поэтому для повышения эффективности ионисторов использование параметрической стабилизации по мере возможности следует ограничивать. Традиционный подход к стабилизации напряжения у потребителя предлагается заменить на принцип динамической коммутации, заключающийся в принудительном переключении отдельных ионисторов, суммарная емкость которых эквивалентна расчетной. В различные моменты времени в цепь разряда должны подключаться ионисторы или группы ионисторов, соединенные определенным образом между собой. При этом коммутация ионисторов происходит в функции напряжений на их зажимах.

Рассмотрим разряд группы ионисторов, в которой содержатся от

одного до десяти элементов, считая, что до начала процесса они были соединены параллельно, а после начала – последовательно. Будем считать, что рассматриваемый контур обладает следующими параметрами:  $U_{max}=10\text{В}$  и  $C=1\text{Ф}$ . Определим доли неиспользованной энергии для трех значений минимального напряжения на группе ионисторов: в первом случае  $U_{min}=7\text{В}$ , во втором  $U_{min}=5\text{В}$  и в третьем  $U_{min}=3\text{В}$ . Представим результаты расчета в виде графиков на Рисунок 77. Эти графики иллюстрируют зависимости доли неиспользованной энергии  $W_{ocm}$  (%) от количества ( $n$ ) ионисторов в группе.

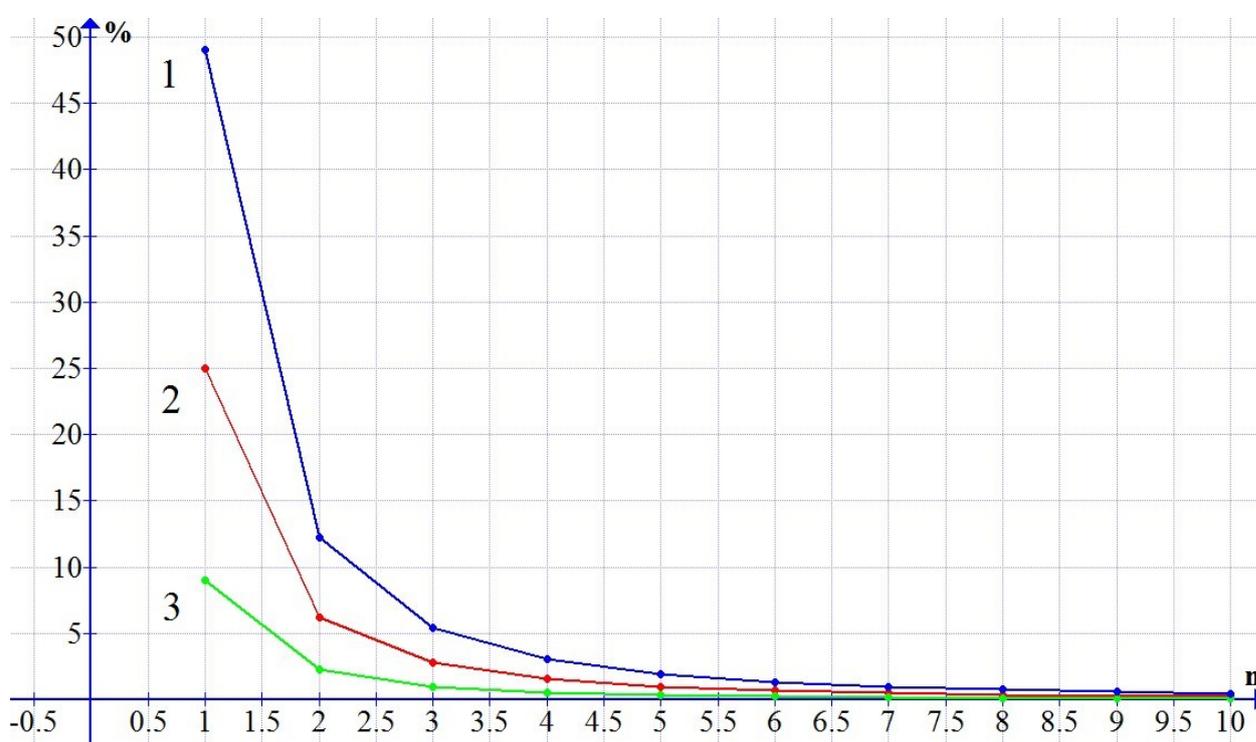


Рисунок 77. – Зависимости долей неиспользованной энергии  $W_{ocm}$  (%) от количества ионисторов в группе при различных значениях  $U_{min}$

Из графиков видно, что, например, для второго случая при изменении количества ионисторов от одного до двух доля неиспользованной энергии уменьшается от 25% до 12,5%. При последующем увеличении количества ионисторов эта доля продолжает снижаться и уже при  $n > 5$  становится меньше 1%.

Заметим, что при  $n \geq 3$  открывается возможность различного соединения ионисторов, как показано на Рисунок 78. Очевидно, что в начале

разряда целесообразно параллельное соединение (Рисунок 78а), по мере снижения напряжения – комбинированное (Рисунок 78б) и в конце – последовательное (Рисунок 78в). Манипуляция схемами соединения ионисторов в группе позволяет поддерживать напряжение на нагрузке в пределах заданного интервала. При этом доля использованной энергии увеличивается, а тепловые потери на стабилизаторе исключаются.

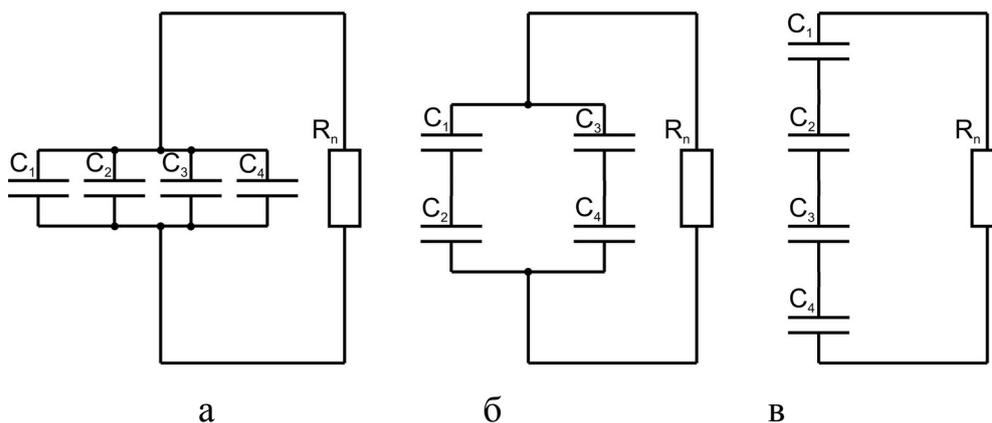


Рисунок 78. – Примеры схем соединения ионисторов при динамической коммутации

Надо отметить, что не все схемы соединения ионисторов приводят к положительному результату. Например, неэффективной окажется схема, в которой к последовательно соединенным ионисторам параллельно подключаются другие ионисторы. Такое соединение определит возникновение уравнивающих токов до выравнивания напряжений на всех параллельно соединенных элементах. Если внутреннее сопротивление коммутирующего устройства является достаточно низким, уравнивающие токи могут значительно превысить значения рабочих токов. Для предотвращения появления этих токов в группе ионисторов при их динамической коммутации должно содержаться  $2^m$  элементов, где  $m$  – целое положительное число. Более того, изменение первоначального вида схемы должно быть исключительно симметричным, допуская образование полностью параллельных или последовательных цепей.

Рассмотрим состояние слагаемых уравнения энергетического баланса при параметрической стабилизации и динамической коммутации ионисторов.

Известно, что  $W = \frac{CU_{max}^2}{2}$ ;  $W_{ocm}(n) = \frac{U_{min}^2 C}{2 \cdot 2^m}$ ;

Для случая  $U_{max} = 2U_{min}$ :

$$W_n(n) = \sum_{i=0}^n \frac{U_{min}^2 C}{2^{2i}};$$

где  $i$  – порядковый номер коммутации.

При отсутствии стабилизатора

$$W_{омд} = \frac{CU_{max}^2}{2} - \frac{CU_{min}^2}{2 \cdot 2^m} = \frac{C \cdot 2^m U_{max}^2 - CU_{min}^2}{2 \cdot 2^{2m}} = \frac{C(2^{2m} U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2 \cdot 2^{2m}};$$

Результаты расчета слагаемых энергетического баланса в долях от полного объема запасенной энергии при различном количестве ионисторов в группе представлены в Таблица 30.

Таблица 30

**Распределение долей слагаемых энергетического  
баланса от полной запасенной энергии при различном  
количестве ионисторов в группе**

Количество ионисторов в группе, $m$	1	2	4	8
Доля отданной энергии ( $W_{омд}$ )	75%	93,8%	98,4%	99,6%
Доля неиспользованной энергия ( $W - W_{омд}$ )	25%	6,3%	1,6%	0,4%

Примечательно, что, что при использовании группы из восьми ионисторов доля неиспользованной энергии снижается до 0,4%.

Следует отметить, что на практике динамическая коммутация реализуется полупроводниковыми бесконтактными устройствами.

При этом продолжительность подключения ионисторов будет зависеть от напряжения на их зажимах.

При необходимости уменьшения напряжения на нагрузке в отсутствие параметрической стабилизации возможно осуществить отбор энергии в импульсном режиме. Чередованием открытого и закрытого состояния

коммутирующего устройства, достигается требуемое среднее значение напряжения на нагрузке. Проиллюстрируем последнее утверждение следующими рассуждениями.

Известно, что напряжение на ионисторе в процессе его разряда на внешнюю цепь происходит в соответствии с выражением:

$$u = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}; \quad (158)$$

где  $u_0$  – напряжение на зажимах ионистора при подключении к нагрузке, В;  $t$  – длительность разряда ионистора, с;  $R$  – сопротивление нагрузки, Ом;  $C$  – емкость ионистора, Ф.

Введем обозначения:  $T_1$  и  $T_2$  – длительности открытого и закрытого состояний коммутирующего устройства соответственно, с. Если в качестве накопителя энергии использован ионистор, то  $T_1 = const$ , а  $T_2$  является функцией от среднего значения напряжения  $U_{cp}$  на его зажимах при открытом состоянии коммутирующего устройства и номинального напряжения  $U_{ном}$ , требуемого потребителем. При этом среднее значение напряжения определяется в соответствии с выражением:

$$U_{cp} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u \cdot e^{-\frac{t}{RC}} dt = \frac{CRu - CRu e^{-\frac{T_1}{RC}}}{T_1} = \frac{CRu \left(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}}\right)}{T_1};$$

Мгновенное значение напряжения « $u$ » в последнем выражении характеризует величину напряжения на зажимах ионистора в начале каждого интервала  $T_1$ . В таком случае значение  $T_2$  может быть определено в соответствии с выражением:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{U_{cp}}{U_{ном}} - 1 \right);$$

Преимущества динамической коммутации по сравнению с традиционной параметрической стабилизацией иллюстрируются примером разряда группы из двух ионисторов. Допустим, емкость каждого ионистора составляет  $C = 2,5 \text{ Ф}$ ,  $R_{нагр} = 500 \text{ Ом}$ ,  $U_{max} = 10 \text{ В}$ ,  $U_{нагр} = 5 \text{ В}$ .

