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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:

Вадим Зиновьевич Манусов
доктор технических наук, профессор

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
1 Анализ методов моделирования параметров электротехнических комплексов непрерывных производств и постановка задач 16
1.1 Анализ методов и моделей определения и прогнозирования энергопотребления электротехнических комплексов предприятий 16
1.2 Особенности процесса электропотребления электротехнического комплекса с непрерывным производством и задачи управления его энергоэффективностью .. 40
1.3 Концептуальные задачи повышения эффективности функционирования и безопасности эксплуатации электротехнических комплексов 51
1.4 Основная концепция работы 68
2 Прогнозирование электропотребления электротехнического комплекса нелинейного непрерывного инерционного производства 72
2.1 Постановка задачи 72
2.2 Основы теории нечетких множеств 74
2.3 Балансовые уравнения статической модели нелинейного непрерывного производства 84
2.4 Выбор коэффициента дифференциального уравнения статической модели электропотребления на основе нечеткой логики 89
2.5 Обоснование выбора методов решения задач моделирования 92
2.6 Идентификация статической модели электропотребления электротехнических комплексов производства 99
2.7 Динамическая модель электропотребления электротехнического комплекса 117
2.8 Прогнозирование техногенных катастроф для данного типа производств 124
2.9 Выводы 128
3 Энергоэффективное управление производством рассматриваемого типа 131
3.1 Постановка задачи 131
3.2. Анализ методов искусственного интеллекта 133
3.2.1 Искусственные нейронные сети 133
3.2.2 Методы эволюционного программирования 143

3.2.3 Генетический алгоритм 145
3.2.4. Алгоритмы роевого интеллекта 162
3.3 Построение многокритериальной многопараметрической оптимизационной модели 167
3.4 Применение генетического алгоритма для решения многопараметрической оптимизационной задачи поиска энергоэффективного режима производства 174
3.5 Структура оптимального энергоэффективного управления рассматриваемым типом производства 182
3.6 Выводы 185
4. Экспериментальное построение моделей удельного электрического сопротивления грунта для эффективной и безопасной эксплуатации электротехнических комплексов 187
4.1 Постановка задачи 187
4.2 Нечеткие линейные модели 189
4.3 Построение концептуальной нечеткой модели удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от влажности 192
4.5 Построение модели ρ в зависимости от температуры в области отрицательных ее значений. 201
4.6 Построение модели ρ грунта в зависимости от плотности 204
4.9 Выводы 209
5 Разработка класса нечетких климатических моделей грунта для безопасной эксплуатации электротехнических комплексов 211
5.1 Постановка задачи 211
5.2 Статистика электротравматизма на промышленных предприятиях 213
5.3 Моделирование удельного электрического сопротивления грунта на глубинах заземлений с учетом климатических условий на основе метода Такаги-Сугено . 216
5.3.1 Моделирование температуры слоев грунта. 216
5.4 Построение модели влажности грунта на глубине заземления 225
5.5 Расчет заземлений на основе нечеткой модели ρ 236

5.6 Определение напряжения прикосновения и шага на основе предлагаемой модели удельного электрического сопротивления грунта 240
5.7 Выводы 242
6 Экономическое обоснование предлагаемых моделей для электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств 244
6.1 Постановка задачи 244
6.2 Расчет экономической эффективности от внедрения динамической модели прогнозирования электропотребления 245
6.3 Экономическая эффективность модели поиска оптимального режима управления производством 253
6.4 Экономический эффект внедрения программы предупреждения опасных напряжений прикосновения и шага в случае аварийных ситуаций с электрооборудованием и сетями 254
6.5 Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемой модели удельного электрического сопротивления грунта при проектировании заземлений 260
6.6 Выводы 267
7 Программные реализации предлагаемых моделей 269
7.1 Постановка задачи 269
7.2 Программа прогнозирования электропотребления электротехническим комплексом непрерывного инерционного производства 270
7.3 Программа оптимального управления энергоемким непрерывным производством в зависимости от цен на энергоресурсы и сырье 275
7.4 Программа расчета заземлений энергоустановок 283
7.5 Программа расчета напряжения прикосновения и шага в случае аварийных ситуаций на энергоустановках 297
7.6 Выводы 300
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 303
ЛИТЕРАТУРА 307
Приложение А. Таблицы для расчета энергопотребления производств 325

Приложение Б. Фрагмент листинга программы расчета энергопотребления ЭТК рассматриваемого типа производств 328
Приложение В. Акты внедрения научных разработок 333
Приложение Г.Авторское свидетельство и инновационный патент..... 339

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. 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 предъявляет 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 выше перечисленных 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 снеготаянья или в случае

техногенных аварий позволит избежать тяжелых поражений электрическим током работающего там персонала.

