

На правах рукописи



Зайцева Наталья Михайловна

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Кемерово – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и Инновационном Евразийском университете (г. Павлодар, Казахстан)

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Официальные оппоненты

Глазырин Александр Савельевич доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор

Рыжкова Елена Николаевна доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий», профессор

Федоров Владимир Кузьмич доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра «Электроснабжения промышленных предприятий», профессор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита состоится 06 октября 2022 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел./факс: (384-2) 68-23-23, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/zai/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Непша Федор Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Требование повышения эффективности функционирования любого объекта взаимосвязанной технико-экономической системы продиктовано законами современной экономики, в связи с этим Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ закрепил законодательно перевод режима экономического функционирования всех промышленных предприятий в русло повышения энергоэффективности и ресурсосбережения. В частности, в связи с возрастанием цен на энергоносители и ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе снижения электропотребления электротехническими комплексами, приобрела особую актуальность. Для удовлетворения этих требований на предприятиях с энергоемкими непрерывными инерционными замкнутыми производствами, к которым относятся гидрохимические производства, необходимо решить ряд сложных задач, значимость которых возросла в связи со сменой парадигмы и переходу к конкурентным отношениям в экономике.

Актуальность проблемы «выживания» рассматриваемых технико-экономических систем предьявляет к управленческим решениям высокие требования, учитывающие текущее состояние экономики, методы и средства регулирования для всех звеньев иерархии управления предприятием, включающих планирование, технологический процесс, эффективность и безопасность эксплуатации оборудования и т.д., позволяющих выбрать наилучший вариант решения, что невозможно без применения моделирования, а сложность поставленных задач требует разработки качественно новых моделей, то есть развития теории моделирования.

Решением задач построения моделей электропотребления занимались И.И.Алиев, Б.И.Кудрин, В.М. Ефременко, однако предлагаемые ими модели, основанные на статистике и даже с применением методов искусственного интеллекта (нейронных сетей), не позволяют построить долговременного прогноза электропотребления для рассматриваемого класса энергоемких производств, обладающих свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости. Эти особенности рассматриваемого класса производств полностью перечеркивают возможность использования статистики при изменении технологических режимов, так как известные модели прогнозирования энергопотребления, основанные на статистике и хорошо работающие для линейных дискретных производств, малопригодны для ряда предприятий цветной металлургии и химической промышленности из-за отсутствия прямой пропорциональности между электропотреблением и объемом производимой продукции. А в виду того, что рассматриваемый тип производства является энергоемким, любое изменение его технологического режима может повлечь за собой серьезные последствия как для самого предприятия, так и для энергосистемы, в которой это производство функционирует.

Построением моделей, способствующих обеспечению эффективной и безопасной эксплуатации электротехнических комплексов на основе устройств

заземлений, занимались М.А. Авербух, В.В. Бургсдорф, П.А. Долин, однако инструментария, охватывающего расчет основного параметра заземлений, удельного электрического сопротивления грунта, в конкретной местности с учетом климатических факторов, разработано не было. Дело в том, что удельное электрическое сопротивление грунта ρ , на основе которого ведется расчет устройств заземления энергоустановок, напряжения прикосновения и шага, меняется в широких пределах в зависимости от вида грунта, его температуры t и влажности v , которые в свою очередь могут изменяться в значительных пределах. Известные формулы и рекомендуемые ПУЭ сезонные коэффициенты, по которым можно определить ρ , дают лишь приблизительную картину его изменения от вышеперечисленных параметров. Поэтому заземления проектировались с большим запасом, а расчеты напряжения прикосновения и шага в ряде случаев имели очень большие погрешности. Решение этой проблемы для данного класса энергоемких производств в момент активного снеготаяния или в случае техногенных аварий позволит избежать тяжелых поражений электрическим током работающего там персонала.

Степень разработанности. Возможность создания моделей энергопотребления предприятий была подготовлена результатами научных работ: Московского энергетического института, Энергетического института Томского политехнического университета, Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Новосибирского государственного технического университета, Института систем энергетики им. Л.А.Мелентьева (СО РАН, г. Иркутск), Всероссийского алюминиево-магниевого института, Гомельского государственного технического университета им. П.О.Сухого и др.

Большой вклад в разработку методик и моделей расчетов для электротехнического комплекса электрооборудования сложных производств внесли И.И.Алиев, В.М. Ефременко, Б.И.Кудрин, Ю.Д. Сибикин, А.А. Федоров и другие, но означенные выше проблемы не были решены.

Обширные исследования, посвященные построению эффективных алгоритмов и моделей для расчета заземлений, напряжений прикосновения и шага, обеспечивающих безопасность работы электротехнических комплексов, выполнили: М.А. Авербух, В.В. Бургсдорф, П.А. Долин, Р.Н. Карякин, А.Б. Ослон, В.И. Солнцев, Ю.Г.Целебровский, А.И. Якобс и другие. Однако, эту проблему до настоящего времени нельзя считать решенной.

Объектом исследования являются электротехнические комплексы непрерывных инерционных замкнутых энергоемких производств.

Идея работы заключается в создании нелинейных адаптивных моделей электротехнических комплексов непрерывных инерционных замкнутых энергоемких производств на основе балансовых уравнений и методов искусственного интеллекта, позволяющих повысить качество функционирования рассматриваемого класса производств.

Цель работы: повышение энергоэффективности, качества функционирования и безопасности электротехнических комплексов непрерывных инерционных замкнутых энергоемких производств.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать проблемы прогнозирования энергопотребления для ЭТК рассматриваемого класса непрерывных производств. Разработать методики построения моделей энергопотребления для электротехнического комплекса электрооборудования для подобных производств более совершенных, чем существующие.

2. Разработать статическую и динамическую модели прогнозирования энергопотребления ЭТК рассматриваемого типа производства без использования длинных временных рядов ретроспективных данных с определением коэффициента дифференциального уравнения основного технологического процесса на основе нечеткой логики.

3. Разработать многокритериальную многопараметрическую модель оптимального управления рассматриваемого типа производства для повышения его энергоэффективности с помощью генетического алгоритма.

4. Разработать модели и методы, обеспечивающие электробезопасность персонала ЭТК в случае возникновения аварий электрооборудования и техногенных катастроф.

5. Разработать алгоритмы и программы, реализующие модели энергопотребления, многокритериальную оптимизацию качества функционирования производства, расчета заземлений, напряжения прикосновения и шагового напряжения.

6. Выполнить технико-экономическую оценку эффективности предлагаемых моделей и мероприятий.

Методы исследований. Для решения поставленных в диссертации задач использовались фундаментальные положения теоретических основ электротехники, методы искусственного интеллекта, детерминированное и стохастическое моделирование, теория автоматического регулирования и управления, теории подобия и моделирования, численные методы, методы идентификации моделей.

Проводилось математическое, компьютерное и физическое моделирование. Вычисления выполнялись в MATLAB Simulink, MS Excel и в ходе работы оригинальных программ, разработанных на языке Pascal, в среде программирования Turbo Delphi.

Научная новизна работы:

1. Предложена новая концепция построения моделей электротехнических комплексов с непрерывным энергоемким производством, относящихся в основном к цветной металлургии и химической промышленности, отличающаяся адаптивностью моделирования и оптимизацией протекающих в них процессов на основе методов искусственного интеллекта.

2. Разработаны статическая и динамическая модели энергопотребления электротехнических комплексов с непрерывным инерционным нелинейным замкнутым производством, отличающиеся отсутствием необходимости использования длинных временных рядов ретроспективных данных.

3. Впервые для рассматриваемого типа непрерывного энергоемкого производства получены динамические характеристики энергопотребления и техно-

логических процессов от основных управляемых параметров, что позволяет предсказывать аварийные ситуации и отчасти техногенные катастрофы.

4. Впервые на основе генетического алгоритма решена многопараметрическая оптимизационная задача управления энергопотреблением непрерывного производства с учетом технологических параметров и стоимостных факторов.

5. Впервые на основе теории нечетких множеств разработаны математическая и физическая модели удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от климатических параметров и глубины залегания, позволяющие повысить эффективность работы оборудования электротехнических комплексов и безопасность их обслуживания.

6. Впервые на основе экспериментов разработаны эмпирические зависимости удельного электрического сопротивления ρ грунта от его плотности, позволяющие определить комплекс мер по улучшению электропроводности после ввода в эксплуатацию устройств заземления. Запатентована научно-испытательная лабораторная установка для определения удельного электрического сопротивления грунта от его плотности.

7. Разработаны оригинальные программы, реализующие предлагаемые модели и алгоритмы искусственного интеллекта, позволяющие повысить энергоэффективность функционирования производства рассматриваемого типа и электробезопасность обслуживания его электротехнического комплекса.

Теоретическая значимость полученных результатов

1. Концептуальные положения комплексного подхода к синтезу детерминированного и стохастического моделирования могут быть использованы для решения нелинейных задач при управлении сложными технико-экономическими системами.

2. Детерминированное моделирование с применением методов искусственного интеллекта дает возможность получить новые знания о динамических характеристиках нелинейного инерционного объекта, каким является рассматриваемый тип производства, не допускающего проведения прямых экспериментов на нем.

3. Разработанная методология синтеза многокритериальной оптимизационной задачи на основе детерминированной модели технологического цикла, рассматриваемого как объект управления производства и генетического алгоритма позволяет найти наилучшие значения управляемых параметров объекта, обеспечивающих минимум потребления ресурсов при установленных ограничениях.

4. Разработанные на основе теории нечетких множеств зависимости удельного электрического сопротивления слоев грунта позволяют получить новые знания об изменениях этого сопротивления под воздействием климатических факторов в любое время года для широт без вечной мерзлоты.

5. Установленная аналитическая зависимость удельного электрического сопротивления от плотности грунта позволяет получить новые знания об изменениях этого сопротивления и определить комплекс мер после запуска устройств заземления в эксплуатацию.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработанная методология моделирования компонентов электротехнических комплексов с непрерывным энергоемким производством с учетом системного видения позволяет осуществить ресурсо- и энергосбережение, повышая тем самым энергоэффективность производств.

2. Разработанные модели более точного расчета заземляющих устройств, напряжения прикосновения и шагового напряжения позволяют снизить стоимость заземляющих устройств и повысить безопасность обслуживания электротехнических комплексов.

3. Предложенная на основе генетического алгоритма оптимизационная модель управления непрерывным производством позволяет оперативно выбрать энергоэффективный технологический режим, в зависимости от существующих цен на энергоресурсы и сырье.

4. Созданные алгоритмы и программы существенно снижают трудоемкость решения задач по повышению качества функционирования, энергоэффективности и технологической безопасности эксплуатации электротехнических комплексов.

5. Результаты работы внедрены:

– на Павлодарском алюминиевом заводе (Казахстан);

– в Новосибирской проектной организации ООО «Проект – 08» (Россия);
в учебном процессе:

– Новосибирского государственного технического университета (Россия);

– Павлодарского государственного университета им.

С. Торайгырова (г. Павлодар, Казахстан);

– Инновационного Евразийского университета (г. Павлодар, Казахстан).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Детерминированная статическая модель ЭТК непрерывного энергоемкого производства на основе методов искусственного интеллекта позволяет прогнозировать его электропотребление без использования длинных временных рядов ретроспективных данных.

2. Динамическая модель ЭТК, использующая методы искусственного интеллекта, определяет почасовое прогнозирование его электропотребления при переходе на иные технологические режимы, что позволяет избежать штрафных тарифов при оплате и предсказать техногенные аварии.

3. Детерминированная модель рассматриваемого типа производства позволяет решить оптимизационную многопараметрическую задачу поиска энергоэффективного режима его функционирования.

4. Применение генетического алгоритма упрощает процесс решения оптимизационной задачи поиска значений технологических параметров производства, позволяющих получить минимум энергопотребления.

5. Модели определения удельного электрического сопротивления ρ грунта для расчета параметров заземлений, построенные на основе методов нечеткой логики, позволяют рассчитывать более точно заземляющие устройства, а также напряжение прикосновения и шага в зависимости от климатических условий.

6. Предлагаемые эмпирические зависимости удельного сопротивления грунта ρ от его плотности позволяют рассчитать динамику изменения ρ и определить меры по его уменьшению после ввода в эксплуатацию заземляющих устройств.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным использованием основных положений теоретической электротехники, методов многокритериальной оптимизации, в том числе основанных на методах искусственного интеллекта, а также незначительным отклонением данных, полученных экспериментальным путем, от результатов, обоснованных теоретически. Так, результаты моделирования объемов потоков вещества в рассматриваемом производстве, а также электропотребление его электротехнического комплекса отличались от наблюдаемых в реальности не более, чем на 3%, а результаты моделирования удельного электрического сопротивления многослойного грунта при расчете заземляющих устройств – не более, чем на 10%. Это свидетельствует о корректности принятых исходных допущений и использовании соответственно выбранных методов для достижения цели и решения поставленных задач.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: II, III, XIII Международной научно-технической конференции АПЭП (г. Новосибирск, 1994, 1996, 2016 гг.); I Международной (XII Всероссийской) конференции АЭП-95 (г. Санкт-Петербург, 1995 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (г. Пенза, 2005 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Математические модели и методы в управлении, экономике и социологии» (г. Тюмень, 2008 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (г. Омск, 2008 г.); XII, XIII, XIV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты» (Украина, г. Алушта, 2008, 2010, 2012 гг.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта» (г. Омск, 2013 г.); XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность» (г. Томск, 2013 г.); IX Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2014 г.); Всероссийской молодежной научной школе-конференции: «Состояние и пути развития российской энергетики» (г. Томск, 2014 г.); VIII, IX Международных научно-технических конференция «Современные проблемы машиностроения» MEACS (г. Томск, 2014, 2015 гг.); XVII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ACED (г. Екатеринбург, 2018 г.); V Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2020г), VII Международной научно-технической конференции «Пром-

Инжиниринг» (г. Сочи, 2020г.), VI Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве» (Павлодар (Казахстан), 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 67 печатных работ. Статей в изданиях из перечня ВАК РФ – 14, 8 статей проиндексированы в международных наукометрических системах SCOPUS и Web of Science, 1 монография, 1 патент Республики Казахстан, 1 авторское свидетельство РФ на программный продукт, 42 прочие работы.

Личный вклад автора в совместных публикациях составляет не менее 70%. Все научные положения и формулы разработаны автором лично.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников из 201 наименований. Диссертация изложена на 346 страницах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 27 таблиц, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи, отражены научная новизна и практическая значимость, указаны методы исследований и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выделены актуальные проблемы и произведен анализ существующих моделей электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств и методов их решения, выполнена постановка задачи диссертационной работы. За типовое непрерывное энергоемкое производство взято гидрохимическое производство глинозема (электролитического сырья алюминия), структурная схема которого приведена на рисунке 1.