При наличии стабилитрона разряд ионистора происходит в

соответствии с выражением:

$$U = U_{\max} \cdot e^{\frac{-t}{R_q(U) + R_n} \cdot C};$$

$$\text{При этом можно записать: } R_q = \frac{U_{\text{нагр}} \cdot R_{\text{нагр}}}{U};$$

В таком случае несложно подсчитать, что разряд ионистора до номинального значения напряжения, требуемого потребителем, произойдет за 1250 с. Изменение этого напряжения иллюстрируется кривой 1 на Рисунок 79. Отметим, что при построении этой зависимости принималось допущение о пошаговом изменении внутреннего сопротивления стабилитрона каждые 100 секунд. В процессе динамической коммутации разряд замедлится, и его продолжительность возрастет до 2500 секунд (кривые 2 на Рисунок 79). В результате переключения схемы соединения ионисторов с параллельной на последовательную напряжение на общих зажимах группы ионисторов возрастет. При этом потребитель будет располагать электроэнергией требуемого напряжения. На Рисунок 79 факт переключения ионисторов отмечен точками пересечения пунктирных вертикальных линий с осью абсцисс.

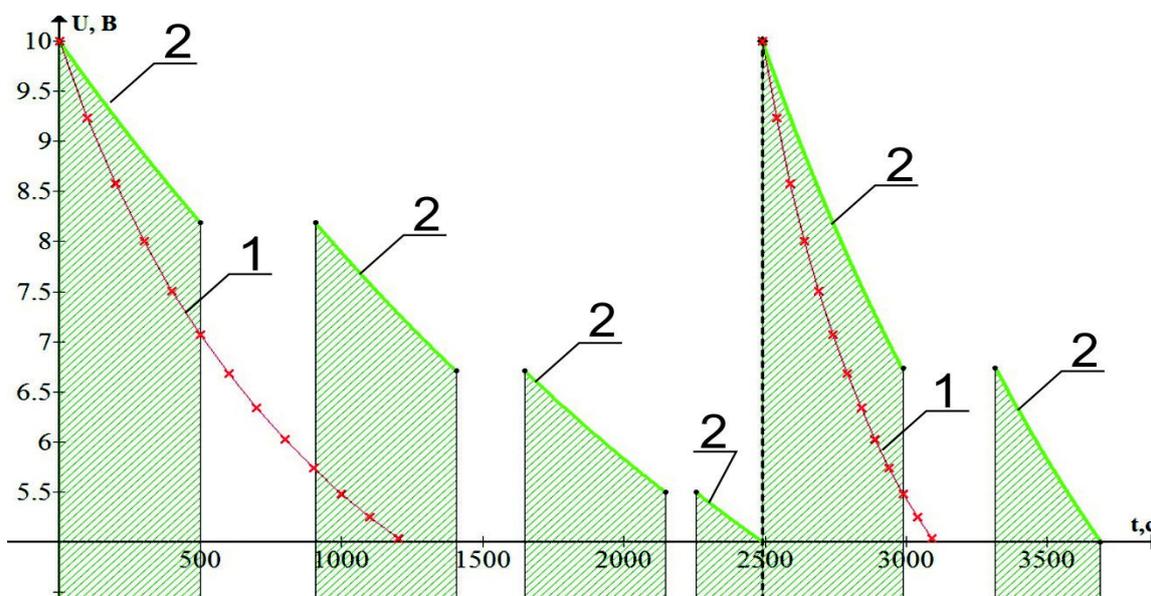


Рисунок 79. – Графики изменения напряжения у потребителей при разряде ионисторов с использованием параметрической стабилизации и динамической коммутации

Схема контактного аналога динамической коммутации внутри группы представлена на Рисунок 80а. Коммутация взаимного соединения ионисторов осуществляется ключами  $K1, K2, K3$  и  $K4$ , а регулирование напряжения у потребителя – ключом  $K4$ .

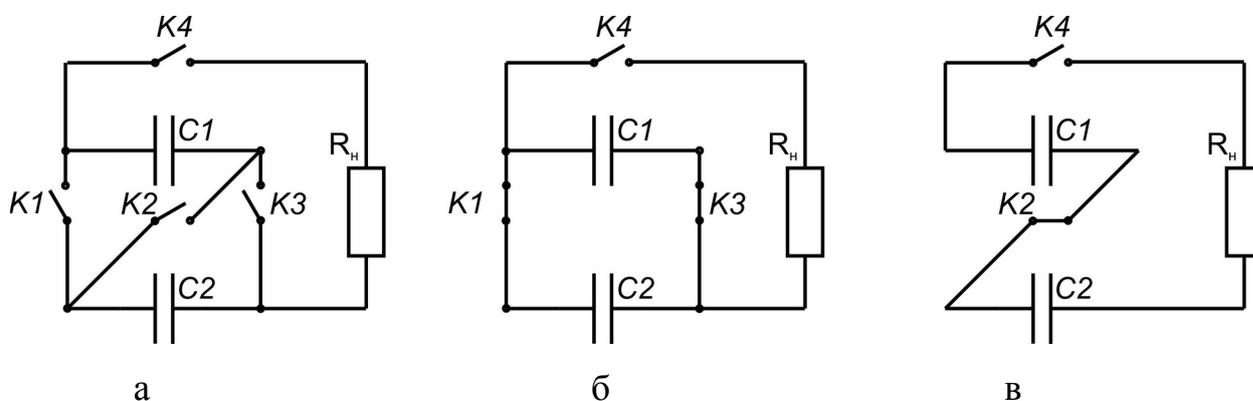


Рисунок 80. – Схема контактного аналога динамической коммутации ионисторов

Начало разряда ионисторов иллюстрируется Рисунок 80б. В этот момент ключи  $K1$  и  $K3$  замкнуты, а ключ  $K2$  – разомкнут, обеспечивая параллельное соединение ионисторов  $C1$  и  $C2$ . По мере разряда ионисторов ключи  $K1$  и  $K3$  должны быть разомкнуты, а ключ  $K2$  замкнут. Этой мерой достигается последовательное соединение ионисторов  $C1$  и  $C2$  и поддержание напряжения у потребителя. Периодическое замыкание и размыкание ключа  $K4$  приводит к намеренному снижению напряжения [126], [124]. В соответствии с расчетами продолжительность работы низкоэнергетического потребителя от группы ионисторов при манипулировании ключами  $K1, K2$  и  $K3$  увеличивается на 600 с, и ключом  $K4$  – на 1850 с.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что:

1. Объем полезно используемой энергии при разряде ионистора с ростом разности между начальным и конечным значениями напряжениями увеличивается. При двукратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат 50 % от энергии, заключенной в ионисторе, а при 20-кратном – 95 %.

2. Кривая снижения напряжения на ионисторе в процессе его разряда расположена между графиком разряда при постоянной нагрузке и прямой линией, представляющей собой касательную к этой кривой в начальной точке. При уменьшении длительности разряда кривая снижения напряжения приближается к касательной линии.

3. Разряд ионистора при параметрической стабилизации напряжения у потребителя происходит при следующих составляющих энергетического баланса:

- полной энергии, накопленной в заряженном ионисторе;
- энергии, переданной ионистором в цепь разряда;
- энергии, полезно используемой нагрузкой;
- энергии, утрачиваемой на стабилитроне;
- неиспользованная энергия.

4. Использование динамической коммутации ионисторов в процессе отбора энергии по сравнению с параметрической стабилизацией позволяет увеличить продолжительность работы низкоэнергетического потребителя в три раза.

## 5. Программная реализация определения оптимального местоположения реклоузера на воздушной линии 10 Кв (Семикин С.Д., Белов С.И., Цедяков А.А.)

Специфика системы электроснабжения (СЭС) сельских районов состоит в том, что они размещены на огромной территории, с общей длиной около 2,3 млн. км [127]. Статистика повреждений ВЛ 6–10 свидетельствует о 30 и более аварийных отключениях на 100 км в год. Примерно 70% всех нарушений электроснабжения сельскохозяйственных потребителей происходит в воздушных линиях 6-10 кВ [128]. Применение реклоузеров в электрических сетях 6-10 кВ зарекомендовало себя как более эффективный метод повышения надежности электроснабжения и технически, и экономически [128], [129].

При разработке и проектировании сельскохозяйственных электрических сетей в вопросах определения оптимального места расположения реклоузеров требуются сложные алгоритмы [127]. Для выбора места установки реклоузеров в электрической сети, необходимо определить назначение его установки, его варианта применения, а также выбрать критерий, по которому будет оцениваться уровень надежности электроснабжения [130].

Определить степень достижения цели функционирования системы электроснабжения, в частности обеспечения потребителей качественной и надежной электроэнергией с высокими технико-экономическими показателями, позволяют частные критерии оценки уровня надежности системы электроснабжения.

В набор частных критериев в общем случае следует включать не только показатели надежности [130]: количество ( $\omega$ ) и длительность ( $T$ ) отключений потребителя(-ей); время восстановления электроснабжения после отказа; суммарный годовой недоотпуск электрической энергии (ГНЭ); дисконтированные затраты на осуществления варианта, при резервировании

и секционировании линий [128], [129], но и критерии оценки качества электроэнергии [131], с учетом влияние на качество ЭЭ объектов малой энергетики [132]; оценки потерь и учета электроэнергии [23], включая энергоэффективность (снижение энергоемкости) производства сельскохозяйственной продукции [133].

Показатель ГНЭ  $\Delta W_{\text{НЭ}}$  рассчитываем по формуле [130]:

$$\Delta W_{\text{НЭ}} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T_0 \cdot (1 - k_y) \cdot k_{\text{вз}} \cdot (L_{\text{отв}} + L_{\text{маз}}) \cdot \sum_{i=1}^n P_{\text{Роме}i}; \quad (159)$$

$$P_p = S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi \cdot k_3; \quad (160)$$

где  $\Delta W_{\text{НЭ}}$  – ГНЭ, кВт·ч/год;  $\omega_0$  – удельная частота повреждений ВЛ 6-10 кВ, единиц на 100 км в год;  $T$  – средняя продолжительность восстановления одного устойчивого повреждения, ч;  $L$  – длина участка линии, км;  $P_p$  – активная расчетная мощность нагрузки, кВт;  $S_{\text{ном}}$  – полная номинальная мощность нагрузки, кВ·А;  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности;  $k_3$  – коэффициент загрузки;  $k_y$  – коэффициент учитывающий влияние децентрализованной системы секционирования на число аварийных отключений;  $k_{\text{вз}}$  – учитывающий влияние децентрализованной системы секционирования на общую продолжительность возобновления электроснабжения.

Значения коэффициента  $k_y$  следует принимать следующие [129], [130]:

-  $k_y = 0$  – без реклоузеров или там, где планируется их установка, а также если количество АПВ на реклоузерах равно количеству циклов АПВ на головном выключателе на центральной подстанции;

-  $k_y = 0,2$  – при наличии двухкратного АПВ реклоузера и однократного АПВ на головном выключателе (или его ручном включении);

-  $k_y = 0,25$  – при наличии трехкратного АПВ реклоузера.

Значение коэффициента  $k_{\text{в}}$  следует принимать 0,6.

Такие показатели как поток отказов  $\omega$  и продолжительность отключения  $T$  потребителя, являются критериями для адресного повышения надежности. Уменьшение данных показателей приводит к уменьшению

времени отключения потребителей, оказывающих влияние на недоотпуск электроэнергии.

Поток отказов рассчитывается по формуле [130]:

$$\omega = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_y) \cdot L; \quad (161)$$

где  $\omega$  – количество отключений потребителя в год, 1/год;  $L$  – длина участка линии, км;

Продолжительность отключений в год рассчитывается по удельной продолжительности отключений, полученных для сельских сетей:

$$T = \alpha \cdot L; \quad (162)$$

где  $\alpha$  – удельная годовая продолжительность отключений распределительных линий, ч/(год·км);  $L$  – длина участка линии, км;

Значение удельной годовой продолжительности отключений  $\alpha$  для ВЛ 10 (6) кВ принимается равным 0,9 [130].