Степень разработанности темы исследования. 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 ЭТК 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 ЭТК 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 исследования. 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 моделирования. Вычисления выполнялись в MATLAB Simulink, MS Excel и в ходе работы

оригинальных программ, разработанных на языке Pascal, в среде программирования Turbo Delphi.

Научная новизна

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 технологических 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 и реализация разработок

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 производствам 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 (Казахстан);

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

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 электропотребления его электротехническим комплексом 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 Российских конференциях: на II, III и XIII Международных научно-технических конференциях АПЭП (г. Новосибирск, 1994, 1996, 2016 гг.); на I Международной (XI1 Всероссийской) конференции АЭП-95 (г. Санкт-Петербург, 1995 г.); на Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (г. Пенза, 2005 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Математические модели и методы в управлении, экономике и социологии» (г. Тюмень, 2008 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (г. Омск, 2008 г.); на XII, XIII и XIV Международных конференциях «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты» (Украина, г. Алушта, 2008, 2010, 2012 гг.); на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта» (г. Омск, 2013 г.); на XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность» (г. Томск, 2013 г.); на IX Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2014 г.); на Всероссийской молодёжной научной школы-конференции: «Состояние и пути развития российской энергетики» (г. Томск, 2014 г.); на VIII и IX Международных научно-технических конференция «Современные проблемы машиностроения»MEACS (г. Томск, 2014, 2015 гг.); на XVII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ACED (г. Екатеринбург, 2018 г.); на VI Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2020 г.).

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 прочих 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.

В приложении приведено 5 актов о внедрении разработок. В том числе, один акт от крупного промышленного предприятия, один – от проектной организации и три – от высших учебных заведений.

1 Анализ методов моделирования параметров электротехнических комплексов непрерывных производств и постановка задач

1.1 Анализ методов и моделей определения и прогнозирования энергопотребления электротехнических комплексов предприятий

Электротехнические комплексы (ЭТК) мощных энергоемких непрерывных производств, которым является и рассматриваемое гидрохимическое производство глинозема (рисунок 1.1), относятся к сложным технико-экономическим системам, которые в условиях острой конкурентной борьбы вынуждены вести постоянный поиск новых, экономически оправданных решений, а принятые распоряжением Правительства Российской Федерации Федеральный закон и Государственная программа по энергосбережению [1–9], создают энергопотребляющим предприятиям дополнительные рычаги поиска такого режима своего энергопотребления, который обеспечит минимальные затраты электроэнергии и стоимость ее приобретения [10–12].

Структурная схема электротехнического комплекса рассматриваемого в настоящей работе глиноземного производства приведена на рисунке 1.1. На схеме изображены основные технологические участки данного производства (восемь участков) и объемными стрелками показаны основные материальные потоки между ними. Элементы электротехнического комплекса данного производства содержат трансформаторную подстанцию с трансформатором 110/6кВ, компенсаторы, трансформаторы 6/0,4кВ, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также устройства заземления. Перечень электрооборудования ЭТК рассматриваемого производства приведен в таблице 1.1.

В непрерывных производствах основное электропотребление идет на перемещение и преобразование потоков вещества (размол, перемешивание, транспортировка и т.д.), проходящих по технологическим участкам. Это определяет специфику расчета энергопотребления подобных производств.