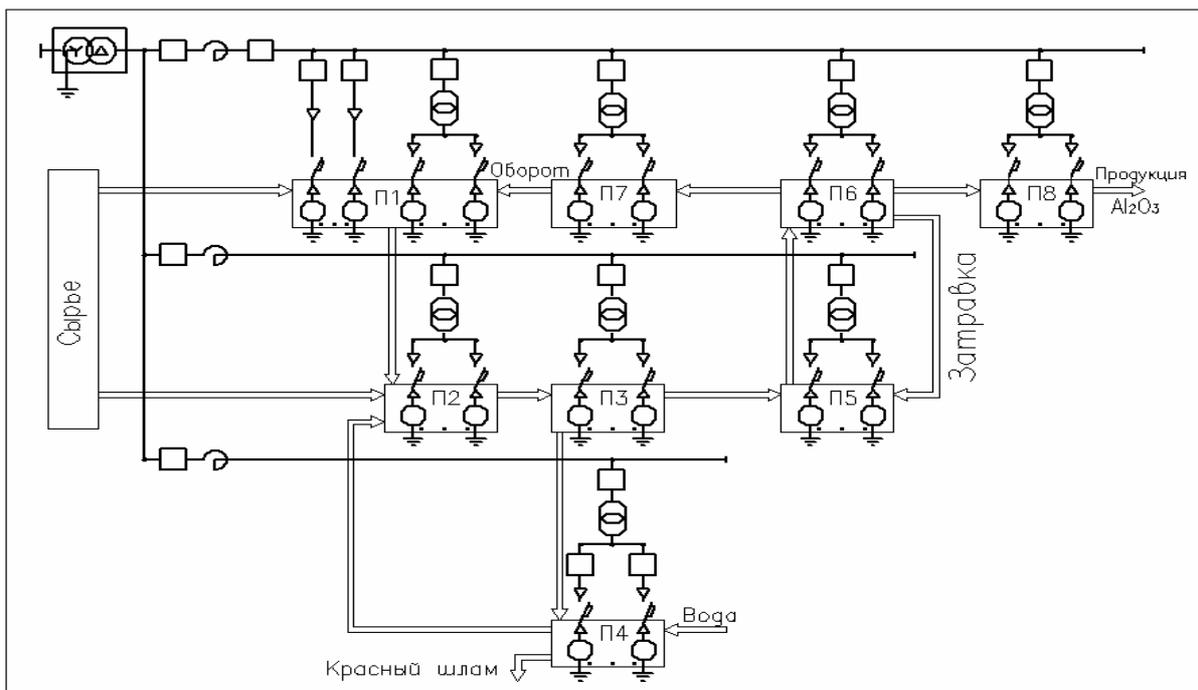


Рисунок 1 – Структурная схема электротехнического комплекса глиноземного производства

Так как это производство обладает свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости, что препятствует применению статистических моделей. Структурная схема электротехнического комплекса, реализующая технологический процесс рассматриваемого типа производства. На схеме изображены основные элементы электротехнического комплекса электрооборудования: трансформаторы на 100/6 кВ, 6/0.4 кВ, реакторы, выключатели, предохранители, синхронные и асинхронные двигатели, заземляющие устройства. Технологические участки (переделы) данного производства изображены прямоугольниками, обозначенными П1 – П8. В производствах данного класса основное электропотребление идет на перемещение и преобразование потоков вещества, проходящих по технологическим участкам. Поэтому электропотребление подобных производств определяется объемами перерабатываемых потоков. На схеме показаны линии материальных потоков, на преобразование и перемещение которых и расходуется более 90% объема электрической энергии. Из множества проблем управления предприятием рассматриваемого типа, выбраны ряд нерешенных до настоящего времени проблем, касающихся электротехнического комплекса. Первая проблема – прогнозирование объема электропотребления (мощности) при составлении договоров на покупку электроэнергии и прогнозирование электропотребления электротехнического комплекса электрооборудования с почасовой детализацией (требуемой при составлении договоров на поставку электроэнергии) при переходе на иные технологические режимы производства, которые часто возникают в настоящий момент при смене поставщиков сырья или изменении объема выпуска основного продукта. Вторая – поиск энергоэффективного режима работы рассматриваемого типа производства при существующем уровне цен на энергоресурсы и сырье без повышения себестоимости готовой продукции. При переходе на иные энергоэффективные режимы на предприятиях данного типа могут возникать аварии электрооборудования и аварии техногенного характера в связи с резкими увеличениями объемов материальных потоков, что требует решения третьей проблемы: повышение эффективности функционирования и электробезопасности электротехнического комплекса электрооборудования. Эти проблемы объединяются системным подходом решения задачи повышения эффективности, качества функционирования и безопасности электротехнических комплексов рассматриваемого класса производств.

Особенности моделирования энергопотребления. Для предприятий рассматриваемого типа ввиду его нелинейности (отсутствие пропорциональной зависимости между входом и выходом) даже опытные технологи затрудняются давать прогнозные решения.

Представление о нелинейной взаимосвязи температурных и концентрационных режимов гидрохимического глиноземного производства, дает циклограмма Байера (рисунок 2). Очевидно, что для решения такой сложной задачи прогнозирования требуется разработка инструментария (моделей) для ЛПР (лиц, принимающих решение), основанного на базе знаний о данном производстве (моделях производства), способного прогнозировать энергопотребление его электротехнического комплекса электрооборудования.

Проблемы энергоэффективного управления нелинейным производством. Анализ циклограммы с изотермами равновесия системы $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ (рисунок 2) позволяет сделать вывод: координаты многоугольника А–В–С–Е–F–G влияют на расход материалов и энергоносителей, реализующих материальное движение в кольце Байера, а эти затраты составляют около 70% от полных затрат на получение основного продукта. Следовательно, умелое управление координатами циклограммы (то есть, режимом) данного производства может обеспечить минимизацию затрат энергии на получение сырья алюминия, глинозема.

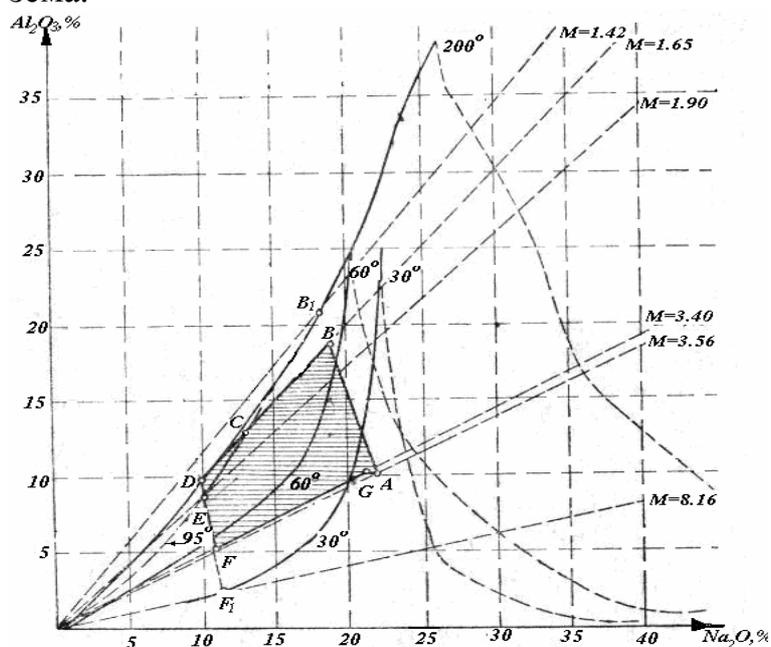


Рисунок 2 – Циклограмма способа Байера в системе $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$

Исходя из этого анализа, для решения оптимизационной многокритериальной задачи управления необходимо построение целевой функции, включающей уравнения материального баланса технологического цикла с минимизацией энергопотребления и себестоимости готовой продукции. В результате решения такой задачи должны быть определены значения технологических режимных параметров, позволяющие повысить энергоэффективность производства.

Анализ проблем безопасной и эффективной эксплуатации электротехнических комплексов. Рассматриваемый класс производств имеет в своей структуре (рисунок 1) большое количество электрооборудования различного типа. В процессе перехода на иные технологические режимы в производстве могут значительно увеличиваться материальные потоки, и как следствие, возникать аварии электрооборудования. Устройства заземления, входящие в состав электротехнического комплекса электрооборудования, способствуют отведению в землю появившегося в таких случаях напряжения на корпусе двигателя или при обрыве фаз, а возникший при этом ток, вызывает срабатывание релейной защиты, предупреждающей выгорание оборудования. При этом средства автоматики, регулирующие технологический процесс, запускают запасное оборудование. Таким образом, благодаря правильно организованным устройствам заземления, сохраняется оборудование, и объем потоков в производстве остается на требуемом технологией уровне. Помимо обеспечения принятых режимов работы энергоустановок, устройства заземления имеют и функцию защиты от поражения электрическим током. Однако при решении задач расчета устройств заземления имеется ряд сложностей, который обусловлен неопределенностью значения удельного электрического сопротивления земли в кон-

кретный момент времени и в конкретном месте, которое зависит от ряда его параметров, меняющихся в очень широких пределах. Существующие методы и рекомендации не позволяют учесть изменения удельного электрического сопротивления, и заземляющие устройства рассчитывались с большим запасом, а расчет напряжений прикосновения и шага мог быть в ряде случаев ошибочным и способствовать травмированию обслуживающего персонала.

Постановка задачи:

В виду сложности поставленных задач разработать новый класс моделей интеллектуальных алгоритмов на основе имитации всех значимых реальных процессов, а именно: модели 1) энергопотребления электротехнического комплекса электрооборудования рассматриваемого типа производства в различных режимах для составления договоров на поставку электроэнергии, а также для задачи выравнивания электрической нагрузки энергосистемы, в которой функционирует данный электротехнический комплекс электрооборудования; 2) поиска оптимальных режимных технологических параметров для выработки стратегии управления, позволяющей повысить энергоэффективность производства в целом; 3) удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от вида грунта, глубины его залегания и климатических условий (влажности, температуры, плотности) для более точного расчета напряжения прикосновения и шагового напряжения, а также расчета заземлений.

При этом построение моделей, ввиду их сложности, выполнить на основе методов искусственного интеллекта, а именно, теории нечетких множеств, генетического алгоритма, а так же материального и энергетического баланса.

Вторая глава посвящена решению задачи разработки моделей электропотребления электротехнического комплекса электрооборудования рассматриваемого класса производств: статического и динамического характера.

Построение статической модели. Для решения задачи энергопотребления электротехнического комплекса электрооборудования глиноземного производства (рисунок 1) в стационарном режиме была разработана статическая модель, которая в силу особенностей данного производства разрабатывалась на основе укрупненной детерминированной модели, имитирующей основные его технологические преобразования (рисунок 3) и определяющая объемы материальных потоков в зависимости от концентрационных технологических режимов. На рисунке 3 оцифрованными стрелками обозначены входные и выходные материальные потоки (т/час или м³/час), где сырье, поток 1 – (бокситы) и 13 – реагент (щелочь) размалываются (передел I) и смешиваются с оборотным щелочным раствором, поток 3 – суспензия, содержащая размолотый боксит и щелочь, разделяется при нагревании (блок II) на щелочной раствор Al₂O₃ и 4 – шлам, промываемый водой (поток 16) с целью возврата щелочи в технологический цикл, 5 – поток с растворенным Al₂O₃ смешивается к катализатором (блок III), 7 – катализатор (мелкие кристаллы Al₂O₃), поток 6 – возвращаемая в производство щелочь, 8 – раствор с высокой концентрацией Al₂O₃ в реакторах (блок V) путем охлаждения разделяется на выпавший в осадок глинозем и щелочной раствор – поток 9, поток 11 – щелочной раствор, выпариваемый до требуемой концентрации (блок VII), 10 – готовый продукт, глинозем.

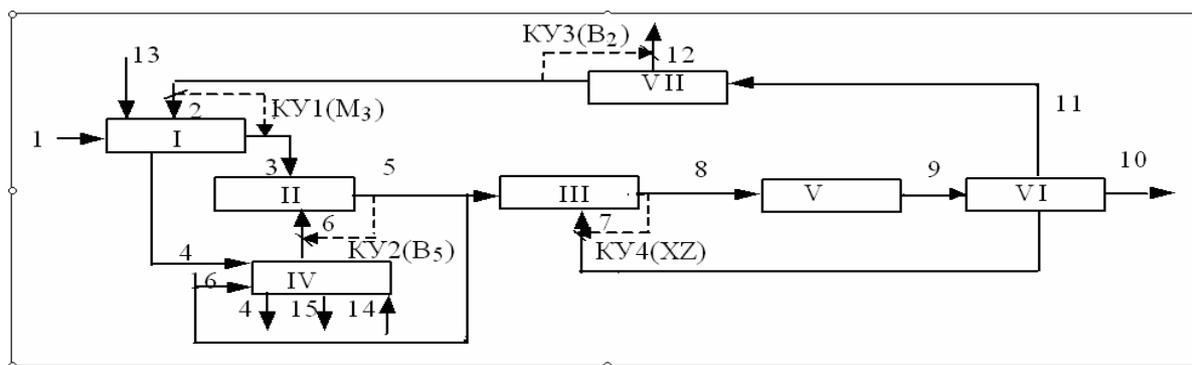


Рисунок 3 – Принципиальная структура статической модели энергопотребления электротехнического комплекса электрооборудования гидрохимического производства по способу Байера

Модель состоит из семи блоков, описывающих технологию переделов цикла Байера (рисунок 3), в каждом из которых на основании материального баланса определяются объемы проходящих через передел потоков и потребление электроэнергии двигателями, преобразующими или перемещающими эти потоки. Модель имеет четыре контура управления, аналогично реально существующим в производстве, с помощью которых поддерживается концентрационный технологический режим $KY1 \rightarrow M_3$, $KY2 \rightarrow B_5$, $KY3 \rightarrow B_2$, $KY4 \rightarrow XZ$.

Электропотребление электротехнического комплекса электрооборудования данного производства определяется мощностями двигателей насосов, мельниц, мешалок и т.п. и связано с объемами потоков посредством пропорциональных зависимостей, определяемых априорно:

$$W = K_3 \cdot \sum_{i=1}^{16} K_{i3} \cdot F_i, \quad (1)$$

где K_{i3} – удельные затраты электроэнергии F_i -го материального потока (кВт·ч/ед.изм.Ф). K_3 – поправочный коэффициент, отражающий долю не учтенных затрат электроэнергии, определяемый как частное от реального электропотребления и рассчитанного по модели.