Для технико-экономического обоснования повышения надежности необходим расчет затрат на осуществление варианта и ущерба, наносимого потребителям в результате недоотпуска электроэнергии из-за вероятных отказов элементов схемы. Затраты ( $Z$ ) рассчитываются по формуле [130]:

$$Z = KB \cdot E_n + P_p + P_{то}; \quad (163)$$

где  $KB$  – капитальные вложения, млн.руб;  $E_n$  – коэффициент нормы эффективности капитальных вложений (0,1);  $P_p$  – прочие расходы, руб;  $P_{то}$  – расход на техническое обслуживание, руб.

Прочие расходы находятся по формуле:

$$P_p = KB \cdot 0,01; \quad (164)$$

Расход на техническое обслуживание рассчитывается по формуле [130]:

$$P_{то} = KB \cdot \frac{r_0}{100}; \quad (165)$$

где  $r_0$  – годовая норма ремонта и ТО;  $r_0 = 2,9$  % - для

электрооборудования.

Ущерб ( $У$ ) рассчитывается по формуле [130]:

$$У = у_0 \cdot \sum W_H; \quad (166)$$

где  $у_0$  — удельный ущерб от недоотпуска 1 кВт · ч, [руб./ (кВт · ч)], оцениваемый замыкающими затратами на производство сельскохозяйственной продукции.

Анализ технико-экономических расчетов электрических сетей для установления экономически обоснованной величины удельных потерь показал, что этот коэффициент принимать равным 1,5—4 долл./кВтч, т. е. в ценах 2019 г. это будет 96—257 руб./кВт ч (данные являются усредненными и допускаются для оценки перерывов в электроснабжении потребителей) [127].

Критерий оценки качества напряжения у потребителей, определяется как [130]:

$$\sum H S_m = \sum_{t=1}^{T_c} \sum_{i=1}^k H_i S_{mit} \alpha^{t-1}; \quad (167)$$

$$\text{где } H = \frac{\int_t^{t+T} V(t)^2 P(t) dt}{\int_t^{t+T} P(t) dt};$$

где  $V(t)$  — отклонение напряжения у потребителей, зависящее от момента времени;  $P(t)$  — активная мощность в различные моменты времени  $t$ ;  $S_m$  - максимальная нагрузка головного участка линии напряжением 10 кВ, [(%)<sup>2</sup> кВ · А].

Ввиду недостатка исходной информации о графиках нагрузок потребителей допускается перейти к более простому выражению неодинаковости напряжения у потребителей, полученному на основе корреляционно-регрессионного анализа:

$$H = 16,5 + 0,077 \cdot \Delta U^2_{\% \max \text{ ВЛ10}}; \quad (168)$$

где  $\Delta U_{\max}^2_{\text{ВЛ10}}$  — максимальные потери напряжения в линии 10 кВ.

Для оценки частных критериев необходимо получить один комплексный критерий, т.е. свернуть частные критерии в единый оценочный функционал (F) и составить матрицу выбора решения (Таблица 31). Выбор решения характеризуется множеством стратегий  $\varphi$  ( $\varphi_1 \dots \varphi_n$ ) и состоянием среды  $\theta$  ( $\theta_1 \dots \theta_n$ ) (за состояние среды был принят коэффициент роста нагрузки ( $K_p$ )).

Свертка производится мультипликативным способом [130]:

$$F = \prod_{i=1}^n f_i^{\alpha_i} = 3_{\Delta} W_n \sum H S_m; \quad (169)$$

где  $n$  — число частных критериев;  $f_i$  — нормируемый  $i$ -й частный критерий оценки;  $\alpha_i$  — весовой коэффициент  $i$ -го частного критерия, учитывающий важность этого критерия в едином оценочном функционале;  $3_{\Delta}$  — затраты на осуществление варианта;  $W_n$  — частный критерий оценки надежности;  $\sum H S_m$  — показатель качества.

Таблица 31

### Матрица оценочного функционала при мультипликативной свертке для модели ВЛ 10 кВ

Состояние среды	Стратегия		
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
$\theta_1 = K_{p1}$	$\beta_{11}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$
$\theta_2 = K_{p2}$	$\beta_{21}$	$\beta_{22}$	$\beta_{23}$
$\theta_3 = K_{p3}$	$\beta_{31}$	$\beta_{32}$	$\beta_{33}$

Для более точного выбора решения, применяется критерий Байеса (Таблица 32). Расчет по критерию Байеса наиболее просто выполняется при заданных вероятностях состояний  $p_i$ , причем  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ , где  $n$  — число рассматриваемых состояний среды, т.е. в зависимости от матрицы критерию Байеса соответствует условие [130]:

$$B(p, \varphi_k) = \sum_{i=1}^n (p_i \cdot i F_{ik}) \rightarrow \max (\min) i; \quad (170)$$

где  $p_i$  – вероятность состояния среды;  $n$  – число всех рассматриваемых состояний природы;  $F_{ik}$  – оценочный функционал для  $k$ -й стратегии при  $i$ -ом состоянии среды,  $V(p, \varphi_k)$  – математическое ожидание оценочного функционала стратегии  $\varphi_k(X)$ .

Таблица 32

**Матрица оценочного функционала при мультипликативной свертке для модели ВЛ 10 кВ по критерию Байеса**

$p$	$\theta = K_p$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
0,5	1,1	$\beta_{11}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$
0,3	1,2	$\beta_{21}$	$\beta_{22}$	$\beta_{23}$
0,2	1,3	$\beta_{31}$	$\beta_{32}$	$\beta_{33}$

$V(\varphi_1)$	$X_1$
$V(\varphi_2)$	$X_2$
$V(\varphi_3)$	$X_3$

**Алгоритм работы программы расчета критериев надежности ВЛ 10 кВ**

Программа для расчета критериев надежности воздушной линии 10 кВ с последовательным секционированием, разрабатывалась в программной среде RAD Studio 11. В процессе создания были использованы основные компоненты: TButton, TEdit, TLabel, TDBGrid, TDBNavigator, TDBEdit, TADONConnection, TADONTable, DataModule, DBChart [130].

Интерфейс программы состоит из трех частей (Рисунок 81):

1. Исходные данные
2. Расчетная схема с полями для заполнения (рабочая область):
  - 2.1. Мощности  $S$ [кВА] (Желтые)
  - 2.2. Длины  $L$ [км] (Белые)
  - 2.3. «Чекбоксы» - маленькие квадраты, расположенные на магистрали, имитирующие реклоузеры. Есть два состояния «чекбокса» - «»

- реклоузер установлен и «□» - реклоузер отсутствует.

### 3. Результаты расчета (выводятся после нажатия кнопки расчет)

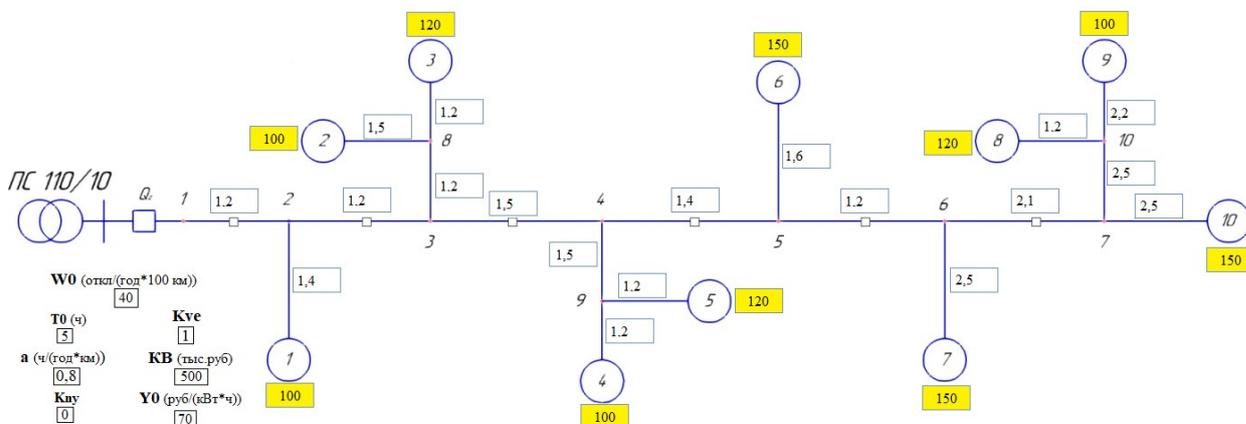


Рисунок 81. – Рабочая область со схемой и исходными данными

Стратегии для выбора решения зависят от выбора «чекбоксов», имитирующих установленный реклоузер. При заполнении полей программы, произведем расчет линии 10 кВ при трех разных стратегиях установки реклоузеров:

1. До установки реклоузеров
  2. Установка реклоузера №3 и №5
  3. Установка реклоузера №2 и №4
1. Произведем расчет линии до установки реклоузеров. Алгоритм работы программы следующий:

#### 1.1. Расчет суммарной мощности электрических нагрузок.

Суммарная мощность электрических нагрузок ( $S_r$ ) определяется методом суммирования электрических нагрузок с помощью добавок (к программе подключена таблица для суммирования нагрузок) по формуле [130]:

$$S_r = S_{max} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta S_i; \quad (171)$$

где  $S_r$  – суммарная мощность нагрузки на головном участке, кВА;  $S_{max}$  – наибольшая электрическая нагрузка из всех потребителей, кВА;  $\Delta S_i$  –

добавка к значению остальной электрической нагрузки, кВА.

### 1.2. Расчет потери напряжения.

Потеря напряжения ( $\Delta U_i$ ), рассчитывается по магистральному методу для каждого участка:

$$\Delta U_i = \frac{S_i \cdot (r_0 \cdot \cos\varphi + x_0 \cdot \sin\varphi) \cdot \sum L_n}{1000}; \quad (172)$$

где  $\Delta U_i$  – потеря напряжения на  $i$ -ом участке, %;  $S_i$  – мощность на участке магистрали линии, кВА;  $L_n$  – участок линии, км.

Далее потеря напряжения каждого участка суммируется, для нахождения потери напряжения на всей схеме:

$$\Delta U_{\%} = \sum_{i=1}^m \Delta U_i; \quad (173)$$

### 1.3. Расчет суммарного недоотпуска электроэнергии. СНЭ считается согласно формуле (168):

$$\Delta W_{НЭ} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_y) \cdot k_{вэ} \cdot (L_{отв} + L_{маг}) \cdot \sum_{i=1}^n P_{Ротви};$$

### 1.4. Расчет потока отказов. Поток отказов считается согласно формуле (170) для каждого участка:

$$\omega_i = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_y) \cdot L;$$

где  $\omega_i$  – поток отказов  $i$ -го участка магистрали, ограниченный реклоузером, откл/год.

### 1.5. Расчет продолжительности отключений в год. Продолжительность отключений в год считается согласно формуле (171) для каждого участка:

$$T = \alpha \cdot L;$$

где  $T_i$  – продолжительность отключений в год  $i$ -го участка магистрали, ограниченный реклоузером, ч.