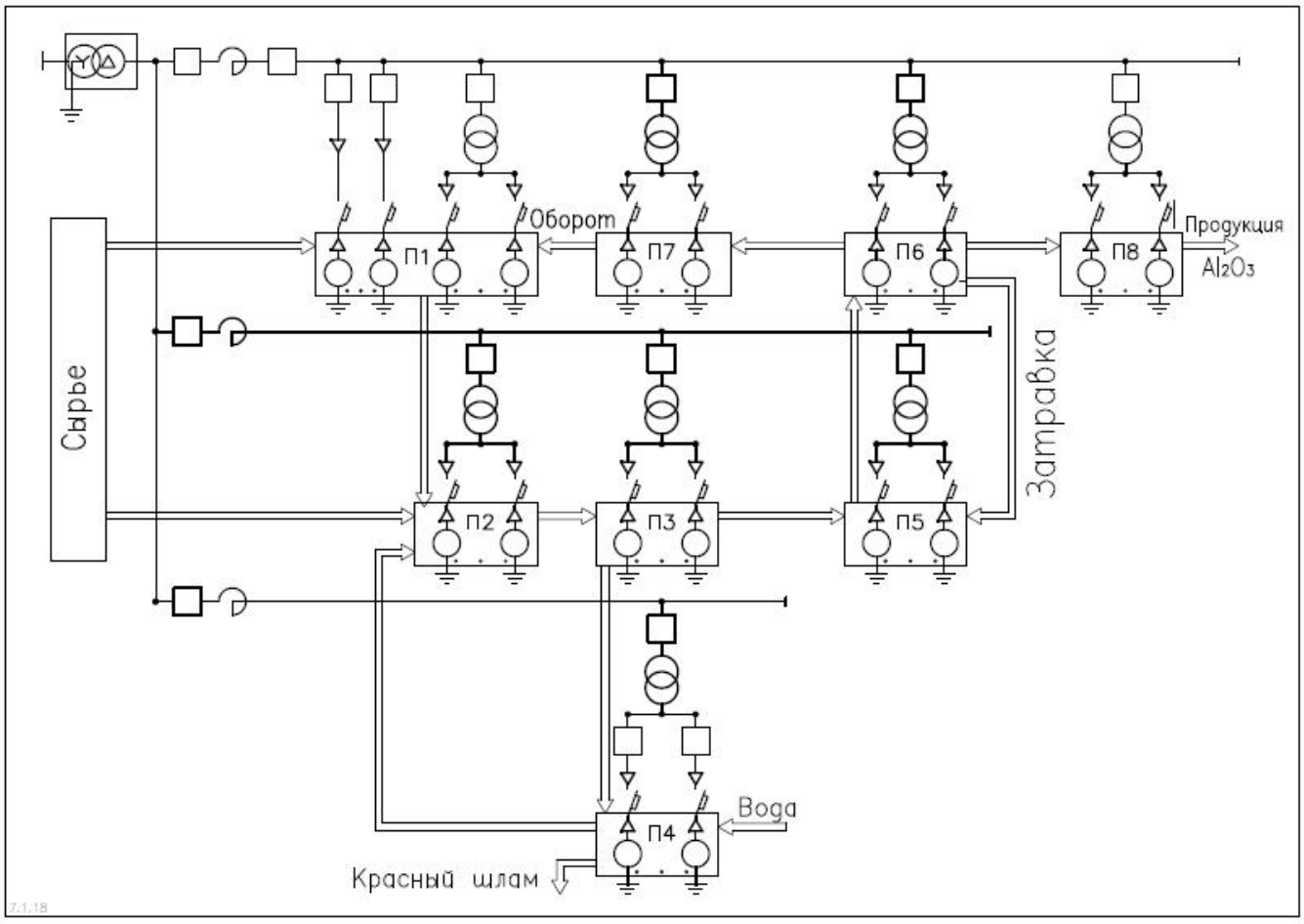


Рисунок 1.1 – Структурная схема электротехнического комплекса глиноземного производства

Таблица 1.1 – Мощности электрооборудования и коэффициенты их использования основных технологических переделов одного из заводов по производству глинозема