Самый продолжительный по времени (72 часа) процесс в производстве рассматриваемого типа – выделение кристаллов Al_2O_3 из раствора происходит в реакторах (блок V). На все остальные процессы затрачивается от 0.2 до 8 часов. В виду этого, моделирование блоков-переделов I, II, III, IV, IV, VII было выполнено с помощью нелинейных алгебраических уравнений материального баланса, записываемых для всех i -тых потоков ($i=1,2,\dots,16$), проходящих через моделируемый блок, обозначенный в уравнениях (2) индексом j ($j = I, II, III, IV, IV, VII$), а моделирование работы реакторов (блок V) – дифференциальным уравнением (3). Математическое представление модели:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n L_{ij} \cdot A_i \cdot G_i \cdot F_i = 0 & \quad \sum_{i=1}^n H_{ij} \cdot F_i \cdot G_i = 0 & \quad \sum_{i=1}^n K_{ij} \cdot B_i \cdot G_i \cdot F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot F_i = 0 & \quad \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot F_i \cdot D_i = 0 & \quad M_i = 1.645 \cdot \frac{B_i}{A_i} \end{aligned} \quad (2)$$

где F_i – потоки растворов, D_i – плотности растворов, H_{ij} – весовое соотношение жидкого к твердому, A_i и B_i – концентрации жидкой фазы Al_2O_3 и Na_2O_k соот-

ветственно, G_i – концентрации твердой фазы Al_2O_3 ; I_i, K_i, L_i, H_{ij} – нелинейные функции i -го потока, имеющие положительное значение, если поток входящий, и отрицательное, если выходящий и равные 0, если данный поток не проходит через моделируемый блок. Описываемые выше концентрации могут быть легко определены с помощью измерений или вычислений.

Математическая модель блока V:

$$f'_A = \frac{-R_d K_d}{A_r^2} (0.96 + 0.29 S_K) (A - A_r) \left(3A - A_r - 2 \left(\frac{G_8}{1.529 - 0.629 G_8} + A_8 \right) \right) \quad (3)$$

где R_d – идентификационный коэффициент модели в целом, S_K – площадь катализатора, A – концентрация оксида алюминия в растворе, A_r – его равновесная концентрация, l – длительность процесса разложения, K_d – его скорость.

Выбор коэффициента дифференциального уравнения K_d на основе нечеткой логики. Величина K_d описывается очень сложной зависимостью от температуры, концентрации реагента и наличия катализаторов. Помимо того, точные значения этих параметров в реакторах, где происходит преобразование веществ, определить невозможно. Для упрощения вычислений данная скорость K_d была представлена нечеткой величиной, определяемой с помощью теории нечетких множеств (рисунок 4).

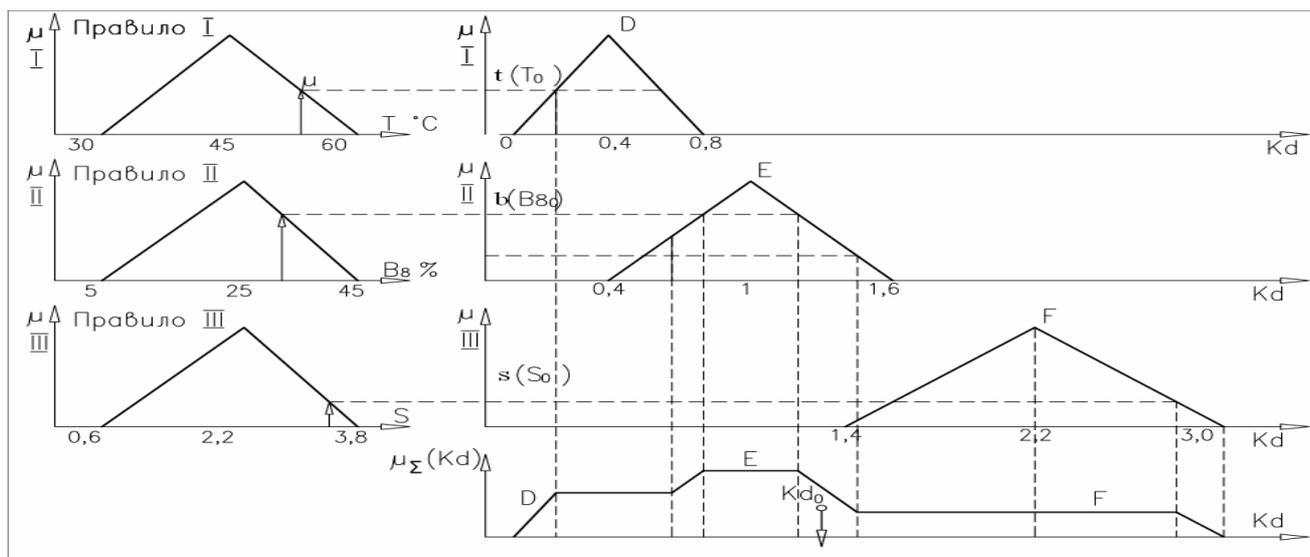


Рисунок 4 – иллюстрация к решению задачи определения коэффициента скорости реакции K_d на основе использования теории нечеткой логики

На первом этапе были определены функции принадлежности для каждого из параметров в виде треугольной функции, как наиболее простые и близко описывающей реальные процессы в реакторе. Второй этап – нахождение степени истинности для каждого параметра при конкретных текущих значениях T_d , B_8 и S . Эти функции определялись с помощью экспертных оценок, как влияние каждого параметра на скорость K_d . Проверка осуществлялась с помощью вычисления значений имеющейся сложной зависимости при этих же значениях. Третий этап – все нечеткие подмножества, каждой переменной объединялись в одно нечеткое подмножество. Четвертый этап – вычисление значения K_d с помощью выражения:

$$K_d = \frac{\int_{K_d} K_d \mu_{\Sigma}(K_d) dK_d}{\int_{K_d} \mu_{\Sigma}(K_d) dK_d} \quad (4)$$

Представленная модель обладает существенной нелинейностью, при этом, в силу взаимосвязанности параметров рассматриваемого производства (см. циклограмму, рисунок 2) все уравнения модели, включая дифференциальное, должны решаться в едином итерационном цикле.

При разработке модели было выполнено аналитическое преобразование систем нелинейных уравнений к виду, обеспечивающему сходимость итерационного процесса в трех вариантах, в зависимости от значений искомого в итерационном процессе величин, и разработан алгоритм, по которому поиск решения ведется по одному из вариантов для обеспечения сходимости.

При выборе численного метода решения дифференциального уравнения (3) доказана теорема о разрешимости задачи Коши для данного уравнения и определена величина глобальная погрешности C :

$$C(t) = e^{\left\{ \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau \right\}} = e^{\left\{ \int_{t_0}^t f'_y(\tau, \tilde{y}(\tau)) d\tau \right\}}$$

На промежутке интегрирования в 100 часов при шаге интегрирования $h=0.05$ часа накопление погрешности не превышало 0.029.

Полученная модель (графический результат ее работы см. рисунок 5) имеет входные параметры $\mathbf{X}=\{B_2, M_3, B_5, XZ\}$, определяемые наличием контуров управления $KY1 \rightarrow M_3$, $KY2 \rightarrow B_5$, $KY3 \rightarrow B_2$, $KY4 \rightarrow XZ$ (отношение затравочного гидрата к растворенному Al_2O_3) (рисунок 3), контролируемые внешние воздействия \mathbf{Z} (параметры сырья, температура процессов) и выходные – энергопотребление \mathbf{W} и технологические параметры производства \mathbf{Y} (концентрации веществ и их отношения). Из выходных величин экспериментально были выделены значения, нуждающиеся в идентификации: $\mathbf{Y}\mathbf{Y}=\{B_6, M_5, M_2\}$. Для соответствия их рассчитываемых значений реальным введены три идентификационных параметра, представляющих собой вектор идентификации модели $\mathbf{U}=\{R_n, R_h, R_d\}$..

Первоначально были определены по реальным выборкам дисперсии месячных значений величин $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$: $D[B_6]=4.7 \cdot 10^{-6}(\tau^2/\text{м}^6)$, $D[M_5]=0.0005(\text{о.е.})^2$, $D[M_2]=0.0055(\text{о.е.})^2$. Далее оценена чувствительность составляющих $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$ к изменениям \mathbf{U} . Данное исследование проведено с целью определения степени влияния каждого идентифицирующего параметра на значения трех основных зависимых концентрационных характеристик производства $\mathbf{Y}\mathbf{Y}=\{B_6, M_2, M_5\}$. В результате многочисленных экспериментов был разработан идентификационный критерий модели:

$$J = \frac{(B_{6_0} - B_6)^2}{D[B_6]} + \frac{(M_{5_0} - M_5)^2}{D[M_5]} + 5 \frac{(M_{2_0} - M_2)^2}{D[M_2]} \rightarrow \min \quad (5)$$

Данный критерий позволил реализовать алгоритм автоматической идентификации методом градиентного спуска. После идентификации модели расхождение рассчитанных по модели значений с реальными значениями, наблю-

даемыми в течение года, не превышало 2%. С помощью модели были построены графики электропотребления электротехнического комплекса электрооборудования от двух параметров (рисунок 5).

Затем были произведены эксперименты на модели и получены характеристики всех выходных параметров от входных. Анализ полученных зависимостей электропотребления, объемов материальных потоков производственных переделов и других технологических характеристик от входных параметров позволил сделать вывод: все эти величины имеют ярко выраженную нелинейную зависимость от большинства технологических параметров.

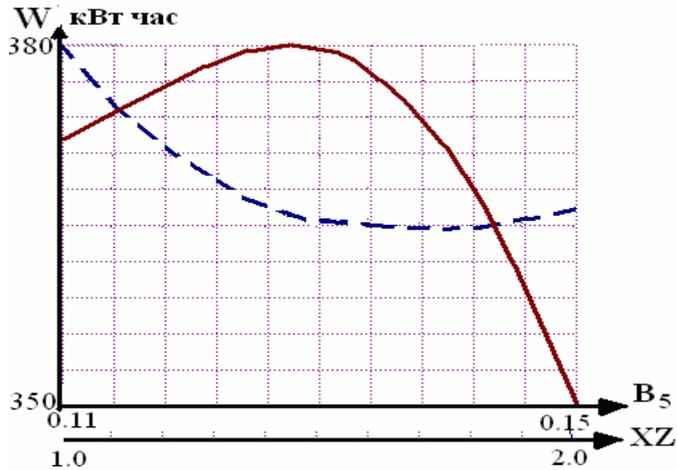


Рисунок 5 – Зависимость электропотребления электротехнического комплекса электрооборудования производства W кВт·ч на 1 тонну произведенного глинозема от изменения управляемых параметров B_5 (сплошная линия), XZ , отношение концентраций растворенного и твердого Al_2O_3 (штриховая линия).

Динамическая модель энергопотребления производства. Ввиду особенностей рассматриваемого типа производства при переходе на другие технологические режимы может произойти резкое увеличение или уменьшение электропотребления ввиду изменения объемов потоков вещества. Поэтому необходима разработка динамической модели электропотребления.

Структура модели, изображенная на рисунке 3, была изменена следующим образом: блок V был заменен последовательностью блоков, имитирующих работу аппаратов-декомпозиеров, добавлен блок VIII обобщенной буферной емкости.

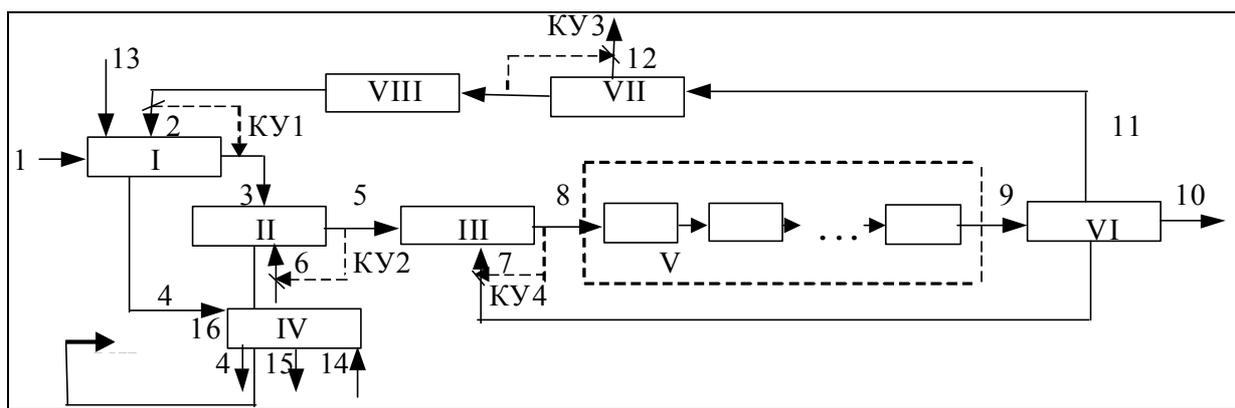


Рисунок 6 – Принципиальная структура динамической модели энергопотребления производства

В результате модель каждого n -ого аппарата имеет вид (6):

$$\begin{aligned}
 F_{n-1} &= F_n + 0.53V_d V_n G_n^* & G_n^* &= 1 - \frac{G_n}{2.43} \\
 V_d \frac{d}{dt} G_n &= F_{n-1} G_{n-1} - F_n G_n + 1.53V_d V_n G_n^* \\
 V_d \frac{d}{dt} G_n^* A_n &= F_{n-1} G_{n-1}^* A_{n-1} - F_n G_n^* A_n - V_d V_n G_n^* \cdot \\
 V_d \frac{d}{dt} G_n^* B_n &= F_{n-1} G_{n-1}^* B_{n-1} - F_n G_n^* B_n \\
 V_n &= -U_D K_d(B_n, T_n, S_{30}) \frac{(A_n - A_E(B_n, T_n))^2}{A_E(B_n, T_n)^2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

В глиноземном производстве самую большую удерживающую способность имеет буферная емкость оборотного раствора, потому в качестве обобщенной моделировалась именно она:

$$\frac{dV_8(t)}{dt} = F_{11}(t) - F_2(t) \tag{7}$$

В зависимостях (6) F_n – объем потока гидратной пульпы на выходе n -го аппарата, G_n – содержание в ней твердой фазы Al_2O_3 , A_n – содержание жидкой фазы, B_n – содержание в жидкой фазе Na_2O_k , V_n – скорость разложения раствора в аппарате, K_d – коэффициент, определяющий скорость реакции при текущей температуре T_n , концентрации щелочи B_n и площади поверхности катализатора S_{30} в n -том аппарате-декомпозиере. Величина K_d рассчитывается с применением теории нечеткой логики. Процедура его получения описана выше. A_E – равновесная концентрация Al_2O_3 , – нелинейная функция B_n и T_n .

Полученная модель была идентифицирована аналогично предыдущей. Затем на ней проведены эксперименты, позволившие определить ее динамические характеристики, две из которых показаны на рисунке 7.