### 1.6. Расчет неодинаковости напряжения у потребителя, согласно формуле

$$(177): H = 16,5 + 0,077 \cdot \Delta U_{\max ВЛ10}^2;$$

### 1.7. Затраты на осуществление варианта (3) считаются в следующей

последовательности:

Сперва, считаются прочие расходы, согласно формуле (173):  $\Pi_p = KB \cdot 0,01$ ;

Далее, рассчитывается расход на техническое обслуживание (174):

$$P_{mo} = KB \cdot \frac{r_0}{100};$$

В итоге, согласно формуле (172) считаются затраты (З):

$$З = KB \cdot E_n + \Pi_p + P_{то};$$

1.8. Расчет ущерба от недоотпуска (У). Согласно формуле (175):

$$У = y_0 \cdot \sum W_H;$$

1.9. Далее производится расчет мультипликативного оценочного функционала (F) по формуле (178) при трех коэффициентах нагрузки: 1,1; 1,2; 1,3:

$$F = \prod_{i=1}^n f_i^{\alpha_i} = 3_0 W_n \sum H S_m;$$

$$F_{i\phi} = K_{pi} F;$$

где  $F_{ij}$  – оценочный функционал при  $\phi$ -ой стратегии и  $K_{pi}$  нагрузке;  $K_{pi}$  – коэффициент нагрузки при разных состояниях среды ( $K_{p1} = 1,1$ ;  $K_{p2} = 1,2$ ;  $K_{p3} = 1,3$ )

1.10. Далее, для выбора решения применяется критерий Байеса, согласно формуле (179):

$$B(p, \phi_k) = \sum_{i=1}^n (p_i \cdot i F_{ik}) i;$$

Итог расчетов выводится в таблицу в окне «Результаты» (Рисунок 82):

Результаты

**S<sub>г</sub>** (кВ\*А) 940,00    **ΔU%** 11,05    **З** (тыс.руб) 69,5    **У** (млн.руб/год) 3,987    **ΔWHЭ** (кВт\*ч/год) 56 964,10

**Откл/год**    **Ч**

**ω1**    **T1**  
12,12    24,24

**ω2**    **T2**  
0    0

**ω3**    **T3**  
0    0

**ω4**    **T4**  
0    0

**ω5**    **T5**  
0    0

**ω6**    **T6**  
0    0

ρ	θ = Кρ	φ1	φ2	φ3
0.5	1.1	1,061		
0.3	1.2	1,157		
0.2	1.3	1,253		

<b>В (φ1)</b>	1,128
<b>В (φ2)</b>	0,000
<b>В (φ3)</b>	0,000

φ1     φ2     φ3

Очистить

Рисунок 82. – Результаты расчета воздушной линии 10 кВ до установки реклоузеров

Расчет линии при установке реклоузеров №3 и №5, произойдет аналогичным образом, но необходимо изменить коэффициенты  $k_y$  и  $k_{вз}$  – 0,2 и 0,6 соответственно.

Согласно алгоритму расчета, установленные «чекбоксы» разделяют схему на несколько частей. Таким образом, такие показатели надежности, как поток отказов и продолжительность отключений рассчитываются на каждой отдельной части схемы, т.е. вероятность отключения потребителей определяется вероятностью возникновения повреждения на каждом отдельном участке (Рисунок 83) [130].

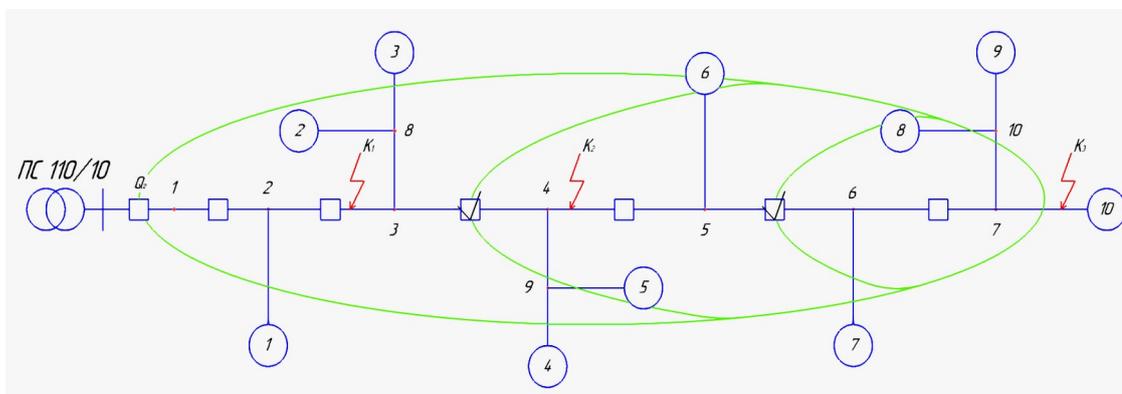


Рисунок 83. – Расчетная схема, разделенная на три участка реклоузерами

При последовательном секционировании линии с односторонним

питанием надежность потребителей отдельных участков не одинакова и уменьшается с увеличением расстояния секционированного участка, на котором находится потребитель, от центра питания.

Показатели надежности необходимо учитывать отдельно по каждому  $j$  - участку, а суммарный недоотпуск электрической энергии определяется как сумма недоотпусков при КЗ на разных участках линии. Результаты расчетов выведены в таблицу (а).

Расчет линии при установке реклоузеров №2 и №4 произойдет аналогичным образом. Результаты расчетов выведены в таблицу (б).

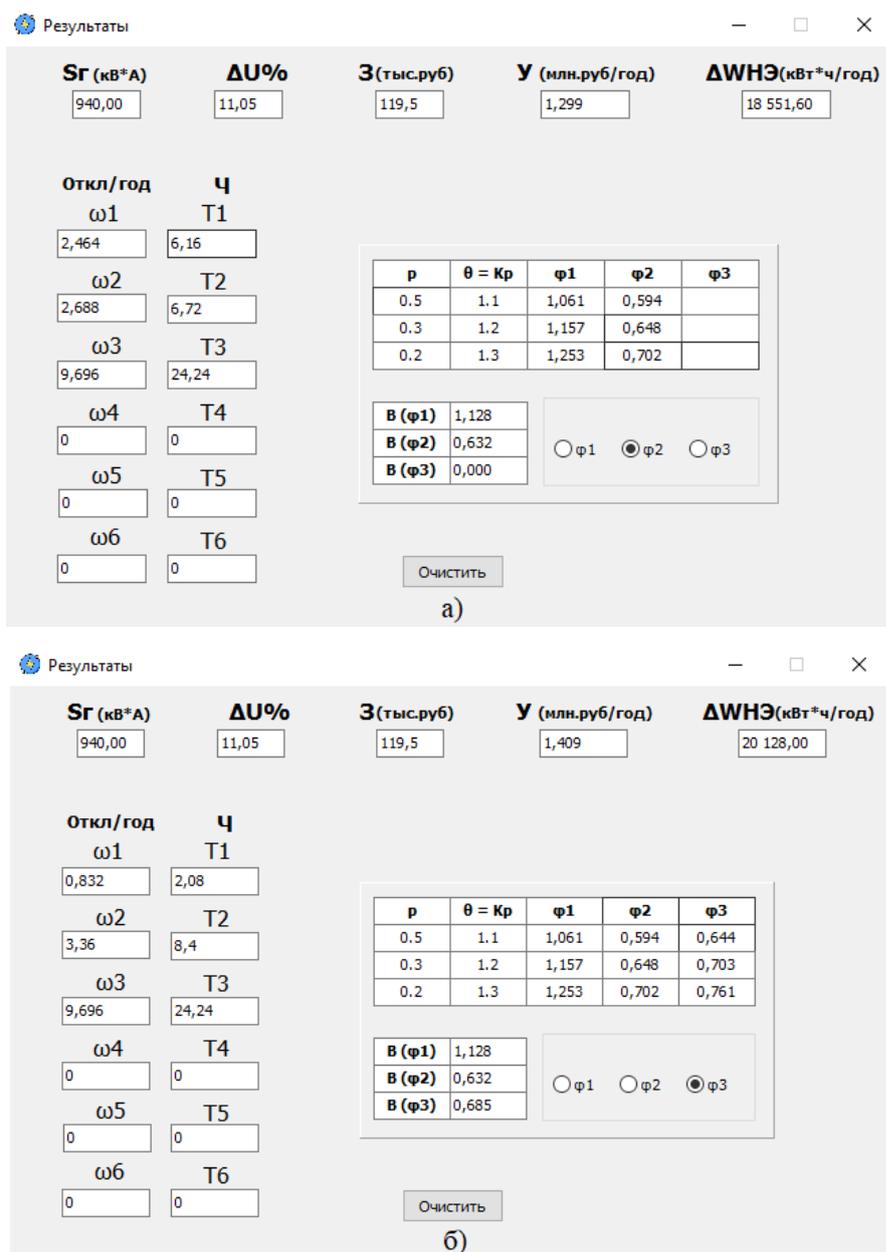


Рисунок 84. – Результаты расчета воздушной линии 10 кВ при включении «чекбоксов» №3 и №5

Результаты расчета частных критериев надежности ВЛ 10 кВ, показывали, что при установке реклоузеров № 3 и № 5 комплексный критерий оценки и критерий Байеса были минимальными. Следовательно, эта стратегия установки( $\varphi_2$ ) является лучшим решением для данной схемы с заданными исходными данными.

## **Оптимизация выпаса скота на основе применения солнечной энергии в электроизгородях (Кравченко В.Н., Филонов Р.Ф.)**

Проблемы энергоэффективности и энергосбережения являются одними из самых актуальных в последние десятилетия в сфере сельскохозяйственной деятельности.

Применение экологически чистых, относительно дешевых и возобновляемых источников энергии в настоящий момент являются перспективными, в частности, в качестве практически неисчерпаемой энергии является энергия солнца.

Объектом исследования и проведения опытов была выбрана животноводческая ферма с электрической изгородью для выгульного содержания животных с автономным источником электроэнергии, расположенным на территории фермы.

План проведения экспериментов заключался в следующем:

- Провести теоретический расчёт солнечной электростанции (солнечные панели, аккумуляторная батарея, инвертор);
- Разработка и создание конструкции для установки солнечных панелей и ее сборка;
- Собрать солнечную электростанцию на основе теоретических расчётов;
- Провести практические эксперименты для проверки надежности, автономности, корректности теоретических расчётов, на основе которых выбиралось оборудование и технические средства для солнечной электростанции.
- Приручение животных к выгульному содержанию при помощи электрической изгороди.

В соответствии с намеченным планом проведения работ, в задачи первого этапа был включен теоретический расчёт солнечной электростанции (солнечные панели, аккумуляторная батарея, инвертор) для того, чтобы

понимать какими параметрами должны обладать конструктивные элементы солнечной электростанции, чтобы покрыть все нужды на потребляемую электроэнергию.

Исходя из первого этапа в предлагаемых расчетах получилось следующее:

*Расчет мощности солнечных батарей.* При расчете солнечных батарей и панелей для конкретной фермы надо исходить из утреннего и вечернего показателей светового дня и интенсивности свечения солнца, энергетической потребности всех элементов фермы. Чтобы рассчитать какой мощности необходимы солнечные модули нужно сначала посчитать необходимую энергию для питания всех потребителей фермы в 1 кВт\*ч [134].

Требуемое количество энергии, нужное для питания всех потребителей фермы в 1 кВт.ч складывалась из телевизора, вентилятора, холодильника, освещения и электрической изгороди [135]:

$$E_n = E_m + E_v + E_x + E_o + E_{эи}, \text{ кВт*ч}; \quad (174)$$

где:  $E_n$  – требуемое количество энергии, нужное для питания всех потребителей дома за 1 кВт\*ч;

$E_m$  - количество энергии для питания телевизора;

$E_v$  - количество энергии для питания вентилятора;

$E_x$  - количество энергии, требуемое для питания холодильника;

$E_o$  - количество энергии, требуемое для питания освещения;

$E_{эи}$  - количество энергии, требуемое для питания электрической изгороди.

Следующий этап - это суточное количество энергии, необходимой для питания всех потребителей дома, общее потребление электроэнергии за 13 часов пиковой нагрузки равно:

$$E_n = E_n * t_{раб}, \text{ кВт*ч}; \quad (175)$$

где:  $E_n$  - суточное количество энергии, необходимой для питания всех потребителей фермы;

траб – время пикового потребления электроэнергии всех потребителей фермы.

Из расчетов следует что следует взять 6 солнечных батареи общей мощностью 900 Вт Подобранные солнечные батареи [136] за световой день вырабатывают:

$$P_{общ} = P_{сб} * t_{сд}, \text{ кВт} * \text{ч} \quad (176)$$

где:  $P_{общ}$  – общая мощность солнечной электростанции;

$P_{сб}$  – мощность солнечных батарей;

$t_{сд}$  – время светового дня (см. Таблица 33).