Название технологического передела	**Вид используемого оборудования**	**Установленная мощность, кВт**	**Коэффициент использования**
Передел №1			
Мельничная бокситовая нитка	Синхрон. эл. двигатель мельницы, асинхронные – вспомогательных агрегатов	7326	0.75
Мельница домола	Синхрон. эл. двигатель мельницы, асинхронные – вспомогательных агрегатов	3794	0.8
Передел №2			
Конвейер (ГМЦ+ЦПС)	Асинхронные двигатели	602	0.5

Продолжение таблицы 1.1

Схема вывода железистых песков	Асинхронные двигатели	3010	0.8
Узел приготовления целюлозно-бумажной пульпы	Асинхронные двигатели	735	0.8
Схема вывода каолинитовой фракции боксита	Асинхронные двигатели	1017.5	0.5
Передел №3			
Выщелачивание	Асинхронные двигатели	5629.5	0.75
6-ть промывателей	Асинхронные двигатели	4573	0.75
Сгущение диаметром 40	Асинхронные двигатели	1506	0.75
Сгущение диаметром 20	Асинхронные двигатели	2706.6	0.75
Передел №4			
Промывка	Асинхронные двигатели	1861	0.75
ФКШ	Асинхронные двигатели	4988.8	0.75
ФАР	Асинхронные двигатели	4655	0.75
Передел №5			
Вакуумное охлаждение	Асинхронные двигатели	2126	0.75
Декомпозиция №1	Асинхронные двигатели	667.5	0.7
Декомпозиция №2	Асинхронные двигатели	886.5	0.7
Передел №6			
Химчистка	Асинхронные двигатели	720	0.6
Гидросепараторы	Асинхронные двигатели	638	0,6
Гидроциклоны	Асинхронные двигатели	523.5	0.65
Сгущение БОГ-1	Асинхронные двигатели	323.7	0.8
Сгущение БОГ-2	Асинхронные двигатели	1018.1	0.8
Продукция	Асинхронные двигатели	2066.1	0.82
Затравка	Асинхронные двигатели	4448.4	0.7
Контрольная фильтрация	Асинхронные двигатели	1720	0.7
Передел №7			
Конденсатный узел	Асинхронные двигатели	800	0.87
Узел фильтрации	Асинхронные двигатели	250	0.85
Узел сгущения	Асинхронные двигатели	950	0.87
Выпарные батареи №1-8	Асинхронные двигатели	226, 195, 210, 196, 198, 190, 225, 215	0.85
Выпарные батареи №9-12	Асинхронные двигатели	220, 218, 230, 215	0.9
Передел №8			
Печная нитка №1	Асинхронные двигатели – дозаторы печей – эл. двигатели постоянного тока	559	0.4

Из множества существующих задач управления рассматриваемой технико-экономической системы, в которую входят задачи экономического характера, включающие определение стратегии закупки сырья и энергии, реализации готовой продукции, задачи технологического характера, определяющие режим функционирования самого производства и, в конечном итоге, потребление того же сырья и энергии, задачи управления человеческими ресурсами и др., выбран ряд нерешенных до настоящего времени задач, касающихся электротехнического комплекса. Первая проблема – прогнозирование объема электропотребления (мощности) при составлении договоров на покупку электроэнергии и прогнозирование электропотребления ЭТК 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. Вторая – поиск энергоэффективного режима работы рассматриваемого типа производства при существующем уровне цен на энергоресурсы и сырье и 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: повышения эффективности работы электрооборудования и электробезопасности его эксплуатации. Все эти проблемы объединяются системным подходом решения задачи: повышение эффективности, качества функционирования и безопасности электротехнических комплексов рассматриваемого класса производств.

Анализу существующих моделей и методов прогнозирования энергопотребления электротехническими комплексами производств, возможности применения этих моделей для рассматриваемого типа производства, а также поиску энергоэффективного режима функционирования данного производства посвящены первые два параграфа настоящей главы, а проблеме повышения качества функционирования и безопасности ЭТК рассматриваемого типа производств на основе устройств заземления – третий параграф настоящей главы.

Для определения и прогнозирования электропотребления (мощности) в настоящее время используются следующие методы [13–16]:

– эмпирические;

– метод упорядоченных диаграмм;

– статистические методы;

– методы вероятностного моделирования.