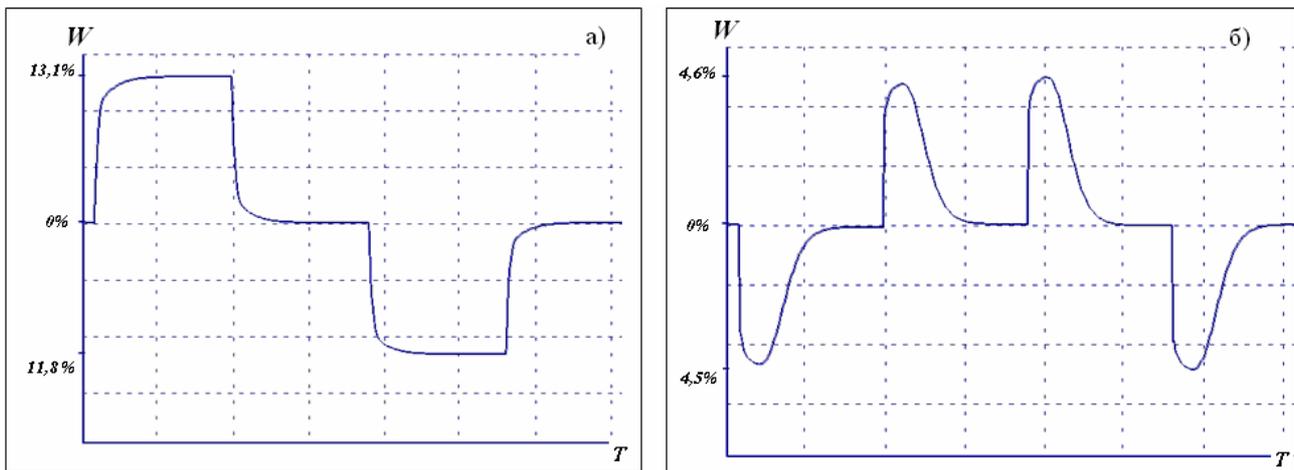


Рисунок 7 – Реакция изменения электропотребления W электротехнического комплекса электрооборудования глиноземного производства (относительно номинального режима) при скачкообразном изменении на 4%, затем на –4% параметров относительно номинальных значений: M_3 (а), концентрации щелочи в потоке F_5 (б). Цена деления оси абсцисс – 120 часов.

Анализ полученных динамических характеристик позволил сделать следующие выводы: а) в целом полученные результаты соответствуют данным,

полученным опытным путем, б) средняя длительность переходного процесса в кольце – 5 суток.

Очевидно, что для рассматриваемого класса непрерывных инерционных производств задача выравнивания графика нагрузки энергосистемы может решаться только для случая перехода на иной технологический режим. Так, например, увеличение параметра M_3 на 1% влечет за собой увеличение выхода глинозема на 10% и увеличение энергопотребления примерно на 3%.

Третья глава посвящена разработке оптимизационной модели управления непрерывным производством при изменяющейся конъюнктуре цен на энергоносители и сырье, позволяющей повысить его энергоэффективность.

Для разработки данной модели энергоэффективного управления при изменяющейся конъюнктуре цен на энергоносители и сырье была поставлена задача оптимизационного вида. Для решения этой задачи введены критерии: 1) минимизация электропотребления и 2) расход пара, при ограничениях на цены, объемы сырья и энергии и без увеличения себестоимости готовой продукции и производительности. В основу критерия минимизации электропотребления положено выражение (1), а расхода пара выражение – $Q_n = K_{\text{вып}} F_{12}$, где $K_{\text{вып}}$ – коэффициент расхода пара на 1 м^3 упаренной воды (Гкал/м^3).

Для сведения многокритериальной оптимизационной задачи к однокритериальной использовано определение себестоимости 1 тонны готовой продукции (поток F_{10}), где учитывается расход электроэнергии, пара и сырья:

$$S = C \cdot Q(X) / F_{10} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $Q(X) = (K_1 \cdot W(X), K_2 \cdot Q_n(X), K_3 \cdot F_1(X), K_4 \cdot F_{13}(X))$, где F_1 и F_{13} – расход сырья при значении режимных параметров, определяемых вектором X , C – цены на электроэнергию, пар и сырье соответственно, $K_1 \div K_4$ – коэффициенты, определяющие долю неучтенных затрат.

Поиск энергоэффективного режима работы производства необходимо было построить по 4-м управляемым параметрам технологического процесса производства. Поэтому в основу многопараметрической целевой функции для решения данной задачи была положена статическая модель, описанная во второй главе, так как она учитывала весь технологический процесс производства и имела аналогично реальным 4 контура управления.

Очевидно, что для такой 4-х параметрической целевой функции невозможно привести аналитического описания и определить ее свойства. Это обстоятельство затрудняет применение классических методов оптимизации, поскольку большинство из них основывается на использовании априорной информации о характере поведения целевой функции. В связи с этим был выбран один из методов искусственного интеллекта – классический генетический алгоритм, прекрасно зарекомендовавший себя при решении подобных задач.

Кодирование элементов популяции выполнялось в двоичном коде для всей области допустимых значений по 4-м управляемым параметрам, а создание 4-х начальных популяций хромосом – с помощью случайного выбора из всей области решений рассматриваемой задачи.

Для определения меры качества для каждой хромосомы (особи) в пространстве поиска используется функция приспособленности $G(X_i)$. Функция приспособленности разрабатывалась на основе критерия (8) при условии сведения цели к максимуму и обеспечении существенной разницы в значениях для каждой особи популяции. Последнее потребовало разработки критерия вида:

$$G(\text{ch}) = \text{MAX}(S) - C \cdot Q(X) / F_{10} \rightarrow \max, \quad (9)$$

где $\text{MAX}(S)$ – максимально возможная себестоимость при решении данной задачи.

Для реализации данного алгоритма была разработана и отлажена программа, результат решения по 2-м параметрам представлен на рисунке 8. На рисунке видно, как из первоначально отобранной популяции особей-решений от популяции к популяции выживают особи, приближающиеся к оптимальному решению: $V_5=0.126$, $M_3=1.61$. По окончании процесса среднее значение функции приспособленности выросло с 341.17 до 546.17.

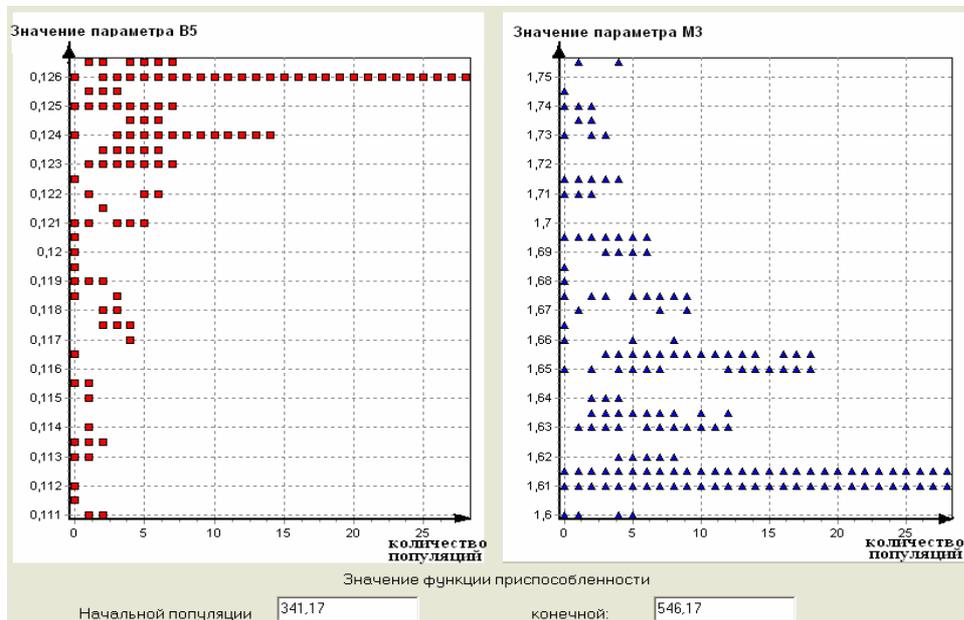


Рисунок 8 – Графическое представление формирования решений в ходе генетического алгоритма по двум параметрам производства V_5 и M_3 .

Анализ результатов решения оптимизационной задачи показал, что при полученном значении технологических параметров $V_5=0.126$, $M_3=1.61$, $XZ=1.1$, $V_2=0.18$ уменьшены затраты по электроэнергии на 7% и пара на 11% по сравнению с режимом, когда управляемые параметры поддерживаются на уровне их среднего допустимого значения.

В результате предлагается модель энергоэффективного управления производством рассматриваемого типа. Структура этой модели представлена на рисунке 9. Здесь блок УП – собственно производство, X – вектор режимных параметров, X_{\min} , X_{\max} – допустимый диапазон его изменения, Z – контролируемые, Z_n – неконтролируемые внешние воздействия, Y – вектор выходных параметров производства, P – регулятор (на рисунке он выделен пунктирной линией), МП – модель производства, X' , Z' – оценочные значения входных па-

раметров производства и контролируемых внешних воздействий соответственно, Y' – вектор выходных параметров производства, вычисляемый с помощью модели, **ИМ** – блок идентификации модели, **J** – критерий идентификации, **U** – вектор идентификационных коэффициентов модели, **ИС** – блок расчета критерия, C' – вектор оценочных значений цен, **S** – значение целевой функции, **MP** – блок поиска оптимальных параметров производства на основе генетического алгоритма, $G \rightarrow \max$ – значение функции приспособленности, критерий формирования наилучшего решения.

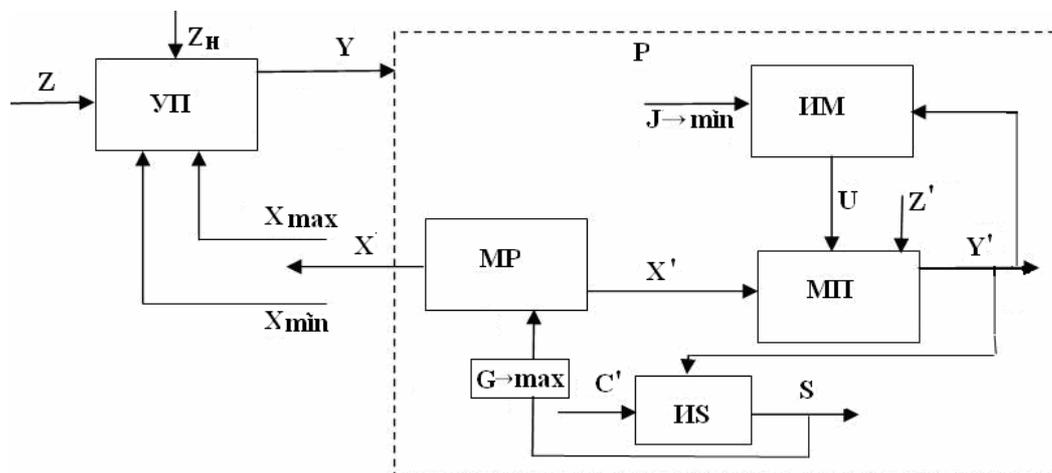


Рисунок 9 – Структура модели энергоэффективного управления непрерывным производством

Результатом работы этой модели являются оптимальные, с точки зрения энергоэффективности, значения режимных параметров и объемов потоков веществ технологических переделов производства, на основании которых формируются управляющие воздействия на электротехнологическое оборудование. Модель выдает значения режимных параметров производства при текущих или планируемых ценах на энергию и сырье, а при этих параметрах достигается минимальное энергопотребление данного производства.

Четвертая глава посвящена экспериментальной разработке моделей удельного электрического сопротивления грунта для расчетов заземлений, обеспечивающих эффективную и безопасную эксплуатацию электротехнических комплексов.

Экспериментальная разработка моделей. Для решения поставленных задач было разработано три лабораторных установки, одна из которых запатентована. Эксперименты проводились для различного вида грунтов с изменением их влажности, температуры, засоленности и уплотненности. В качестве основного математического аппарата моделирования удельного сопротивления грунта был использован аппарат нечеткой логики. Разработка модели велась следующими этапами:

- 1) поиск зависимостей удельного электрического сопротивления ρ различного вида грунта от влажности при температуре 20°C ;
- 2) поиск зависимостей ρ от отрицательных значений температуры для различного вида грунта и разной увлажненности;

3) построение климатической модели грунта конкретной местности для определения ρ вглубь земли в течение года;

4) разработка метода расчета шагового напряжения на основе моделей грунта.

Построение эмпирических зависимостей $\rho(v)$ для нечетких интервалов влажности было выполнено на основе регрессионного моделирования для каждого такого интервала в отдельности с объединением в одно математическое выражение с помощью инструмента нечеткой логики: системы размытых правил. Для определения функций принадлежности использовался прямой метод (непосредственное измерение и построение зависимостей), в котором для каждого $v \in E$ (v – влажность грунта) задается значение $\mu_A(v)$ (функция принадлежности). Это правомерно, поскольку метод применяется для измеримых понятий, таких как давление, температура и т.д., а влажность, несомненно, относится к этим понятиям.

Для описания нечеткой принадлежности к интервалам приняты экспоненциальные функции: $\mu_{A_1}(v) = e^{-c(v-d)^2}$ и $\mu_{A_2}(v) = 1 - e^{-c(v-d)^2}$, где коэффициенты c и d определяют степень нечеткости и положение на числовой оси параметра влажность. Для данной модели функции принадлежности имеют вид, показанный на рисунке 10. Выбор вида функции принадлежности продиктован многочисленными экспериментами с различного вида грунтами.

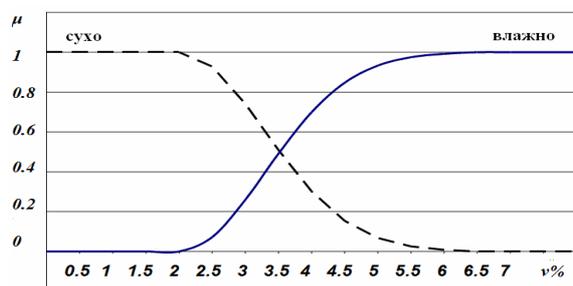


Рисунок 10 – Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов влажности

Значения интервала влажности v_1 («сухо») и v_2 («влажно») определены приблизительно, первый интервал – $0 \leq v < 2\%$, второй – $v \geq 6\%$, область переключения $2 \leq v < 6\%$, μ_i – функции принадлежности, причем в области, где соседние μ_1 и μ_2 имеют ненулевые значения, всегда выполняется равенство: $\sum_{i=1}^2 \mu_i = 1$. Регрессионная кривая была построена с использованием показательной функции: $\eta_i(v) = b_0 \cdot b_1^v$.

В результате получены уравнения удельного сопротивления для песка $\rho_{п}$, супеси $\rho_{с}$ и глины $\rho_{гд}$:

$$\begin{aligned} \rho_{п} &= 6 \cdot 0.3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0.7^v \cdot \mu_2(v) \\ \rho_{с} &= 90 \cdot 0.1^v \cdot \mu_1(v) + 0.3 \cdot 0.8^v \cdot \mu_2(v) \quad , \\ \rho_{гд} &= 100 \cdot 0.25^v \cdot \mu_1(v) + 3 \cdot 0.8^v \cdot \mu_2(v) \end{aligned} \quad (10)$$

где v – влажность грунта в процентах.