Но это идеальный расчет, в пасмурные дни выработка будет меньше, поэтому рекомендуется взять 70% от максимальной выработки, [137].

Располагая расчетными результатами формул 183...185 реально определить мощность солнечных батарей, количество АКБ и их емкость.

Также количество АКБ и их емкость должны быть такими, чтобы энергии, которая в них запасается хватило на темное время суток, стоит учесть, что ночью потребление электроэнергии минимально, по сравнению с дневной активностью.

Аккумулятор на 200А.ч. запасает примерно  $200\text{А} * 12\text{В} = 2200\text{Вт}$ . (холодильник на 250Вт+электропастух 6 Вт, проработает от такого АКБ 8,5часов). Так если за ночь (будем считать время отсутствия активности солнечного излучения 12 часов) потребляется 3.1кВт.ч. электричества, то необходимо установить 2 АКБ по 200А.ч. (12В).

Исходя из этого получаем, что 2 АКБ по 200А.ч. будут запасать 4,4 кВт.ч., что полностью покрывает расходы электроэнергии в темное время суток.

Так же важной частью солнечной электростанции является контроллер заряда – устройство, которое выполняет несколько функций одновременно и позволяет продлить срок службы аккумулятора. Во-первых, он автоматически контролирует заряд АКБ: регулирует подачу энергии от

солнечных панелей, чем предохраняет сам аккумулятор от полной разрядки, а при полном заряде отключает АКБ от системы. Во-вторых, контроллер защищает сами солнечные панели: отключает их при полной зарядке и включает на зарядку в момент, когда энергия начинает расходоваться. Контроллер также препятствует перетеканию обратных токов в пасмурную погоду и ночью. А еще помогает выбрать оптимальный режим зарядки, благодаря чему возрастает количество накапливаемой энергии и увеличивается срок службы аккумулятора.

При расчете инвертора необходимо учесть полную потребляемую мощность с учетом перезагрузки (до 120%) всех устройств при одновременной запитке в сеть. Поэтому нужно подобрать инвертор, у которого пиковая нагрузка будет в 2-3 раза выше суммарной нагрузки всех потребителей.

В нашем случае в списке приборов присутствуют устройства имеющие в своем составе двигатели: холодильник и вентилятор, речь безусловно может и должна вестись об инверторе, имеющем на выходе синусоидальную форму напряжения, а не меандровую.

Вторым этапом является разработка и создание конструкции для установки солнечных модулей. Начать все с того, что выбрать место для установки и подключения солнечной батареи. Во-первых, определиться с площадью – батареи могут быть громоздки и нужно, чтобы хватило места. Во-вторых, важна степень освещенности места установки, чем больше, тем лучше – в таком случае солнечная электростанция будет максимально эффективна. Хорошим выбором может быть крыша, стены, фасад дома, прилегающая к нему территория. Максимум отдачи солнечная панель дает, когда лучи света падают под углом  $90^\circ$ , (Рисунок 85).



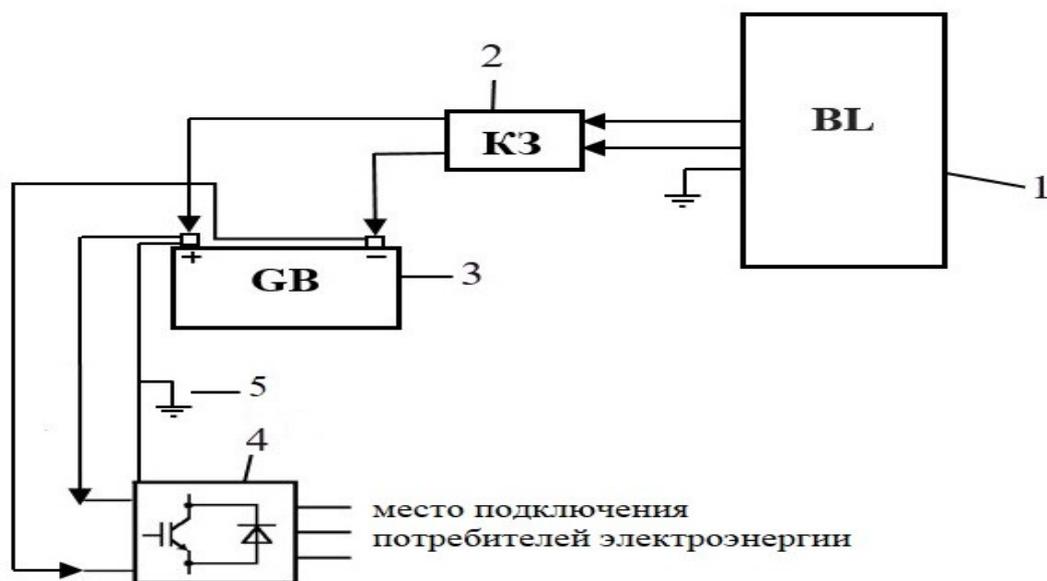
*Рисунок 85. – Узлы соединения каркаса для установки солнечных модулей*

В третьем этапе проведения экспериментов, происходит сборка солнечной электростанции.

Сборка солнечной электростанции происходит в следующем порядке:

1. Солнечные батареи крепятся на сконструированный во втором этапе каркас;
2. Затем солнечные батареи 6 шт. соединяются параллельно в 1 цепь и подключаются к контроллеру зарядки принцип действия, которого описан в 1 этапе;
3. Далее нужно подсоединить наши аккумуляторы к контроллеру зарядки
4. Следящим шагом нужно подсоединить аккумуляторы к инвертору для того что бы преобразовывать электроэнергию постоянного тока, которую вырабатывают солнечные панели в переменный электрический ток от которого работают все потребители фермы.

Принципиальная схема солнечной электростанции представлена на Рисунок 86.



*Рисунок 86.- Принципиальная электрическая схема солнечной электростанции: 1- Солнечные батареи для выработки электроэнергии; 2- Контролер зарядки для контроля заряда/разряда аккумуляторов; 3-Аккумуляторная батарея для накопления электроэнергии; 4-Инвертор для преобразования постоянного тока в переменный; 5-Заземление, для защиты человека от поражения электрическим током.*

Четвертый этап проведения эксперимента включал в себя проверку надежности и работоспособности солнечной электростанции и питающейся от нее электрической изгороди. Предварительно полностью заряженные аккумуляторы от солнечной электростанции общей мощностью 900 Вт и получали постоянную номинальную нагрузку в течении 13 часов с 9:00 до 21:00 каждый день на протяжении 3 месяцев. За 3 месяца постоянных нагрузок солнечная электростанция + данные аккумуляторы прекрасно себя показали и батареи не разу не разрядились в ноль.

Пятым этапом проведения эксперимента являлось приучение животных к выгульному содержанию в ограниченной территории.

Время приучения к электрической изгороди зависит от того какие именно животные будут пастись. Например, для того что бы корова или бык поняли, что приближаться к электрической изгороди не стоит, а тем более ее преодолевать требуется от 3 до 5 дней.

При сборке, снятия показаний, проведения опытов по проверке автономности были применены следующие технические средства:

- измеритель заземления МС-08;
- цифровой мультиметр.

В результате проведенной работы нами установлен оптимальный режим качественной работы электрической изгороди с следующими показателями мощности генератора импульсов тока: 2,00 Дж/0,35 А/ 8...9 кВ·с. Данный режим позволит как защищать, так и отпугивать животных от изгороди. Снижение этих показателей приводит неработоспособным результатам.

Опыт проводился в течении трех месяцев, его суть заключалась в том, чтобы аккумуляторы, заряженные от солнечной электростанции, обеспечивали электричеством все потребители. В результате были получены следующие данные:

*Таблица 33*

#### **Разряд аккумуляторных батарей**

<b>Месяц</b>	<b>Продолжительность светового времени</b>	<b>Остаток заряда аккумулятора, %</b>
<b>1</b>	420 ч. 15 мин	29
<b>2</b>	452 ч. 20 мин.	28
<b>3</b>	456 ч. 33 мин.	30

Сколько заряда оставалось в аккумуляторах было показано на контроллере заряда.

Пример проверки: общая емкость аккумулятора 400 А.ч. если за ночь по показанию контроллера заряда суммарная энергия, потребленная нагрузкой 280 А.ч. останется 120 А.ч. вычисляем в процентном соотношении и получается, что 120 А.ч. это 30% оставшегося заряда в аккумуляторе.

Основные расходы при внедрении в хозяйство данного предложения связаны с монтажными работами электроизгороди.

Достижение цели надежной изоляции животных коренным отличием от других отпугивающих средств, является условный болезненный раздражитель электроударом, привыкание к которому не наступает.

В результате работы электрической изгороди можно решить вопрос круглогодичного недорогостоящего выгульного содержания скота с применением солнечной электростанции, что позволяет в условиях отсутствия инженерных коммуникаций решить ряд задач, без которых эффективное выгульное содержание невозможно.

## Заключение

На состоявшемся 11 октября 2022 года научном форуме со скромным названием круглый стол «Развитие электроснабжения и применения электроэнергии в АПК» в непринужденной, деловой атмосфере был заслушан ряд докладов, посвящённых обсуждению вопросов повышения качества и надежности электроснабжения объектов агропромышленного комплекса, а также эффективного использования электроэнергии в сельскохозяйственных производственных процессах. В работе круглого стола приняли участие преподаватели, аспиранты и студенты Института механики и энергетики имени В.П.Горячкина.

В прозвучавших докладах были подведены итоги научно-исследовательских работ по ряду научных направлений. В выступлениях участников круглого стола были определены основные тренды исследований по генерации, передаче и использованию электрической энергии в сельскохозяйственном производстве. Рассмотрены современные взгляды на развитие электротехнологических процессов, даны характеристики применения электромагнитных воздействий на сельскохозяйственные материалы. Особое внимание было уделено совершенствованию применения энергии оптического спектра, а также вопросам ресурсо-энергосбережения в производственных процессах АПК.

В заслушанных докладах были широко освещены вопросы использования возобновляемых источников для автономного и комбинированного электроснабжения объектов АПК, обоснована возможность эффективного использования солнечного излучения для питания электропотребителей в условиях Центрального региона РФ. Большой интерес участники круглого стола проявили к электротехнологическим приемам решения экологических проблем промышленного птицеводства.

В частности, к исследованиям в области очистки и обеззараживания воздуха в птицеводческих помещениях. Оживленные дискуссии сопровождали обсуждение вопросов воздействия электрической энергии на растения. Много разнообразных вопросов прозвучало при рассмотрении способа динамической коммутации тиристоров при их использовании для аккумулирования электрической энергии в цепях питания слаботочных потребителей.

Обширный материал был представлен по исследованиям управления продуктивностью меристемных растений энергоэффективными световыми технологиями, по современной концепции сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией. Участники круглого стола оценили оригинальный взгляд на развитие сельскохозяйственной кибернетики, а также на использование интервального анализа при анализе и синтезе систем автоматического управления. Большой интерес вызвал доклад, посвященный развитию технологий использования электрической энергии в процессе хранения корнеплодов и динамического мониторинга их качества. Были отмечены очевидные успехи ученых института в области использования активированной воды в животноводстве, в направлении интеграции систем беспроводной передачи энергии в микросетях постоянного тока и по ряду других актуальных проблем.

В заключительной части круглого стола были подведены итоги состоявшегося мероприятия и отмечена его значимость в координации научно-исследовательских работ в вопросах электроснабжения и применения электроэнергии в АПК.

### Список литературы

1. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
2. Юферев, Л. Ю. Обеззараживание и обеспыливание воздуха в помещениях на основе электрофильтра / Л.Ю. Юферев, Д.М. Селезнева, Е.А. Овсянникова – Текст: непосредственный. // Сельский механизатор. 2020. № 4. С. 20-21.
3. Юферев, Л. Ю. Совершенствование процессов обеззараживания и обеспыливания воздушной среды сельскохозяйственных помещений на основе электрофилтрации воздуха / Л.Ю. Юферев, Д.М. Селезнева – Текст: непосредственный. // Международный технико-экономический журнал. 2019. № 5. – С. 42-48.
4. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды в птицеводстве / Сторчевой В.Ф.; диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2004. – 283 с.
5. Сторчевой, В.Ф. Совершенствование предынкубационной обработки куриных яиц / И.Ф. Бородин, В.Ф. Сторчевой // Техника в сельском хозяйстве. 2002. № 2. С. 32-33.
6. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды: монография [Текст] / В.Ф. Сторчевой. – М., 2003. – 169 с.
7. Кирпичников И.В. Разработка и исследование электростатического фильтра для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных малообъемных помещениях. Дисс.. канд. техн. наук. - Челябинск: ЧГАУ, 2000. - 137 с.
8. Попов Н.А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Н.А. Попов – Текст: непосредственный. // Прометей, 2015. – 48 с.

9. Ращепкин, В.А. Оценка влияния электрического ветра на эффективность улавливания дисперсных частиц в потоке дымовых газов в электростатических фильтрах. Теплофизические основы энергетических процессов. / В.А. Ращепкин, В.А. Вольчин– Текст. непосредственный. 2019. № 4. – С. 25-32.
10. Любанова, А. Ш. Моделирование потока заряженных частиц применительно к процессам газоочистки / А.Ш. Любанова, К.В. Митин – Текст: непосредственный. // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника И Технологии. 2011. Т. 4. № 6. – С. 542-652.
11. Бусройд, Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Бусройд, Пер. с англ. В. С. Данилина и Ф. Е. Спокойного ; Под ред. З. Р. Горбиса. - Москва : Мир, 1975. - 378 с..
12. Беспроводное устройство для контроля влажности почвы / Андреев С.А., Матвеев А.И., Судник Ю.А., Анашин Д.В. // Патент на полезную модель RU 189080 U1, 13.05.2019. Заявка № 2019103316 от 06.02.2019.
13. Андреев, С.А. Энергосберегающее управление влажностью воздуха на объектах АПК [Текст] / Андреев С.А., Судник Ю.А., Белоусова И.В. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2010. № 2 (41). С. 7-12.
14. Козлов, Б. А. Исследование «электрического ветра» в электродных системах с коронирующими острями / Б.А. Козлов, В.И. Соловьев – Текст: непосредственный. // Журнал Технической Физики. 2007. Т. 77. № 7. – С. 70-76.

15. Корн, Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн ; 6. изд., стер – СПб. [и др.]: Лань, 2003. – 831 с.
16. Алешкевич, В.А. Электромагнетизм: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки ВПО 011200 - Физика / В.А. Алешкевич. – М.: Физматлит, 2014, 404 с.
17. Василяк, Л. М. Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздушном потоке // Успехи Прикладной Физики. 2017. Т. 5. № 4. – С. 329-334.
18. Деревенко, К. В. Теоретические основы зарядки в электрическом поле коронного разряда лакокрасочных покрытий для пищевой промышленности / К.В. Деревенко – Текст: непосредственный. // Известия Высших Учебных Заведений. Пищевая Технология. 2008. № 5-6. (306-307). – С. 92-95. с.
19. Селезнева, Д. М. Исследования эффективности обеспыливания воздуха комбинированным электрофильтром / Д.М. Селезнева. Новосибирский государственный технический университет, 2020. – С. 61-64.
20. A Survey of Fuzzy Cognitive Maps Forecasting Methods / Al-Gunaid M.A., Shcherbakov M.V., Zadiran K.S., Melikov A.V. // В сборнике: 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, IISA 2017. 8. 2018. С. 1-6.
21. Виноградов А.В. Л.А.А..С.Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 2 (47). С. 31-41.

22. Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации. Монография. - Орёл: изд-во «Картуш», 2022. - 392 с.
23. Мамедов Т.А., Загинайлов В.И. Обобщенная оценка энергоэффективности централизованного электроснабжения и производства продукции // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019. № 3. С. 33–36.
24. Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 5. – С. 48-53.
25. Новый СИП кабель со встроенным оптоволокном | СВЯЗЬ ИНТЕГРАЦИЯ (atc-spb.ru). Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: [www.atc-spb.ru/sip-kabel-s-optovoloknom](http://www.atc-spb.ru/sip-kabel-s-optovoloknom) Дата обращения 31.08.2022г.
26. АРМ Диспетчера (software2b.ru) Электронный ресурс. Заголовок с экрана. Режим доступа: <http://www.software2b.ru/> (Дата обращения 12.08.2022г.).
27. Виноградов А.В., Мамедов Т.А., Загинайлов В.И., Виноградова А.В., Лансберг А.А., Седых И.А., Букреев А.В. Вариант структурной схемы вводно-учётно-распределительного устройства // Агротехника и энергообеспечение. – 2020. – № 3 (28). – С. 5–17.
28. Растимешин С.А., Расстригин В.Н., Лямцов А.К. Расчет необходимой энергетической освещенности, создаваемой инфракрасным излучателем в установке комбинированного обогрева ягнят // Электротермия. – 1983, № 11 (249).– С. 13–14.
29. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А. Метод определения и оценки тепловых условий в зонах обогрева и содержания молодняка животных // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 34-41.

30. Растимешин С.А. Обоснование параметров локальных электрообогревателей молодняка сельскохозяйственных животных. Дисс. ... доктора техн. наук. – М.: ВИЭСХ, 1995.
31. Кабдин, Н.Е. Характеристики надежности электрооборудования на основе предельных теорем теории вероятностей [Текст] / Н.Н. Сырых, Н.Е. Кабдин.
32. Отопительно-варочная печь / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Бессонов К.Е., Богаченков А.Г. // Патент на полезную модель RU 138737 U1, 20.03.2014. Заявка № 2013141054/03 от 06.09.2013.
33. Система автономного обогрева помещений / Андреев С.А., Судник Ю.А., Трушевский С.Н., Флегонтов Е.А. // Патент на полезную модель RU 140455 U1, 10.05.2014. Заявка № 2013147025/12 от 22.10.2013.
34. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды: монография [Текст] / В.Ф. Сторчевой. – Москва, 2003. – 169 с.
35. Загинайлов В.И. Параметры контроля и управления биообъектами // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005, № 1, С.20.
36. Активированные защитно-стимулирующие комплексы для обработки семян льна-долгунца / Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Прохоров И.С., Сторчевой В.Ф. // Научная жизнь. 2016. № 2. С. 75-83.
37. Андреев С.А., Загинайлов В.И. Энергоресурсосбережение в микроволновых установках сельскохозяйственного назначения. М.: ООО «Мегаполис», 2020. – 125 с.
38. Навроцкая Л.В., Загинайлов В.И., Навроцкая С.Р. Воздействие лазерного излучения на семена сельскохозяйственных культур // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве. 2018. №1, С.74.

39. Навроцкая Л.В., Загинайлов В.И., Соболев А.В. Изменение количества макро- и микроэлементов в семенах огурца после их обработки ВТОсовместно с переменным электрическим током // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П.Горячкина», 2008, № 4 (29), С.13-14.
40. Лисовская З. И., Володин В.Г. и др. Характер и особенности генетической изменчивости, индуцированной лазерным излучением // Тезисы докладов. Львов: Вольная Украина, 2014. – 177 с.
41. L V Navrotskaya<sup>1</sup>, A M Bashilov<sup>2</sup>, N A Sergeeva<sup>1</sup>, S R Navrotskaya<sup>3</sup> and A A Tsedyakov<sup>1</sup> 2022 Additive seed treatment. (EESTE 2021). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, tom 979 012030.
42. Лештаев, О.В. Устройство для стимуляции семян / Л.В. Навроцкая, О.В. Лештаев, С.Р. Навроцкая – М.; ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина, 2021. – С.30 –33.
43. Стушкина, Н.А. Способ стимуляции семян / Л.В. Навроцкая, Н.А. Стушкина, С.Р. Навроцкая – ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, – 2021.– С. 26 – 30.
44. Автоматизированные роботы в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]/ URL:<https://robroy.ru/avtonomnyij-fermerskij-robot-tom-unichtozhaet-sornyaki.html>; <https://www.smallrobotcompany.com/the-tom-robot>. <https://zen.yandex.ru/media/glavpahar/roboty--budusce-selskohoziaistvennogo-proizvodstva-5ecf8ac8158b4b051c06f870> (дата обращения: 26.09.2021).
45. Бородин И.Ф., Загинайлов В.И., Сергованцев В.Т. и др. Автоматика - этап индустриализации села. Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2008. № 1. С. 11 – 13.

46. Загинайлов В.И., Хорошенков В.К. Место и роль автоматизации в системе производства сельскохозяйственной продукции. В сборнике: Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение производства зерна. Сборник научных докладов международной научно-практической конференции. 2010. С.61-65.
47. Ляпин, В.Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью [Текст]/В.Г. Ляпин; Новосиб. гос. аграр. ун-т. - Новосибирск, 2000. – 106 с.
48. Загинайлов В.И. Электрофизические методы и средства контроля и управления сельскохозяйственными технологиями /Диссертация на соискание уч. ст. доктора техн. наук / МГАУ им. В.П. Горячкина. Москва, 1979. – 294 с.
49. Загинайлов, В.И. Исследование электрических свойств кормов и разработка устройства контроля влажности при их высокотемпературной сушке. /Диссертация на соискание уч. ст. кандидата техн. наук / МГАУ им. В.П. Горячкина. Москва, 2007. – 181 с.
50. Загинайлов, В.И. Электростимуляция и электрический пробой тканей биологических объектов [Текст] / В.И. Загинайлов // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2006, №1. – С. 25-27.
51. Загинайлов В.И., Овсянникова Е.А., Попов А.И. Оценка энергоэффективности работы энергоустановок и сельскохозяйственных технологий. Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии (см. в книгах). 2020. С. 23.
52. Загинайлов В.И., Ещин А.В., Попов А.И., Стушкина Н.А. Пути снижения энергоемкости производства сельскохозяйственной продукции. В сборнике: Доклады ТСХА. Материалы Международной научной конференции. 2017. С. 278-280.

53. Загинайлов В.И., Ещин А.В., Стушина Н.А. Анализ путей снижения энергоемкости сельскохозяйственной продукции. В сборнике: Доклады ТСХА. Сборник статей. 2016. С. 492-495.
54. Lyapin, V.G. Power supply system for electrical installations with electrical converters, grid, generator and solar sources [Electronic resource]/V.G. Lyapin, O.V. Leshtayev, A.E. Gafiev, E.V. Kolmurzina and N.A. Stushkina//III. International scientific and practical conference «Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection» (APES 2021) URL:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/808/1/012016>.
55. Анашин, Д.В. Оценка энергетических показателей роботизированных газонокосилок [Текст] / Д.В. Анашин, С.А. Андреев // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 5 (87). С. 63-69.
56. Бабенко, А.В. Автоматическое управление освещением / А.В. Бабенко, А.В. Гайдай, А.М. Захарчук // Наукові праці ВНТУ, 2013, № 1с.1 – 5..
57. Большая, Н.П. Облучательные установки с газоразрядными лампами в цветоводстве / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. - М.: МИИСП им. В.П. Горячкина. – 1985. – 169с..
58. Меристема. Режим доступа: <http://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/stati-rastenievodstvo/meristemnyi-kartofel.html>.
59. Юферев, Л.Ю. Разработка энерго-ресурсосберегающих систем освещения для с-х. объектов. / Л.Ю. Юферев // Инновации в сельском хозяйстве ГНУ ВИЭСХ. – 2012. - № 1. - с. 68 -73..
60. Кабдин, Н.Е. / Случайные числа: получение и применение при решении задач надежности электрооборудования [Текст] / Н.Н. Сырых, Н.Е. Кабдин // Вестник ВИЭСХ. 2014. № 3 (16). С. 38-51.