Сравнение значений, полученных с помощью модели, и справочных данных показало, что модель хорошо описывает зависимость удельного электрического сопротивления от влажности.

Известны градации засоленности грунтов: незасоленные (0.25 – 0.30% содержания солей), слабозасоленные (0.30 – 0.50%), средnezасоленные (0.50 –

1.0%), сильнозасоленные (1.0 – 2.0%), солончаки (2.0 – 4.0%). Для учета степени засоленности введен коэффициент, величина которого определяется с помощью нечеткой логики.

Для определения величины этого коэффициента введено два нечетких интервала «слабозасоленные» и «засоленные» и определены функции принадлежности, вид которых представлен на рисунке 11.

Функции принадлежности для интервала переключения от 0.4 до 2% засоленности имеют вид $\mu_1 = e^{-0.8(sol-2)^2}$ и $\mu_2 = 1 - e^{-0.8(sol-2)^2}$. Значения коэффициентов засоленности вычисляются с помощью следующих функций:

$$K_{sol} = \sum_{i=1}^2 \eta_i(sol) \cdot \mu_i(sol), \text{ где } \eta_1(sol) = 1, \eta_2(sol) = 0.001.$$

Для получения удельного электрического сопротивления грунта при конкретной влажности и засоленности необходимо значение, полученное с помощью выражения 10 умножить на K_{sol} .

Известна экспериментальная зависимость расчета удельного электрического сопротивления влагосодержащих грунтов от температуры при ее положительных значениях

$$\rho = \rho_{20} \cdot e^{-0.022 \cdot (t-20)}, \quad (11)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление при температуре 20°C, t – температура грунта.

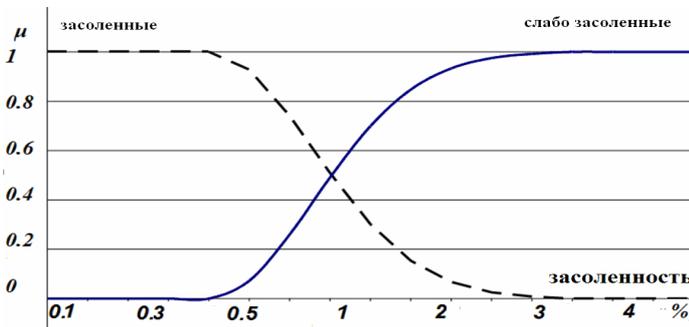


Рисунок 11 - Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов засоленности

Для выявления закономерности изменения удельного электрического сопротивления при замерзании влаги в грунте был произведен ряд экспериментов. Эксперименты показали, что при сухом грунте с уменьшением температуры ρ уменьшается по экспоненте, а при влажном – в районе от 0°C до -1°C происходит скачкообразное увеличение ρ ,

что объясняется кристаллическим строением исследуемых грунтов (пески, супеси). Для расчета величины этого скачка для песка и супеси были выведены следующие экспериментальные формулы:

$$\begin{aligned} \rho_{п}^1 &= \rho_{п}^0 (-0.03 \cdot v^2 + 0.86 \cdot v - 1.9) \\ \rho_{с}^1 &= \rho_{с}^0 (0.024 \cdot v^2 - 0.022 \cdot v + 0.2) \end{aligned} \quad (12)$$

где v – влажность, выраженная в долях, $\rho_{п}^0$ и $\rho_{с}^0$ – удельные сопротивления песка и супеси при 0°C, а $\rho_{п}^1$ и $\rho_{с}^1$ при -1°C.

Расчет удельного электрического сопротивления песка и супеси при температуре ниже -1°C может быть выполнен с помощью зависимостей:

$$\rho_{п} = \rho_{п}^1 \cdot 0.87^{(t+1)}, \rho_{с} = \rho_{с}^1 \cdot 0.88^{(t+1)} \quad (13)$$

Для глин и суглинков скачкообразного увеличения ρ в районе 0°C не происходит ввиду аморфного строения данного вида грунта. Поэтому для расчета удельного электрического сопротивления глин в области отрицательных температур предлагается следующая зависимость:

$$\rho_{\text{гл}} = \rho_{\text{гл}}^0 \cdot 0.88^{(t+1)}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{гл}}^0$ – удельное сопротивление глины при 0°C .

Анализ значений ρ , полученных с помощью разработанных моделей, с экспериментальными данными и справочниками, а так же проверка по критерию Фишера показывает, что модели адекватны. Таким образом, полученная модель может быть применена для определения удельного электрического сопротивления любого типа грунта от влажности и температуры с достаточной для практики точностью.

Моделирование ρ грунта в зависимости от плотности. Степень уплотненности $d_{\text{гр}}$ грунта оказывает непосредственное влияние на его удельное электрическое сопротивление ρ наряду с ν и t . Однако характер зависимостей ρ грунта от его плотности для песка, супеси и суглинка, насколько нам известно, изучен недостаточно.

Для решения данной задачи была разработана и смонтирована установка (Пат. № 20839 РК), позволяющая обеспечить необходимое уплотнение образцов конкретного вида грунта, и измерять его электропроводность при различной степени плотности образца (рисунок 12).

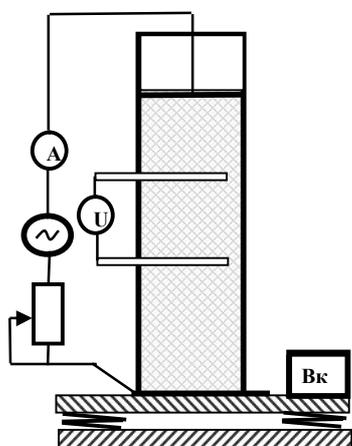


Рисунок 12 – Установка для определения электропроводности грунта при его уплотнении

Эксперименты проводились следующим образом:

- в трубу с сечением S закладывался грунт, который был предварительно взвешен и определены его влажность ν и температура t ;
- затем грунт подвергался виброобработке для достижения некоторой уплотненности;
- после остановки возбудителя колебаний (Вк) на внешние электроды подавалось напряжение с частотой 50 Гц. Проходящий через грунт ток измерялся амперметром A , а напряжение на внутренних электродах – вольтметром U ;

– удельное электрическое сопротивление рассчитывалось: $\rho = (U \cdot S) / (I \cdot \ell)$, где ℓ – расстояние между внутренними электродами;

– плотность d определялась по известной формуле: $d = P / (S \cdot L)$, где L – высота столба грунта; эти действия продолжались до предельного уплотнения образца.

В результате исследований разработана зависимость ρ песка, супеси и суглинка от плотности:

$$\rho = \rho_{d0} e^{k_{\nu}(d-d_0)}, \quad (15)$$

где ρ_{d0} и d_0 – удельное электрическое сопротивление и плотность грунта соответственно, взятые по данным геологоразведки, которые берутся перед проектированием заземляющих устройств (ЗУ), k_v – коэффициент, равный: для суглинка $k_v = e^{(-0.46 \cdot v + 2.05)} - 5$, для песка $k_v = -e^{(-0.08 \cdot v + 1.08)}$, для супеси $k_v = -e^{(-0.05 \cdot v + 1.1)}$.

Известно, что зачастую после установки устройств заземления, его параметры бывают хуже расчетных, несмотря на тщательное соблюдение технологии проведения строительных работ. Возникает вопрос о выборе метода решения проблемы: поливать солевым раствором, вводить новые заземления и т.п. Для решения этой проблемы предлагается зависимость (15), позволяющая определять динамику уменьшения ρ грунта в процессе его уплотнения от состояния разрыхления до полного оседания для выбора дальнейших мероприятий.

Пятая глава посвящена разработке климатической модели грунта для безопасной эксплуатации электротехнических комплексов рассматриваемого класса производств ввиду возможных аварий электрооборудования в совокупности с техногенными авариями, наблюдаемыми в гидрохимических производствах в виде перелива растворов из реакторов, и природных явлений.

Климатическая модель параметров грунта. Для построения климатической модели грунта был выполнен анализ годового хода температуры на поверхности земли и для различных глубин по разным районам СНГ. Данные были получены от метеостанций г.Павлодара и г.Новосибирска и взяты из литературы.

Для моделирования колебания t на заданной глубине, на основе вышесказанного и анализа данных метеостанций, была найдена следующая зависимость:

$$t = t_{\Pi} - A_h \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (g - 20 \cdot h) \right], \quad (16)$$

где A_h – амплитуда годового колебания t ($^{\circ}\text{C}$) на h (м) от поверхности, вычисляемая как: $A_h = A_{\Pi} \cdot q^h$, q – величина, характеризующая убывание температуры вглубь грунта: $q = \exp \left(\frac{\ln(A_{\Pi} / A_{\Pi})}{h_{\Pi\Pi}} \right)$, A_{Π} – амплитуда годового колебания t ($^{\circ}\text{C}$) температуры поверхности грунта; $h_{\Pi\Pi}$ – глубина постоянной годовой температуры для средних широт $h=15$ метров; коэффициент «20» – учитывает запаздывание (в сутках) максимума (или минимума) годового колебания t на 1м глубины относительно t поверхности грунта (например, если максимум t поверхности наблюдается в июле, то на глубине в 5 м он будет через 100 суток); g – дни, t_{Π} (температура слоя постоянной годовой температуры) для средних широт приблизительно равна 8°C , h – глубина от поверхности земли в метрах; $A_{\Pi\Pi}$ – амплитуда колебания t на глубинах с постоянной годовой температурой (приблизительно $0,1^{\circ}\text{C}$), $A_{\Pi} = \frac{(T_{\Pi \max} - T_{\Pi \min})}{2}$, здесь $T_{\Pi \max}$ – максимальная среднемесячная температура, $T_{\Pi \min}$ – минимальная среднемесячная температура за данный год.

Основной электрический проводник в грунте – влага. Именно она оказывает самое существенное влияние на сопротивление грунта. Поэтому при по-

строении модели удельного сопротивления грунта в реальных условиях необходимо включить определение v влажности его слоев в данном конкретном месте в определенный период времени. Моделирование зависимости v по глубине до 1м было выполнено с помощью нечеткой логики. Нечетко определялся интервал значения «глубина».

Для получения общего выражения моделирования для любого вида грунта использовалось два терма: первый – «верхний» с ФП $\mu_1(h)$, второй – «нижний» с $\mu_2(h)$. Соответственно этому, введено два интервала: первый – $0 \leq h < 20$ см (выбрано 20см и 100см, т.к. метеостанции измеряют влажность грунта на этих глубинах), второй – $h \geq 100$ см, область переключения между интервалами: $20 \leq h < 100$ см, где h – глубина грунта. Вид функций принадлежности $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ представлен на рисунке 13. Для терма «верхний» на первом интервале $\mu_1(h) = 1$, на втором $\mu_1(h) = 0$, на переходном интервале: $\mu_1(h) = 1 - \frac{h - 20}{80}$.

Если $\mu_1(h)$ убывающая функция, то $\mu_1(h) = 1 - \mu_2(h)$, при этом возрастающая: $\mu_2(h) = \frac{h - 20}{100 - 20} = \frac{x - a}{b - a}$. В соответствии с теорией нечетких множеств выражение для определения влажности представляется так:

$$v = \sum_{i=1}^2 v_i(h) \cdot \mu_i(h). \quad (17)$$

Определение функций $v_1(h)$ и $v_2(h)$ выполнено на основе анализа данных метеостанций за период в 4 года, в результате которого были построены многофакторные модели влажности грунта на глубинах 0.2м и 1м.

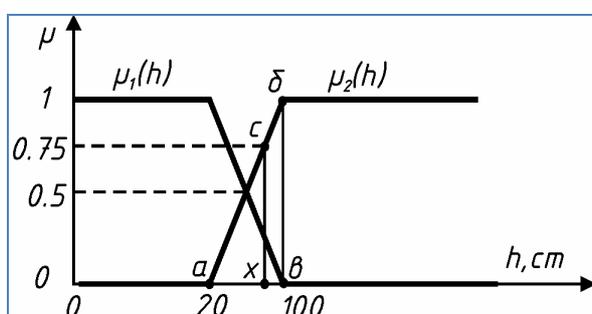


Рисунок 13 – Семейство функций принадлежности для определения влажности по глубинам

С помощью метода наименьших квадратов была получена трехфакторная модель:

$$\begin{aligned} v_{20} &= 8.06 + 0.03 \cdot o_c - 0.20 \cdot t_{\text{пр}} - 0.81 \cdot v_b; \\ v_{100} &= -4.10 + 0.03 \cdot o_c - 0.007 \cdot t_{\text{пр}} + 1.3 \cdot v_b, \end{aligned} \quad (18)$$

где o_c – количество осадков, мм; $t_{\text{пр}}$ – температура на поверхности грунта, $^{\circ}\text{C}$, v_b – средняя скорость ветра, м/с.

Для оценки модели и определения процента разброса функции v относительно ее среднего значения в зависимости от

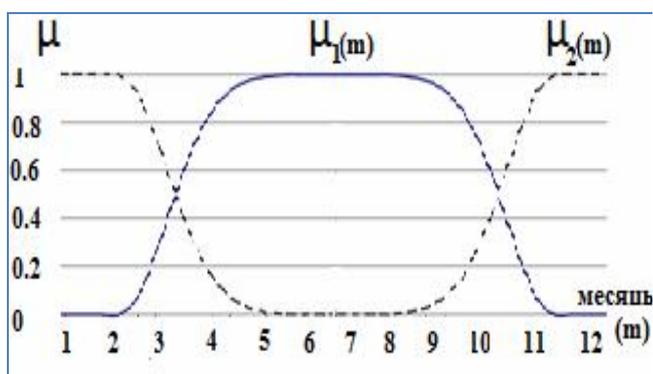
количества выпавших осадков, температуры на поверхности грунта и скорости ветра был вычислен коэффициент детерминированности V_{yx} . Для глубины 20 см $V_{yx} = 0.9$, для глубины 100 см $V_{yx} = 0.96$, что говорит об адекватности модели реальным данным.

Функции $v_1(h) = v_{20}$ и $v_2(h) = v_{100}$ из выражения (18). Исходя из (17) зависимость определения влажности v для глубины до 1м имеет вид:

$$v_h = v_{20} \cdot \mu_1(h) + v_{100} \cdot \mu_2(h) \quad (19)$$

Для построения модели определения влажности в любое время года на

глубине до 1м была введена лингвистическая переменная «месяц» с двумя термами «холодный» и «теплый». В первый временной интервал моделирования входят месяцы, в которых температура воздуха устойчиво держится ниже нуля градусов Цельсия (для рассматриваемой климатической зоны с ноября по февраль), во второй – с апреля по октябрь. Таким образом, можно считать, что функция принадлежности (см. рисунок 14) $\mu_1(m) = 1$ и $\mu_2(m) = 0$ с ноября по февраль для первого терма «холодный», а с апреля по октябрь – $\mu_1(m) = 0$ и $\mu_2(m) = 1$ для второго терма «теплый», где m – номер месяца. Интервал переключения – март (месяц активного снеготаяния) и ноябрь (месяц, когда температура грунта приближается к отрицательным значениям). Причем, в месяц активного снеготаяния к количеству выпавших за данный месяц осадков необходимо добавить осадки, накопленные в виде снежного покрова за зимние месяцы.