61. Занфирова, Л. В. Формирование технического мышления в процессе подготовки студентов агроинженерных вузов: специальность 13.00.08 «Теория и методика профессионального образования»: диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук /.
62. European best practices in quality assurance of agricultural programs / Horská E., Storcheyou V. et al. – analytical report / Nitra, Saint-Petersburg, 2015. Сер. Tempus PACAgro : Development of public accreditation of agricultural programs in Russia.
63. Устройство для дражирования семян / Андреев С.А., Судник Ю.А., Анашин Д.В., Балан А.В. // Патент на полезную модель RU 171156 U1, 23.05.2017. Заявка № 2016136861 от 14.09.2016.
64. Андреев С.А. , Загинайлов В.И., Тарушкин В.И. Электротехнологические приемы в процессе дражирования семян. Международный научный журнал. 2016, №4, – С.79.
65. Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Соболев А.В., Болотов Д.С., Самохвалов М.В. Моделирование электрофизических свойств растительных объектов – нагрузки электропитающих устройств и систем. Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018, №290, С.186.
66. Навроцкая Л.В. Экспериментальные исследования выхода хромосомных нарушений. Объединенный научный журнал. 2007, № 8, С.73.
67. Ляпин В.Г., Инкин А.И. Поглощение электромагнитной энергии в растительной ткани // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2002, № 11, С.6.

68. Загинайлов В.И., Андреев С.А. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве. Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 15-22.
69. Меликов, А.В. Анализ анкетных данных и получение оценки прогнозного решения к задаче управления [Текст] / Камаев В.А., Меликов А.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. № 15 (102). С. 90-96.
70. Меликов А.В. Разработка сайта в 2015 году: новые решения по управлению контентом / А.В. Меликов, А.С. Книжиченко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7-4 (18-4). С. 300-303.
71. Занфирова Л.В. Интенсификация процесса подготовки инженеров для агропромышленного комплекса [Текст] / Я. С. Чистова, Л. В. Занфирова, Т. П. Коваленок. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. – С. 492-498-е изд. Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса: Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 20 ноября 2020 года.
72. Иванов Ю.Г., Кирсанов В.В., Кравченко В.Н., Филонов Р.Ф. Доильные аппараты. М.: 2016.
73. Филонов Р.Ф., Кожевникова Н.Г., Кравченко В.Н. Патент РФ № 180325 U1 08.06.2018, Заявка № 2018105745 от 15.02.2018.
74. Сторчевой, В.Ф. Исследование параметров и режимов работы озонатора-ионизатора для молочных ферм [Текст] / В.Ф. Сторчевой, Н.Е. Кабдин, А.Е. Компаниец // Агроинженерия. 2020. № 3 (97). С. 50-54.

75. Сторчевой, В.Ф. Разработка и обоснование параметров многоярусной сверхвысококачественной установки для термообработки влажного сырья в непрерывном режиме [Текст] / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Б.Г. Зиганшин, Г.В. Новикова // Научная жизнь. 2017. №4. С.4-13.
76. Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Соболев А.В., Болотов Д.С., Самохвалов М.В. Моделирование электрофизических свойств свойств растительных объектов –нагрузки электропитающих устройств и систем. Доклад Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018, № 290, С. 186.
77. Kozukue N., M. Friedman. Tomatine, chlorophyll,  $\beta$ -carotene and lycopene content in tomatoes during growth and maturation. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003. – № 3 (83). – С. 195–200.
78. Sudnik Yu.A., Abdelhamid M.A. Investigation of the slow induction of chlorophyll fluorescence for the separation of tomato fruits according to their degree of maturity // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2020. - No. 3 (40). P. 109-114.
79. Sudnik Yu.A., Abdelhamid M.A. A method for determining the maturity of tomatoes based on the control of their chlorophyll fluorescence induction // Bulletin of the Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin. 2020. - No. 1(95). - P. 51-54.
80. Abdelhamid M.A., Y.A. Sudnik, H.J. Alshinayyin, F. Shaaban. Chlorophyll fluorescence for classification of tomato fruits by their maturity stage // E3S Web Conf. – 2020. – № 193, 01065.
81. Budagovskaya O.N., A.V. Budagovsky, D.V. Akishin, A.V. Sutormina, V.A. Gudkovsky. Optical method of non-destructive quantitative assessment of the degree of maturity of tomatoes // Pat. 2582957 Russian Federation, applicant and patent holder FGBOU VO «MGAU», 2016.

82. Першакова Т.В. Способы обеспечения устойчивости растительного сырья в процессе хранения / Т.В. Першакова, Г.А. Купин, В.Н. Алёшин. В сборнике: Инновационные технологии в промышленности - основа повышения качества, конкурентоспособности и безопасности потребительских товаров, материалы III Международной (заочной) научно-практической конференции. 2016. С. 320-326.
83. Овсянникова Е.А., Загинайлов В.И., Мамедов Т.А. Определение электропотребления приемников и потребителей электрической энергии / Сборник статей научно-практической конференции, посвященной памяти академика РАСХН, д.т.н., профессора И.Ф.Бородина (90 лет со дня рождения) – 2019. С.274-284.
84. Янченко Е.В. Сохраняемость современных сортов и гибридов моркови столовой и ее зависимость от биохимического состава // Картофель и овощи. 2020. № 10. С. 16-19.
85. Анашин, Д.В. Использование универсального робота в фермерских хозяйствах [Текст] / Анашин Д.В. // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 17-18.
86. Азизов, Р.А. Электрификация камеры с регулируемой газовой средой во фруктохранилище для хранения яблок / Азизов Р.А., Чистова Я.С. // Наука без границ. 2019. № 6 (34). С. 110-113.
87. Методика биоэнергетической оценки эффективности технологий в орошаемом земледелии. М.: ВАСХНИЛ, 1989. -80 с.
88. Прищеп Л.Г., Базаров Е.И., Сучугов С.В. Энергетическая окупаемость орошаемого земледелия. М.: Мелиорация и водное хозяйство, 1989. №1.С. 7-10.

89. Сторчевой В.Ф., Сучугов С.В., Компаниец А.Е. Создание озонно-ионной воздушной среды в закрытых помещениях для содержания животных и птицы. Вестник РГАУ-МСХА «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина», 2019. №3(91).С. 35-39.
90. Сторчевой В.Ф., Сучугов С.В., Уманский П.М. Электрооборудование транспортно-технологических средств и систем: учебное пособие. - М.: МЭСХ, 2017. - 119 с.
91. Кирсанов В.В., Кравченко В.Н. Энергосберегающая пастеризационно – охладительная установка на тремозлектрических модулях. / Вестник ФГБОУ ВПО МГАУ имени В.П.Горячкина, 2010, №1(41), С.12-14.
92. Юденич, Л.М. Светотехника и электротехнология/ Л.М. Юденич Учебное пособие/ – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2021. – 104 с.
93. Баранов, Л.Г. Светотехника и электротехнология/ Л.Г. Баранов, В.А. Захаров/М.- Колос-С, 2008. -344 с.
94. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды: монография [Текст] / Сторчевой В.Ф. – М., 2003.–118 с.
95. Меликов А.В. Обработка и анализ экспертной информации для управления социально-экономическими системами: автореферат дисс....кандидата технических наук / Астраханский государственный технический университет.– Астрахань, 2013. – 16 с.
96. Чистова, Е. Передавать с умом / Е. Чистова // Атомный эксперт. – № 7. – 2018. Текст: электронный. – Режим доступа: [https://atomicexpert.com/power\\_industry\\_digitalization\\_072018?ysclid=16ezi3ubaj410356362](https://atomicexpert.com/power_industry_digitalization_072018?ysclid=16ezi3ubaj410356362) (дата обращения: 21.07.2022 г.).

97. Виноградов, А.В. Системы интеллектуализации распределительных электрических сетей [Текст] / А.В. Виноградов, В.Е. Большев, А.В. Виноградова // В сборнике «Информационные технологии, системы и приборы в АПК». – Новосибирск, 2018. – С. 443-447.
98. Виноградов, А.В. Концепция построения интеллектуальных электрических сетей на базе применения мультиконтактных коммутационных систем [Текст] / А.В. Виноградов // В сборнике «Актуальные вопросы энергетики в АПК». – 2019. – С. 108-114.
99. Большев В.Е. Обзор зарубежных источников по применению информационных сетей в инфраструктуре интеллектуальных сетей smart grid [Текст] / В.Е. Большев, А.В. Виноградов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2019. – № 1 (55). – С. 8-18.
100. Ткачѳв, А. Беспроводная передача энергии через магнитно-связанные индуктивные катушки / А. Ткачѳв // Хабр. – 2017. Текст: электронный. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/407819/?ysclid=16nni2sfg0314988840> (дата обращения 02.08.2022 г.).
101. Сухов А.А. Модернизация систем электроснабжения сельских потребителей путем внедрения технологий smartgrid / А.А. Сухов, Н.А. Стушкина // В сборнике «Методы механики в решении инженерных задач». – 2018.–156-160.
102. Занфирова, Л.В. Возможности формирования технического мышления у будущих инженеров [Текст] / Л.В. Занфирова, Е.Е. Лысенко // Доклады ТСХА, Москва, 06–08 декабря 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2019.
103. Жолен, Л. Прикладной интервальный анализ [Электронный ресурс] / Л. Жолен, М. Кифер, О. Дидри, Э. Вальтер. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16600>.

104. Смирнова, Е.Н. Элементы интервального анализа / Е.Н. Смирнова, Н.В. Максименко; Оренбургский государственный университет. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 62 с.
105. Иванов Ю. Г., Загинайлов В.И., Понизовкин Д.А. Автоматизированная система управления электроприводом местной вентиляции коровника с управляемым вектором потока воздуха. Вестник ВИЭСХ. 2016. № 4(25). С. 34-40.
106. Варфоломеев С.Д., Шевалевский О.И. Возобновляемая энергия: Фотоэлектричество и биотоплива – реалии сегодняшнего дня. // Возобновляемые источники энергии. Курс лекций. Учебное пособие. – М.: МИРОС, 2010. – С. 57 – 64.
107. Сухов А.А., Стушкина Н.А. Модернизация систем электроснабжения сельских потребителей путем внедрения распределенной генерации. Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 5 (87). С. 69-74.
108. Большев В.Е., Виноградов А.В. Обзор зарубежных источников по применению информационных сетей в инфраструктуре интеллектуальных сетей Smart grid. Вести ВУЗов Черноземья. 2019. № 1 (55). С. 8-18.
109. Сухов А.А., Стушкина Н.А. Модернизация систем электроснабжения сельских потребителей путем внедрения технологий Smart grid. В сборнике: Методы механики в решении инженерных задач. Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией С.Ф. Сухановой, 2018. 156-160 с.
110. Загинайлов В.И., Лештаев О.В., Мамедов Т.А., Самсонов А.А. Опыт эксплуатации солнечной электростанции в Московской области. В сборнике: Доклады ТСХА. Материалы международной НК. 2018. С. 181-183.