Функции принадлежности имеют вид (см. рисунок 14):

$$\mu_1(m) = \begin{cases} 0, & m \leq 3, \quad m \geq 11 \\ e^{(-3 \cdot (m-4)^2)}, & 3 < m \leq 4 \\ 1, & 4 \leq m \leq 10 \\ e^{(-3 \cdot (m-10)^2)}, & 10 \leq m \leq 11 \end{cases} \quad (19)$$

Рисунок 14 – Семейство функций принадлежности для определения влажности по месяцам

В результате для глубины 1м влажность в зависимости от α_c , $t_{\text{пр}}$, v_h и времени года (по месяцам) вычисляется по формуле:

$$v = \sum_{i=1}^2 v_i(m) \cdot \mu_i(m) = v_1(m) \cdot \mu_1(m) + v_2(m) \cdot \mu_2(m), \quad (20)$$

где $v_1(m) = v_h^{(m=10)}$ – влажность за октябрь, рассчитанная по (19), так как для рассматриваемого региона (средние широты) в зимние месяцы ($m=11, 12, 1, 2$) v не изменяется; $v_2(m) = v_h$ – влажность за теплые месяцы ($m=4 \div 10$).

Влажность грунтов, расположенных ниже 1м от поверхности, практически не зависит от климатических условий, а определяется уровнем грунтовых вод. Для разработки модели определения влажности грунта на этой глубине была использована лингвистическая переменная $h_{\text{КП}}$, высота капиллярного поднятия (водоподъемная способность): для песка эта величина составляет 0,5м, для супеси – 1м, для суглинка – 1,5м, для глины – 2,5м, причем высота и скорость подъема зависят от структуры грунта. В песчаных грунтах вода поднимается невысоко, но достаточно быстро: за 1–5 дней, а в глинистых – медленно: в течение 5–14 дней. Для моделирования влажности введена нечеткая переменная, «близость грунтовых вод», и определено два терма: первый – «рядом», с функцией принадлежности $\mu_1(h_{\text{ГВ}})$ и второй – «далеко», с $\mu_2(h_{\text{ГВ}})$. Следова-

тельно, будет два интервала: первый на промежутке $0 \leq h_{ГВ} \leq 0.8h_{КП}$ м; второй – $h_{ГВ} \geq h_{КП}$ м, а интервал переключения – $0.8h_{КП} \leq h_{ГВ} < h_{КП}$, м. Значение $0.8h_{КП}$ выбрано по той причине, что с этого расстояния от уровня воды грунт начинает «высыхать». Для термина «рядом» на первом интервале функция принадлежности $\mu_1(h_{ГВ}) = 1$, на втором $\mu_1(h_{ГВ}) = 0$, на интервале переключения:

$$\mu_1(h_{ГВ}) = 1 - \frac{h_{ГВ} - 0.8 \cdot h_{КП}}{0.2 \cdot h_{КП}}$$

Для термина «далеко» $\mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ})$ на этих же интервалах. Формула для определения v запишется следующим образом

$$v = \sum_{i=1}^2 v_i(h_{ГВ}) \cdot \mu_i(h_{ГВ})$$

Зависимость $v_1(h_{ГВ})$ построена по данным геологоразведочного центра в виде кривой, полученной при использовании метода наименьших квадратов, например для песка $v_1(h_{ГВ}) = 18 - 27 \cdot h_{ГВ}$, а $v_2(h_{ГВ}) = 4.5$ (4.5 – влажность естественного залегания песка в процентах). В результате модель определения влажности v грунтов выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} v_{\text{песок}} &= (18 - 27 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 4.5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{\text{супесь}} &= (23 - 19 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 3.8 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{\text{глина}} &= (50 - 12.8 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 18 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{\text{суглинок}} &= (45 - 25 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 7.5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь коэффициенты 18, 23, 50, 45 – это максимальная влагоёмкость песка, супеси, глины и суглинка соответственно. Адекватность модели подтверждается с помощью критерия Фишера, который равен 3.34 для сухого грунта и 3.59 для влажного, что выше табличного 3.26 (при уровне значимости $\alpha = 0.05$). Погрешность моделирования влажности не превышает 20% для сухих грунтов и 10% – для влажных. Результат работы модели представлен на рисунке 18.

На рисунке 15 приведены кривые, характеризующие удельное электрическое сопротивление слоев грунта в начале декабря (линия с маркерами) и в марте, в период активного снеготаянья (сплошная линия).



Рисунок 15 – Изменение удельного электрического сопротивления грунта по глубине залегания

Рисунок хорошо иллюстрирует падение ρ верхнего слоя земли практически до нуля в начале весны (сплошная линия) и возрастание ρ верхнего слоя земли в декабре, когда температура устойчиво держится ниже нуля (линия с маркерами). Глубина промерзания грунта в данной климатической зоне на уровне 1.4м. Поэтому ρ ниже этого уровня резко падает до величины, соответствующей положительным температурам. Во время активного снеготаянья или обильного дождя удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли резко падает, и потенциал, появившийся в случае аварии, может распространиться на значительное расстояние от места входа его в землю и привести к электротравматизму работающего персонала. Современные континентальные осадки имеют удельное сопротивление 1 – 3 Ом·м. В промышленных зонах удельное сопротивление талых вод и осадков меньше 1 Ом·м. Исходя из этих величин, по известным формулам был выполнен расчет распространения потенциала по поверхности земли от места его входа (см. рисунок 16).

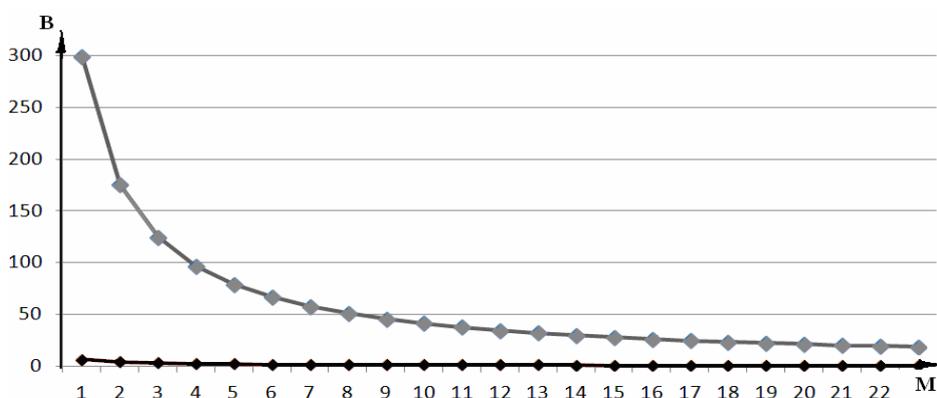


Рисунок 16 – Изменение потенциала на поверхности земли в случае замыкания фазы на землю в период активного снеготаянья (крупные маркеры) и при обычном увлажнении

Так, при попадании потенциала в 300В на землю из учета, что длина шага 0.8м опасным расстоянием от места входа потенциала будет 2.5 м, о чем должно быть сообщено по средствам общей связи. Опасным для прикосновения напряжением в данном случае будут обладать все проводящие электричество предметы на расстоянии в 9м от точки входа тока в землю. При обычном увлажнении опасного потенциала не возникает (рисунок 16, кривая с мелкими маркерами).

В шестой главе выполнен расчет экономического обоснования предлагаемых моделей для электротехнических комплексов рассматриваемого типа производств.

Экономический эффект от внедрения модели прогнозирования энергопотребления. Рассматриваемое производство относится к непрерывным, и при постоянном поддержании технологических параметров, которые представляют собой в основном концентрационные характеристики потоков технологических переделов, потребление электроэнергии им представляет собой квазипостоянную величину (для заводов средней мощности около 200МВт). Для таких предприятий, как правило, в ежегодно обновляемых договорах на покупку

электроэнергии указывается объем потребляемой электрической энергии и мощности на очередной год с помесечной разбивкой и почасовой детализацией.

Предлагаемый инструментарий позволит заранее рассчитать как величину энергопотребления при переходе на иные режимы, так и динамику его изменения, что позволит вовремя представить графики почасового потребления электроэнергии и тем самым уменьшить ее оплату.

Потребители розничного рынка с присоединенной мощностью более 750 кВт (к которым относится и рассматриваемое производство) с интервальным или интегральным учетом в случае возникновения отклонений фактически поставленного объема электрической энергии от договорного для каждого часа месяца поставки оплачивают помимо стоимости планового потребления и стоимость указанных отклонений, рассчитываемых по формуле:

$$S_{\text{откл}} = \sum_i^m S_i^{\text{откл}}, \quad (22)$$

где $S_i^{\text{откл}}$ – стоимость отклонений фактического объема потребления электроэнергии от указанного в договоре за час i , m – количество часов расчетного периода, рассчитываемая по формуле(23):

$$S_i^{\text{откл}} = \begin{cases} V_i^{\text{факт}} \times I_i \times (k_{\text{пов}} - 1), & \text{если } \frac{V_i^{\text{факт}} - V_i}{V_i} > 0.02 \\ V_i^{\text{факт}} \times I_i \times (1 - k_{\text{пониж}}), & \text{если } \frac{V_i - V_i^{\text{факт}}}{V_i} > 0.02 \\ 0, & \text{если } \left| \frac{V_i - V_i^{\text{факт}}}{V_i} \right| \leq 0.02 \end{cases} \quad (\text{руб}), \quad (23)$$

где V_i – договорной объем потребления электроэнергии, $V_i^{\text{факт}}$ – фактический объем, I_i – стоимость в объемах планового потребления. Коэффициенты $k_{\text{пов}}$ и $k_{\text{пониж}}$ рассчитываются следующим образом: если превышение электропотребления составляет менее 2%, то $k_{\text{пов}}=1$, если находится в пределах от 2% и до 5%, то $k_{\text{пов}}=1.5$, если в пределах от 5% и до 10%, то $k_{\text{пов}}=1.75$, а если превышение потребления более 10%, то $k_{\text{пов}}=2$. Если потребление электроэнергии оказывается ниже заявленного уровня менее 2%, то $k_{\text{пониж}}=1$, если находится в пределах от 2% и до 5%, то $k_{\text{пониж}}=0.45$, если в пределах от 5% и до 10%, то $k_{\text{пониж}}=0.35$, а если ниже более чем на 10%, то $k_{\text{пониж}}=0.25$.

При учете, что тариф на электроэнергию для диапазона присоединения СН-I 1.3833руб/кВт·час, и при условии договора представлять изменение энергопотребления не позднее, чем за 2 суток, был рассчитан эффект от применения предлагаемого инструментария при изменении ряда технологических параметров. Рассчитывалась величина стоимости отклонений фактического объема потребления электроэнергии от договорного по формулам (22-23).

На рисунке 17 представлены кривые планового и фактического энергопотребления, при смене параметра M_3 и кривые, отражающие цену энергопотребления при заранее представленном почасовом графике и без него. Если плановое энергопотребление 200 МВт·час, то за 2 суток (в предположении, что этого времени достаточно для определения нового уровня энергопотребления и передачи его поставщику электроэнергии) предприятие должно уплатить энерго-

снабжающей организации дополнительно помимо предварительно рассчитанных обязательств по договору поставки электроэнергии стоимость отклонений фактического потребления равную 13000 тыс.руб., рассчитываемую формул (22). В итоге предприятие должно уплатить 26000 тыс.руб. Расчет экономического эффекта по ряду параметров сведен в таблицу 1.

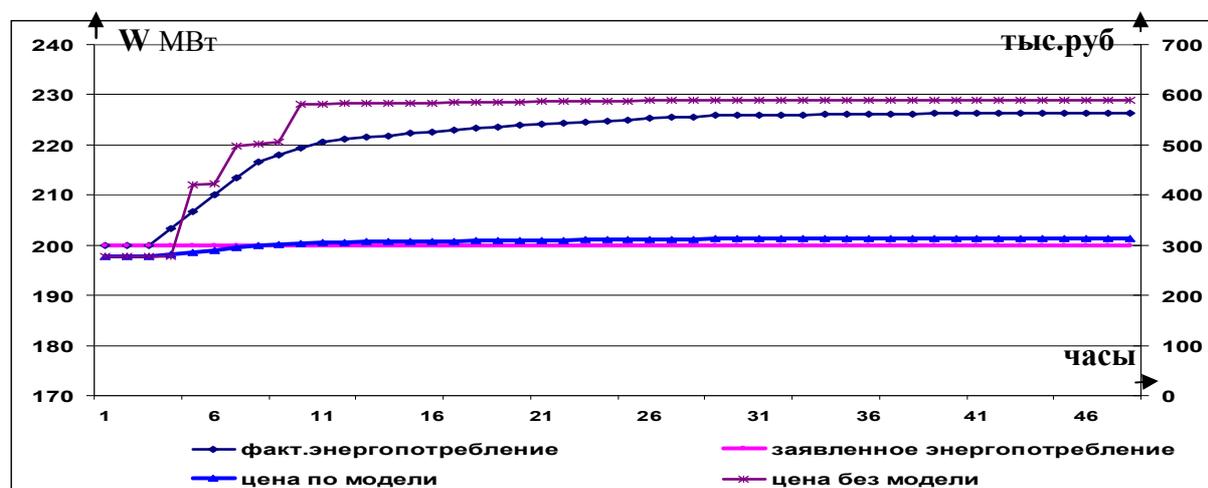


Рисунок 17 – Энергопотребление и его стоимость при отклонении от договорного объема при изменении параметра производства МЗ (алюминатного модуля) на +5% без применения модели почасового прогнозирования(—*) и с применением этой модели(—■)

Таблица 1 – Экономическая эффективность применения предлагаемой модели для ряда технологических параметров производства

Технологический параметр	Изменение параметра	$k_{пов} / k_{пониж}$	$S_{откл}$	S тыс.руб	S с планом	Эконом. эффект
МЗ	+5%	$k_{пов} = [1 \div 2]$	13100	26400	14700	26400-14700=11700
Расход боксита	+10%	$k_{пов} = [1 \div 1.75]$	9400	23000	14000	23000-14000= 8000
Расход боксита	-10%	$k_{пониж} = [1 \div 0.35]$	70000	20000	12400	20000-12400 = 7600
Концентрация щелочи В5	+4%	$k_{пониж} = [1 \div 0.45]$	6500	19800	12900	19800-12900= 6900
Концентрация щелочи В5	-4%	$k_{пов} = [1 \div 1.5]$	6300	19600	13660	19600-13660= 5940

Экономический эффект применения модели оперативного оптимального управления. Расчет экономического эффекта выполнялся исходя из уменьшения затрат на 1т готовой продукции по электроэнергии на 7% и пара на 11% по сравнению с режимом, когда управляемые параметры поддерживаются на уровне их среднего допустимого значения. Если расход электроэнергии и пара при этом режиме на 1т готового продукта составляет 500 кВт·час и 9.4т соответственно, то при цене на электроэнергию 1.38 руб/кВт·час и пара – 4800 руб/т экономический эффект составит 50руб + 4960 руб на одну тонну глинозема, или при средней производительности завода в 200тонн в сутки: $(4960+50) \cdot 200=1002$ (тыс.руб).

Экономический эффект от внедрения методики определения р. Расчет параметров заземления был выполнен для вертикальных одиночных электро-

дов (заземлителей) с приведением удельного электрического сопротивления слоев грунта к эквивалентному ρ с применением известной в практике проектирования заземлений формулы:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L}{d} \right) + 0.5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 0.515 \cdot L + L}{4 \cdot 0.515 \cdot L - L} \right) \right], \quad (24)$$

где R – сопротивление заземлителя, L – его длина, d – диаметр, ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, в котором находится заземлитель. По этой формуле, задаваясь значением ρ и d , было получено семейство кривых для определения длины заземлителя в зависимости от его сопротивления. Заземлитель рассчитывался с сопротивлением в 10 Ом.

При измеренном методом ВЭЗ в июле месяце $\rho_1 = 400 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ эквивалентное для вертикальных электродов длиной 5 м ρ по рекомендуемым в ПУЭ методикам равняется $457 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; сопротивление 10 Ом достигается только при длине электрода 75 м. При пересчете заземления в виде соединенных в замкнутый контур 11-ти одиночных электродов длиной в 5 м по расходу стали 13X15H4AM3 ГОСТ 5632-61 в 620 кг при цене стали 155000 руб за тонну уйдет 96100 рублей.

С применением предлагаемых моделей эквивалентное сопротивление $= 137 \text{ Ом} \cdot \text{м} \approx 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В этом случае требуемое сопротивление 10 Ом достигается при длине электрода в 22 м. В пересчете на сложный вид заземления, это 4 электрода, соединенных пластиной. Масса стали на изготовление такого заземления – 226 кг, ее стоимость – 34904 руб. Следовательно, экономия по металлу составит 394 кг, а экономический эффект от применения предлагаемой методики только по стоимости материала только на одно заземление составит: $96100 - 34904 \approx 61000$ руб.

Помимо единовременных затрат при проектировании заземляющих устройств на предприятиях рассматриваемого типа регулярно производят замеры удельного электрического сопротивления грунта в различные периоды года. Этот процесс весьма трудоемок и требует привлечения не менее двух специалистов – электриков. Годовой экономический эффект рассчитан посредством сравнения затрат на измерение удельного сопротивления грунта двумя электриками (549000 руб) и затратами по применению программы, реализующей предлагаемую модель ρ (400000 руб). Его величина только в первый год эксплуатации составила: $549500 - 400000 = 149000$ руб.

В седьмой главе приведены алгоритмы программных реализаций разработанных моделей, особенности применения математических методов, обоснование выбранных численных методов решения и описание работы программ: «Расчет энергопотребления нелинейным инерционным замкнутым производством», «Оптимальное управление энергоемким производством в зависимости от цен на энергоресурсы и сырье», «Расчет заземлений энергоустановок».

Перечисленные выше программы реализуют работу предлагаемых моделей, описанных в главах второй, третьей, четвертой и пятой. На рисунке 18 приведена блок-схема алгоритма работы программы «Расчет заземлений энергоу-

тановок», в которой реализованы модели четвертой и пятой глав настоящей диссертации.

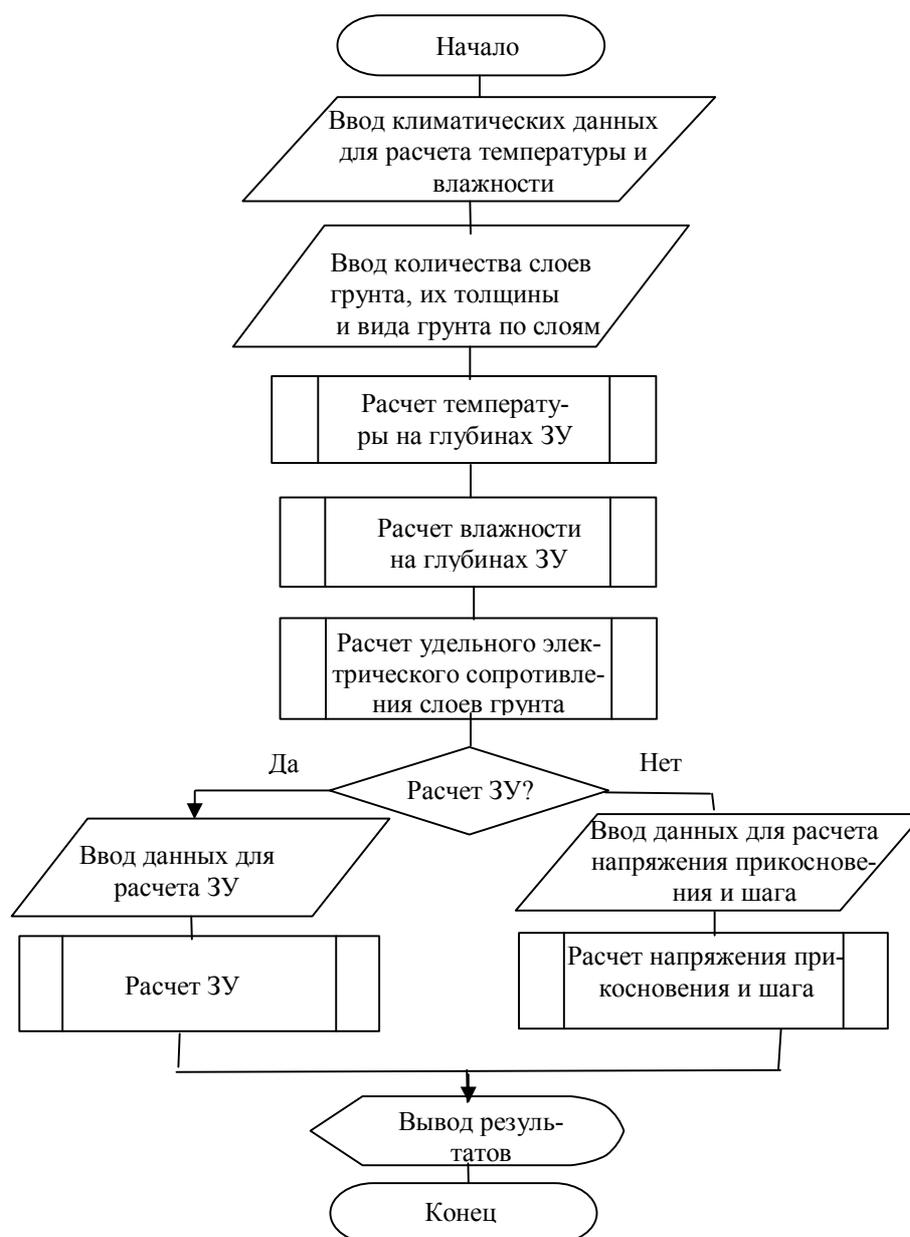


Рисунок 18 – Алгоритм работы программы расчета устройств заземления и напряжений прикосновения и шагового напряжения

Все программы разработаны в среде Turbo Delphi и могут работать под управлением операционной системы не ниже Windows XP. Входные данные представляют собой последовательность вводимых с клавиатуры значений или загрузку ранее записанных данных из файла с возможной их корректировкой. Количество вводимых новых данных не превышает 26 значений. Выходные данные выводятся на экран. Требование к оперативной памяти не выше 17 Мб. Скорость получения результата более 3 секунд.

Заключение

В работе дано решение крупной научно-технической проблемы энергоэффективного управления электротехническими комплексами непрерывных энергоемких производств, обладающих свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости. На основании выполненных исследований, автором предложена методология синтеза детерминированного и стохастического моделирования с применением методов искусственного интеллекта, позволяющая создать инструментарий, применение которого обеспечивает эффективное использование энергии и ресурсов для реализации различных технологических задач рассматриваемого класса производств в рамках установленных ограничений. Разработанные теоретические положения, объединенные общей концепцией комплексного подхода к синтезу подобных инструментариев, имеют важное теоретическое и практическое значение.

Основные выводы и результаты работы сводятся к следующему:

1. Показано, что для решения сложных задач технико-экономических задач рассматриваемого класса производств с учетом непрерывности, нелинейности, инерционности и замкнутости целесообразно использовать детерминированное моделирование основных технологических процессов и математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики.

2. Детерминированное моделирование объекта требует идентификации под существующие режимы функционирования объекта. На основании исследований определен критерий идентификации модели технологического процесса в статическом режиме, позволивший производить ее подстройку к реальным режимным параметрам производства автоматически. Исследованы методы: градиентный и случайного поиска на применимость в решении задачи идентификации.

3. Динамическая модель прогнозирования энергопотребления электротехнического комплекса электрооборудования рассматриваемого типа производства позволила впервые получить динамические характеристики всех выходных параметров рассматриваемого типа производства при скачкообразном изменении регулируемых параметров и параметров внешнего воздействия. С помощью динамической модели энергопотребления определены режимные параметры, изменение которых приводит к значительному увеличению или уменьшению энергопотребления (до 18%).

4. Анализ полученных динамических характеристик позволил сделать следующие выводы: а) в целом полученные результаты соответствуют данным, полученным опытным путем, б) средняя длительность переходного процесса для производства рассматриваемого типа – 5 суток, в) разные по форме и мощности колебания величин очевидным образом демонстрируют нелинейность зависимостей в производстве.

5. Предложена модель энергоэффективного управления рассматриваемым типом производства как технико-экономической системой с учетом планирования цен на энергоносители и сырье.

5.1. Показано, что поиск энергоэффективного режима функционирования рассматриваемого типа производства может быть выполнен с помощью решения многокритериальной оптимизационной задачи при установленных ограничениях, причем целевая функция должна строиться на основе детерминированного моделирования технологического процесса производства, чтобы в результате решения получить оптимальные значения управляемых параметров, обеспечивающих минимальное потребление энергии и ресурсов.

5.2. В виду того, что целевая функция оптимизационной задачи поиска энергоэффективного режима функционирования производства рассматриваемого типа не имеет аналитического вида, что затрудняет применение классических поисковых методов, рекомендовано использовать метод искусственного интеллекта – генетический алгоритм.

5.3. В ходе решения оптимизационной задачи поиска режима гидрохимического производства глинозема, обеспечивающего минимальные энергозатраты, определены значения технологических параметров, при которых снижается его электропотребление на 7% и пара – на 11% на одну тонну готовой продукции без снижения производительности производства.

6. В процессе разработки моделей для эффективной и безопасной эксплуатации электрооборудования рассматриваемого класса непрерывных производств на основе экспериментов получены функции принадлежности и нечеткие интервалы для таких параметров как: вид грунта, влажность, температура, засоленность, определяющие нечеткую модель удельного электрического сопротивления, учитывающую воздействие климатических факторов конкретной местности, где установлены заземляющие устройства.

7. Предложены нечеткие модели удельного электрического сопротивления грунта, позволяющие определить его значение в любое время года и на любой глубине с достаточной для практики точностью. Решение на основании этих моделей дает более точные результаты значений удельного электрического сопротивления слоев грунта по сравнению с пересчетом с помощью поправочных коэффициентов.

8. Предложена климатическая модель удельного электрического сопротивления грунта, позволяющая определить его величину в любое время года и на любой глубине, а расчет напряжения прикосновения и шагового напряжения на ее основе позволяет определить опасные значения этих величин в случае возникновения аварий при сильном увлажнении верхнего слоя грунта.

9. Получены экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления грунта от плотности, которые могут быть использованы при прогнозировании уменьшения сопротивления заземления после его ввода в эксплуатацию.

10 Разработанные программы позволяют автоматизировать процесс расчета по предлагаемым моделям

10.1. Программная реализация динамической модели энергопотребления ЭТК рассматриваемого типа производства позволяет заранее рассчитать величину энергопотребления, как его месячный объем, так и с почасовой детализацией при переходе на иные технологические режимы, что облегчает составле-

ние договора на поставку электроэнергии и позволяет избежать штрафов при отклонениях от оговоренной величины энергопотребления.

10.2. Проектирование устройств заземления с помощью предлагаемой климатической модели удельного электрического сопротивления слоев грунта дает экономию по металлу около 50%.

Разработанные теоретические положения в совокупности с практически результатами создают объективные предпосылки для внедрения в практику моделирования сложных процессов, определяющих объемы материальных и энергетических потоков с помощью синтеза детерминированных и стохастических моделей с применением методов искусственного интеллекта, позволяющих снизить энергетические затраты без снижения производительности технологического процесса. Разработанные модели и алгоритмы могут применяться для электротехнических комплексов гидрохимических производств, обладающих свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости. Представленные исследования и научные положения, связанные единой целью разработанной концепции, рассматриваются как решение научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение, отвечающее актуальной проблеме современности – эффективности управления и ресурсосбережения. Решение таких задач относится к приоритетным направлениям развития науки, определенным указом президента РФ от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

Направление дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования предполагают разработку моделей сложных технологических и природных процессов на основе синтеза детерминированных и стохастических моделей с применением искусственного интеллекта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. Kletsel, M. Ya. Automation of Calculation of Resistances of Grounds /M.Ya. Kletsel, N. M. Zaytseva, B. B. Issabekova // «World Applied Sciences Journal» (WASI). – 2013. – N 25(6). – pp. 921 - 926.
2. Zaytseva, N.M. Modeling of power consumption by nonlinear inertial production /N.M. Zaytseva // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, (MEACS). Tomsk. – 2014. – pp. 1 - 4.
3. Zaytseva, N. M. Increase of energy efficiency of alumina production on the basis of process modeling /N. M. Zaytseva// Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, (MEACS). Tomsk. – 2015. – pp. 1 - 4.
4. Zaitseva, N. M. Determination of soil parameters to calculate soil resistivity. /N. M. Zaytseva, B. B. Isabekova, and M. Ya Kletsel'// Russian electrical engineering. -2015. – N 86(5). – pp. 275 - 281.
5. Zaytseva, N. M. Solution of the Problem of Searching for an Energy-efficient Functioning Mode of a Continuous Production Using Simulation and Artificial Intelligence Meth-

ods/N. M. Zaytseva // Proceedings of 2016 International Conference APEIE. Novosibirsk. – 2016. – V. 2, pp. 250 - 254.

6. Manusov, V. Z. Analysis of Electrical Safety Conditions Taking into Account Soil Conductivity Determined on the Basis of Fuzzy Logic/ V. Z. Manusov, N. M. Zaytseva // Problemele energeticii regionale. Electroenergetica. – 2017. – N 2 – pp. 52 - 62.

7. Zaytseva, N. M. Increasing energy efficiency of asynchronous electric drive control by Takagi-Sugeno method. In Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), 17th International Ural Conference on. – IEEE, 2018. pp. 1 - 5.