111. Belov S.I., Tsedyakov A.A., Galkin M.M. Analysis of a computer model of a power supply system for agricultural consumers in a single-phase ground fault mode. International Scientific and Practical Conference «Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science», 2021.
112. Соболев А.В., Ляпин В.Г., Стушкина Н.А. Исследование переходных процессов в трехфазных цепях на основе компьютерного моделирования. В сборнике: ДОКЛАДЫ ТСХА. Материалы международной научной конференции. 2018. С. 196-197.
113. О.А. Пасько «Активированная вода и её применение в сельском хозяйстве». Издательство ТПУ, Томск 2000г., с 132.
114. Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. Моделирование рациональных режимов электроактиватора для обработки грубых кормов./Агроинженерия. 2022, т.24, №3, С.80-86.
115. Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Загинайлов В.И., Гуров Д.А. Определение основных параметров работы электроактиватора для обработки грубых кормов. / Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 2020, С.563-568.
116. The Water electric activation method with a part of energy concentrated in its flow/ Iosifov V.P., Melikov A.V., Matveev A.I., Shchukina V.N.//IOP Conference Series: Earth and environmental science.– vol.1069–012004.-Pp.1-5.
117. Андреев С.А., Загинайлов В.И., Шибаров Д.В. Аккумуляция энергии в маломощных гелиосистемах автономного электроснабжения. Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина» 2017. № 5 (81). С. 70-76.

118. Ливинский А.П., Редько И.Я., Загинайлов В.И. Многофункциональный электротехнологический комплекс для сельскохозяйственных систем малой энергетики. Труды МНТК Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2010. Т. 1. С. 145-148.
119. Andreev S., Zaginaylov V., Matveev A. Energy-saving irrigation management. В сборнике: MATEC Web of Conferences. Сер. «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2018» 2018. С. 06014.
120. Морачевский А.Г. Отработанные свинцово-кислотные аккумуляторы – важнейший источник вторичного свинца // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 4 (207). – С. 127-137.
121. РД 34.50.502-91 Инструкция по эксплуатации стационарных свинцово-кислотных батарей.
122. Галушко А.И., Гром Ю.И., Лазарев А.Н., Салихов Р.С. Исследование свойств ионисторов и эффективность их применения в системах электропитания космических аппаратов. Вопросы электромеханики. Т.133, 2014, – С.15...18.
123. Меликов, А.В. Принципы проектирования устройств тестового диагностирования быстродействующих микросхем и модулей полупроводниковой памяти [Текст] / Евдокимов А.П., Рябцев В.Г..
124. Меликов, А.В. Применение теории множеств для организации данных исходной реляционной базы данных [Текст] / Меликов А.В. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2011. № 4 (16). С. 16-22.

125. Shcherbakov M.V., Zadiran K.S., Melikov A.V. // В сборнике: 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, IISA 2017. 8. 5. A Survey of Fuzzy Cognitive Maps Forecasting Methods / Al-Gunaid M.A., 2018. С. 1-6/.
126. Microwave diodes with contact metallization systems based on suicides, nitrides and borides of refractory metals Boltovets N.S., Basanets V.V., Ivanov V.N., Krivutsa V.A., Belyaev A.E., Lyapin V.G. and others. Mitin V.F. Semiconductor Physics, Quantum Elec.
127. Виноградова А.В. Статистическая характеристика сельских электрических сетей. // Агротехника и энергообеспечение, №1(1), 2014.- с. 419-423.
128. СТО 34.01-2.2-033-2017 ПАО «Россети» Линейное коммутационное оборудование 6-35 кВ – секционирующие пункты (реклоузеры) Том 1.2 «Секционирующие пункты (реклоузеры)» – М.: 2017. – 22 с.
129. Меликов, А.В. Реклоузер – гарант надежности электроснабжения / А.В. Меликов, Д.Д. Нехорошев, И.И. Сысоев // В сборнике: Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК. Материалы национальной НПК Воронежского ГАУ им. императора Петра.
130. Лещинская Т.Б., Белов С.И. Определение показателей надежности электроснабжения сельскохозяйственного производства. – М.: Агроконсалт, 2004. – 152 с.
131. Виноградов А.В., Бородин М.В., Большев В. Способ управления качеством электрической энергии. Техника в сельском хозяйстве. 2014. № 4. С. 30-31.
132. Leshtayev O.V., Stushkina N.A., Zaginaylov V.I. Analysis of energy quality in power supply systems with grid-connected solar power plants. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 3, Mining, Production, Transmission, Processing.

133. Загинайлов В.И., Ещин А.В., Стушкина Н.А. Снижение энергоемкости производства продукции. Сельский механизатор. 2016. № 2. С. 27-28.
134. Кашкаров А.П. Оригинальные конструкции источников питания. Радиоэлектроника для всех. М., 2013.
135. Иванов, Ю.Г. Механизация и автоматизация животноводства. Курсовое проектирование. Ю.Г. Иванов, В.И. Стяжкин, Е.В. Машошина. – М.: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2018. – 266 с..
136. Пат. на полезную модель 187419 Пастбищная электроизгородь / В.Н. Кравченко, Р.Ф. Филонов, Э.М. Даутоков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. –Бюл. № 7, 2019.
137. Анализ использования мобильной электрической изгороди для защиты животных и пастбищ в сельском хозяйстве/ Кравченко В.Н., Кабдин Н.Е., Даутоков Э.М./ Вестник ВНИИМЖ №2 (30) /2018. С. 119 – 123.
138. Adaptation of the recommendations of the international committee for animal recording (ICAR) in evaluating the quality of milk / Trukhachev V. I., Oleynik S. A., Zlydnev N. Z., Morozov V. Y. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6 (6). P. 1317-1320.
139. Меликов А.В. // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 2. С. 23-30.

140. Овсянникова Е.А., Загинайлов В.И., Мамедов Т.А. Определение электропотребления приемников и потребителей электрической энергии. В сборнике: Передовые достижения в применении автоматизации, роботизации и электротехнологий в АПК. Сборник статей научно-практ.
141. Характеристика некоторых генетико-популяционных параметров коров айрширской породы / Злыднев Н. З., Трухачев В. И., Антоненко Т. И., Злыднева Р. М. // Актуальные вопросы зоотехнической науки и практики как основа улучшения продуктивных качеств и здоровья сельскохозяйственных животных: II Международная научно-практическая конференция. 2003. С. 153-155.
142. Мамедов Т.А., Загинайлов В.И. Обобщенная оценка энергоэффективности централизованного электроснабжения и производства продукции. Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 33-36.
143. Анашин, Д.В. Оценка энергетических показателей роботизированных газонокосилок [Текст] / Д.В. Анашин, С.А. Андреев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 5 (87). С. 63-69.
144. Меликов, А.В. Разработка сайта в 2015 году: новые решения по управлению контентом / А.В. Меликов, А.С. Книжиченко А.С. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7-4 (18-4). С. 300-303.

145. Кабдин, Н.Е. Характеристики надежности электрооборудования на основе предельных теорем теории вероятностей [Текст] / Н.Н. Сырых, Н.Е. Кабдин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 1 (57). С. 7-12.
146. Applications symbiotic complex to correct the physiological state of the piglets / Trukhachev V. I., Rastovarov E. I., Filenko V. F., Skripkin V. S. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7 (1). P. 1616-1620
147. Сторчевой В.Ф.Ионизация и озонирование воздушной среды в птицеводстве. / Автореферат дисс ...доктора технических наук, Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина, М.: 2004.
148. Сторчевой, В.Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды/ В.Ф. Сторчевой /Монография / М.- 2003.
149. Анашин, Д.В. Использование универсального робота в фермерских хозяйствах [Текст] / Анашин Д.В. // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 17-18.
150. Андреев, С.А. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве [Текст] / Загинайлов В.И., Андреев С.А. Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 15-22.
151. Загинайлов А.И. Параметры контроля и управления биообъектами // Механизация и электрификация сельского хозяйства.: 2005, №1. – С.20.

152. Загинайлов В.И., Андреев С.А. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве. Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 15-22.
153. Трухачев В. И., Тарасенко Н. В. Мониторинг социально-трудовой сферы села на Ставрополье // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2006. № 4. С. 51-53.
154. Андреев С.А., Загинайлов В.И. Энергоресурсосбережение в микроволновых установках сельскохозяйственного назначения. М.: ООО «Мегаполис», 2020 – 125 с..
155. Занфирова Л.В. Формирование технического мышления в процессе подготовки студентов агроинженерных вузов: специальность 13.00.08 «Теория и методика профессионального образования»: диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук. / Занфирова Лариса Вячеславовна. – Москва, 2008. – 210 с.
156. Applications symbiotic complex to correct the physiological state of the piglets / Trukhachev V. I., Rastovarov E. I., Filenko V. F., Skripkin V. S. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7 (1). P. 1616-1620
157. Кондратьева, Н.П. Повышение эффективности электрооблучательных установок в защищенном грунте. // Дисс. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук / М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2003 г.- 251с.  
Загинайлов В.И. Х.В.К. Место и роль автоматизации в системе производства сельскохозяйственной продукции. В сборнике: Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение производства зерна. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. 2010.

158. Навроцкая Л.В., Загинайлов В.И., Соболев А.В. Изменение количества макро- и микроэлементов в семенах огурца после их обработки ВТО совместно с переменным электрическим током. // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2008. – № 4 (29). – С. 13–14.
159. Comparative assessment of concentrates from different manufacturers for poultry egg crosses / Trukhachev V. I., Zlydnev N. Z., Epimakhova E. E., Oleynik S. A., Samokish N. V. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7 (1). С. 1272-1276
160. Навроцкая Л.В., Загинайлов В.И., Навроцкая С.Р. Воздействие лазерного излучения на семена сельскохозяйств. культур. // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве. – 2018. – № 1. – С. 74.
161. Андреев С.А., Загинайлов В.И. Энергоресурсосбережение в микроволновых установках сельскохозяйственного назначения. М.: ООО «Мегаполис». 2020. – 125с.
162. Trukhachev V. I., Zlydnev N. Z., Sycheva O. V. Formation of quality of dairy products on the example of a family business Kaasboerderij Weenink Netherlands // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7(1). P. 1125-1129
163. Сторчевой, В.Ф. Совершенствование предынкубационной обработки куриных яиц / И.Ф. Бородин, В.Ф. Сторчевой // Техника в сельском хозяйстве. 2002. № 2. С. 32-33.
164. Система автономного обогрева помещений / Андреев С.А., Судник Ю.А., Трушевский С.Н., Флегонтов Е.А. // Патент на полезную модель RU 140455 U1, 10.05.2014. Заявка № 2013147025/12 от 22.10.2013.

165. Отопительно-варочная печь / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Бессонов К.Е., Богаченков А.Г. // Патент на полезную модель RU 138737 U1, 20.03.2014. Заявка № 2013141054/03 от 06.09.2013.
166. Specialist Bibliographic Databases / Gasparyan A. Y., Yessirkerov M., Voronov A. A., Trukhachev V. I., Kostuykova E. I., Gerasimov A. N., Kitas G. D. // Journal of Korean Medical Science. 2016. Vol. 31(5), с. 660-673
167. Растишин С.А. Обоснование параметров локальных электрообогревателей молодняка сельскохозяйственных животных. Дисс. ... доктора техн. наук. – М.: ВИЭСХ, 1995.
- Иванов, Ю. Г. Автоматизированная система управления электроприводом местной вентиляции коровника с управляемым вектором потока воздуха / Ю. Г. Иванов, В. И. Загинайлов, Д. А. Позинкин // Вестник ВИЭСХ. – 2016. – № 4(25). – С. 34-40. – EDN ХТВОУХ.
168. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. – М., 1987. – 280 с..
169. Беспроводное устройство для контроля влажности почвы / Андреев С.А., Матвеев А.И., Судник Ю.А., Анашин Д.В. // Патент на полезную модель RU 189080 U1, 13.05.2019. Заявка № 2019103316 от 06.02.2019.

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АПК**

Коллективная монография

Издательство РГАУ – МСХА  
127550 Москва, Тимирязевская ул. д. 44