8. Zaytseva N. M. Artificial Intelligence System to Determine Electrical Safety Level of Power Generation Facilities //2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2020. – pp. 1 - 6.

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ

9. Зайцева, Н.М. Оптимизация концентрационного режима глиноземного производства/ Н. М. Зайцева, Т. Б. Потапова //Цветные металлы. – 1996. – №2 – С. 74 - 77.

10. Зайцева, Н.М. Моделирование переходных режимов в кольце гидрохимических переделов глиноземного производства/Н. М. Зайцева, Т. Б. Потапова // Цветные металлы. – 1996. – №12. – С.77 - 79.

11. Зайцева, Н.М. Зависимости удельного сопротивления грунта от влажности и температуры /Н.М.Зайцева, Д.С. Зайцев, М.Я. Клецель//Электричество. – 2008. – № 9. – С.30 - 34

12. Зайцева, Н. М. Зависимость удельного сопротивления грунта от плотности/ Н. М. Зайцева, Д. С. Зайцев, Б. Б. Исабекова// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 5-6. – С. 138 - 141.

13. Зайцева Н. М. Расчет удельного сопротивления грунта с учетом колебаний его температуры. / Н. М. Зайцева, Б. Б. Исабекова, М. Я. Клецель // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – №1. – С. 84 - 86.

14. Зайцева, Н. М. Определение влажности грунта на глубине заземлителей /Н. М. Зайцева, Б. Б. Исабекова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – №2. – С.67 - 72.

15. Зайцева, Н. М., Определение температуры грунта на глубине заземлителей/ Н. Зайцева, Б.Б.Исабекова, М.Я. Клецель// Электричество. – 2011. – № 8. – С.19 - 25.

16. Зайцева, Н. М. Методика определения удельного электрического сопротивления слоев грунта в зависимости от климатических условий/ Н. М. Зайцева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2. – С.278 - 282.

17. Зайцева, Н. М. Экспериментальное определение удельного электрического сопротивления / Н. М. Зайцева, Б. Б. Исабекова //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока». – 2011. – №1. – С. 351 - 354.

18. Зайцева, Н. М. Оперативное управление нелинейным инерционным энергоемким производством / Н. М. Зайцева //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1-2. – С.161 - 165.

19. Зайцева, Н.М. Выравнивание графика электрической нагрузки для глиноземного производства / Н.М.Зайцева //Промышленная энергетика. – 2012. – № 8. – С. 19-22.

20. Зайцева, Н.М. Определение параметров грунта для расчета его удельного электрического сопротивления / Н.М.Зайцева, М.Я. Клецель, Б.Б.Исабекова // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 41 - 47.

21. Зайцева, Н.М. Решение ряда электроэнергетических задач с использованием методов искусственного интеллекта /Н.М.Зайцева//Омский научный вестник. – 2017.

– №4 – С55 - 59.

22. Зайцева, Н.М. Модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения его магнитной системы на основе метода Такаги – Сугено//Омский научный вестник. – 2018. – № 3. – С.52–58.

Монография

23. Зайцева, Н.М. Определение удельного электрического сопротивления грунта на основе использования нечеткой логики: Монография/ Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель.– Павлодар: Инновац. Евраз. ун-т. – 2014. – 151с.

Патент

24. Пат. 20839 Республика Казахстан, МПК7 G01R 19/145. Установка для определения электропроводности грунта / Н.М. Зайцева, Д.С. Зайцев; заявитель и патенто-обладатель ТОО «Инновационный Евразийский Университет»; № 2007/0959.1; заявл. 11.07.2007; опубл. 16.02.2009, Бюл. № 2. – 3 с.:ил.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

25. Расчет заземляющих устройств и удельного электрического сопротивления грунта в конкретных климатических условиях на основе нечеткой логики/ Н.М.Зайцева, П.В.Матренин; правообладатель ФГБОУВО «НГТУ»; № 2018615950; заявл. 28.03.2018; зарегистрировано 18.05.2018.

Другие работы автора

26. Зайцева, Н.М. Математическая модель оценивания целесообразности оптимизации режимов АСУТП глиноземного производства/Н.М. Зайцева, Т.Б. Потапова//Труды второй междунар. науч.-тех. конф. АПЭП-94. - Новосибирск. - 1994. – Т.2. – С.115 -117.

27. Зайцева, Н.М. Автоколебания в нелинейной системе, генерируемые математической моделью непрерывного производственного комплекса /Н.М. Зайцева, Т.Б. Потапова//Труды третьей междунар. науч.-тех. конф. АПЭП-96. – Новосибирск. – 1996. – С.45 - 47.

28. Зайцева, Н.М. Моделирование крупности гидроксида алюминия в производстве глинозема /Н.М. Зайцева, Т.Б. Потапова // Цветная металлургия. - 1997. - № 11– 12. - С.19 – 21.

29. Зайцева, Н.М. Моделирование автоколебаний крупности гидроксида алюминия в производстве глинозема /Н.М.Зайцева, Т.Б.Потапова //Программы и системы управления. – 1998. – №8. – С.1 – 5.

30. Зайцева, Н.М. Модель замкнутого гидрохимического производства как нелинейная диссипативная система. Методология разработки. /Н.М.Зайцева, Т.Б.Потапова//Программы и системы управления. – 1999. – №2. – С.9 – 14.

31. Зайцева, Н.М. Применение компьютерных технологий для идентификации моделей производства глинозема по способу Байера/Н.М.Зайцева//Труды международной научно-техн. конф. «Проблемы комплексного развития регионов Казахстана». – Алматы-ПГУ. – 1996. – Т.3. – С. 156 - 159.

32. Зайцева, Н.М. Опыт оптимального планирования ремонтного производства /Н.М.Зайцева//Сб. статей научн. конф. «II Сатпаевские чтения». – Павлодар. – 2002. – Т. 3. – С.185 - 191.

33. Зайцева, Н.М. Моделирование процесса, описываемого дифференциальным

уравнением, с применением методов нечеткой логики/Н.М.Зайцева// Сб. статей научно-практ. конференции «Уалихановские чтения». – Кокшетау. – 2003. – Т.3. – С.210-212.

34. Зайцева, Н.М. Разработка экспертной системы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений с применением нечеткой логики/Н.М.Зайцева, Б.Б. Жантлесова, А.Б. Жантлесова//Сб. статей научн. конф. «III Сатпаевские чтения». – Павлодар. – 2003. – Т. 7. – С.70-74.

35. Зайцева, Н.М. Модель удельного электрического сопротивления грунта /Н.М.Зайцева, Н.В. Пономарева //Сб. статей научн. конф. «Ержановские чтения». – Павлодар. – 2004. – С.513 - 516.

36. Зайцева, Н.М. Моделирование удельного сопротивления грунта с применением нечеткой логики/Н.М. Зайцева//Наука и техника Казахстана. – 2004. – № 2. – С.75-81.

37. Зайцева, Н.М. Разработка системы нечетких правил для модели удельного сопротивления грунта./Н.М. Зайцева, Д.С. Зайцев //Наука и техника Казахстана. – 2004. – № 3. – С.39 - 44.

38. Зайцева, Н.М. О формулах расчета удельного электрического сопротивления грунтов/Н.М. Зайцева, М.Я. Клецель //Вестник ПГУ. – 2005. – №3. – С.43-51.

39. Зайцева, Н.М. Информационная модель определения электрических характеристик заземления в зависимости от сезонных изменений в многослойной земле/Н.М. Зайцева, Д.С. Зайцев, А.Т. Кишубаева// Сб. статей научно-техн. конф. «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике». – Пенза. – 2005. – Т. 1. – С.123 - 127.

40. Зайцева, Н.М. Экспертная система расчета и прогнозирования параметров исследуемого объекта/Н.М. Зайцева, Б.Б. Жантлесова, А.Б. Жантлесова//Наука и техника Казахстана. – 2005. – № 3. – С.39 - 44.

41. Зайцева, Н.М. Разработка структуры математической модели стационарных процессов смешения компонентов шихты и спекания в глиноземном производстве/Н.М. Зайцева, Е.В. Шварцкопф //Вестник ПГУ. – 2006. – № 1. – С.65 - 75.

42. Зайцева, Н.М. Исследование статических характеристик модели приготовления шихты в глиноземном производстве/Н.М. Зайцева, Е.В. Шварцкопф //Наука и техника Казахстана. – 2006. – № 1. – С.31 - 38.

43. Зайцева, Н.М. Методология построения модели электропроводности грунтов на основе нечеткой логики./Н.М.Зайцева //Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2007. – №2. – С.45 - 53.

44. Зайцева, Н.М. Разработка температурно-влажностной модели однородного грунта/Н.М.Зайцева, Б.Б.Исабекова // Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2008. – №1. – С.182 -185.

45. Зайцева, Н.М. Моделирование оперативного управления замкнутым инерционным производством в современных условиях/Н.М.Зайцева //«Сборник научных докладов Всероссийской научно-практической конференции «Математические модели и методы в управлении, экономике и социологии». – Тюмень. – 2008. – С.152 - 156.

46. Зайцева, Н.М. Моделирование сопротивления заземлителей в многослойном грунте в зависимости от климатических условий/Н.М.Зайцева // XII-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы». Сборник тезисов. – Алушта, Крым. – 2008. – С.301 - 302.

47. Зайцева, Н.М. Моделирование годового колебания температуры в глубь грунта для расчета его электрического сопротивления/Н.М.Зайцева, Б.Б.Исабекова //XII-я Международная конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические

материалы». Сборник тезисов. – Алушта, Крым. – 2008. – С.303 - 304.

48. Зайцева, Н.М. Разработка программной реализации для определения сопротивления заземлителя/Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова//Сборник статей Всероссийской научно-техн. конф. «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность». – Омск. – 2008. – С48 - 52.
49. Зайцева, Н.М. Влияние уплотнения грунта на его удельное электрическое сопротивление /Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова//Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2009. – №1. – С.177 – 180.
50. Zaytseva, N.M. Technique of determination of ground temperature at a depth of grounding conductor/N.M. Zaytseva, B.B. Isabekova, M.Ya Kletsel'//13-th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology Electromaterials and Components. – Alushta. – 2010. – pp.51 - 52.
51. Zaytseva, N.M. Dependence of resistivity on density/N.M. Zaytseva, D.S. Zaytsev, B.B. Isabekova//13-th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology Electromaterials and Components. –Alushta. – 2010. – pp.52 - 53.
52. Зайцева, Н.М. Современное состояние технологии спекания и исследование моделей приготовления шихт в производстве глинозема./Н.М. Зайцева, Е.К. Каулина //Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2010. – №1. – С.82 - 84.
53. Зайцева, Н.М. Зависимость удельного электрического сопротивления от его влажности, температуры и плотности/ Н.М. Зайцева, Д.С. Зайцев, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель //Труды научной конференции «Образование и наука на XXI век – 2011». – Болгария, София. – 2011. – С. 82 -83.
54. Zaytseva, N.M. Modelling of power consumption of nonlinear inertial production/N.M. Zaytseva//Papers of the 2-nd International scientific conference «European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches» – Studgart, Germany. – 2013. – V. 3, pp. 28 - 31.
55. Зайцева, Н.М. Автоматизация расчета электрических характеристик заземлителей/Н.М.Зайцева, Б.Б. Исабекова//Вестник ПГУ. – 2013. – №1. – С.46 - 49.
56. Зайцева, Н.М. Программа для расчета сопротивлений заземлителей/Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова //Труды Всероссийской научно-техн. конф. с международным участием «Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта». – Омск. – 2013. – С.39 - 44.
57. Зайцева, Н.М. Прогнозирование энергопотребления узла нагрузки с энергоемким нелинейным производством/Н.М.Зайцева //Материалы XIX Всероссийской научно-техн. конф. «Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность». – Томск. – 2013. – С.62 - 65.
58. Зайцева, Н.М. Оптимальное управление энергоемким нелинейным производством на основе себестоимости его продукции/Н.М. Зайцева//Материалы IX Международной научно-техн. конф. «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования». – Вологда. – 2014. – С.81 - 85.
59. Зайцева, Н.М. Эффективность детерминированной модели энергопотребления нелинейного замкнутого производства/Н.М. Зайцева//Материалы трудов Всероссийской молодежной научной школы-конференции «Состояние и пути развития российской энергетики». – Томск. – 2014. – С.340 - 344.
60. Zaytseva, N.M. Efficiency of the determined model of power consumption by nonlinear closed slow-response production/N.M. Zaytseva//Applied Mechanics and Materials.

Trans Tech Publications, Switzerland. – 2015. – V.770. –pp. 561 - 565.

61. Манусов, В.З. Определение коэффициента уравнения кинетики разложения раствора в гидроксидическом производстве на основе нечеткой логики/В.З.Манусов, Н.М.Зайцева //Научный вестник НГТУ. – 2016. – №3. – С.7-15.

62. Манусов, В.З. Энергоэффективная модель управления асинхронного электропривода с учетом намагничивания на основе нечеткого логического вывода Такаги – Сугено /В.З. Манусов, Н.М. Зайцева, Д.В. Антоненков//Научный вестник НГТУ. – 2017. – №3. – С.31 - 48.

63. Зайцева, Н.М. Автоматизация определения уровня электробезопасности электротехнических комплексов с использованием нечеткой логики/Н.М. Зайцева //Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2019. – №3. – С.82 - 84.

64. Зайцева, Н.М. Построение оптимизационной модели энергоэффективного режима функционирования энергоемкого производства на основе нечеткого генетического алгоритма/Н.М. Зайцева//Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2019. – №4. – С.64 -72.

65. Зайцева, Н.М. Программная реализация определения уровня электробезопасности электротехнических комплексов с использованием нечеткой логики/Н.М. Зайцева//Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования.-2019. -№4.- С.37-41.

66. Зайцева, Н.М. Управление технологическим процессом сложного непрерывного производства на основе построения его энергоэффективной модели/Зайцева, Н.М.//Материалы V Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», Кемерово, 16 – 17 декабря 2020г. – С. 313-1 -313-6.

67. Зайцева, Н.М. Энергоэффективная модель управления технологическим процессом сложным непрерывным производством/ Зайцева, Н.М.//Материалы VI Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», Павлодар, Казахстан, 29 – 30 апреля 2021 г. – С. 93 – 98.

Работы [2, 3, 5, 7, 8, 16, 18, 19, 21, 22, 31 – 33, 36, 43, 45, 46, 54, 57 – 60, 63 – 67] выполнены автором единолично. В работах [1, 4, 6, 9 – 15, 17, 20, 23 – 30, 34, 35, 37 – 42, 44,47 – 53, 55, 56,61,62], написанных в соавторстве, автору принадлежит не менее 70% общего объема представленного материала, а именно, общая постановка проблем и задач исследований, обоснование математических моделей и методов решения

Подписано к печати 30.06.2022г.

Усл. печ. л. 1,00. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж 120 экз. Заказ № 223.

КузГТУ. 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.

650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А