Эмпирические методы предполагают измерение значений электрических величин с помощью приборов и дальнейший расчет по этим показаниям. Среднее значение мощности за время Т определяется по следующей формуле [13–16]

$$P_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt \ , \qquad (1.1)$$

где $p(t)$ – фактическое измерение мощности во времени.

В качестве расчетной принимают среднюю нагрузку по активной мощности, где интервал реализации Т приравнивают к тройному значению постоянной времени нагрева T_0 =10 мин, т.е. Т=30 мин. Энергопотребление за получасовой интервал может быть вычислено по формуле [13–16]

$$W_{30} = \int_0^T p(t)dt = \sum_{i=1}^{10} P_{ср\,(i)} \cdot \Delta t = P_{max} \cdot t_{30} \ , \qquad (1.2)$$

где Δt – 3-х минутный интервал;

$P_{ср\,(i)}$ – средняя мощность за i-ый 3-х минутный интервал;

P_{max} – расчетный максимум мощности за получасовой интервал.

В настоящее время технически возможно определять эту величину, начиная с любого момента времени, что целесообразно при выработке стратегии энергоуправления предприятием. Годовое электропотребление 6УР, 5УР, 4УР электроснабжения предприятий может быть определено следующим образом [13 – 16]

$$W_{Г} = P_{ср} \cdot T_{Г} \ , \qquad (1.3)$$

где $T_{Г}$ – годовой фонд рабочего времени (часы) в году.

Для инженерных расчетов электрических нагрузок используются различные коэффициенты, значения которых приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Коэффициенты для расчета электрических нагрузок

№ п/п	Коэффициент	Обозначение	Один потребитель	Группа потребителей
1	Использования	$K_и$	$k_и = \frac{P_{ср}}{P_{ном}}$	$K_и = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_{и\,i} P_{ном\,i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}}$
2	Включения	$K_в$	$k_в = \frac{t_в}{t_П}$	$K_в = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_{в\,i} P_{ном\,i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}}$
3	Загрузки	$K_З$	$k_З = \frac{P_{св}}{P_{ном}} = \frac{k_и}{k_в}$	$K_З = \frac{P_{св}}{P_{ном}}$
4	Формы	$K_ф$	$k_ф = \frac{P_{ск}}{P_{ср}}$	$K_ф = \sqrt{m} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (\Delta w_{a\,i})^2}}{W_a}$
5	Спроса	$K_с$	$k_с = \frac{P_р}{P_{ном}}$	$K_с = \frac{P_р}{P_{ном}}$
6	Максимума	K_{max}	$k_{max} = \frac{P_р}{P_{ср}}$	$K_{max} = \frac{P_р}{P_{ср}}$
7	Равномерности максимума нагрузки	$K_{p\,max}$	-	$K_{p\,max} = \frac{P_р}{\sum_{i=1}^{n} P_{pi}}$

В таблице 1.2 приняты следующие обозначения:

$P_{ср}$ – средняя мощность одного или нескольких приемников;

$t_в$ – время включения приемника в течение производственного цикла $t_П$;

$P_{св}$ – средняя мощность одного или нескольких приемников за время включения $t_в$;

$P_{ск}$ – среднеквадратичная мощность приемника;

$W_a, \Delta w_a$ – расход электроэнергии за период T или Δt соответственно.

Средняя мощность $P_{срmax}$ за наиболее загруженную смену группы приемников электроэнергии одинакового режима работы определяется путем умножения установленной мощности рабочих приемников электроэнергии $P_{ном}$

(для приемников повторно-кратко-временного режима – приведенной к ПВ=100%) на их характерный коэффициент использования $k_и$ [13–16]

$$P_{ср\,max} = k_и \cdot P_{ном}\,. \qquad (1.4)$$

При наличии удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ по выпускаемой продукции (таблица 1.3) в натуральном выражении и объеме F [13–16]

$$P_{ср\,max} = W_{уд} \cdot F / T\,, \qquad (1.5)$$

где T – продолжительность смены (часы).

Таблица 1.3 – Удельные расходы электроэнергии по ряду отраслей. Единица измерения вида продукции – т (тонны)

Вид производства	**Удельный расход электроэнергии, кВт ч**
Цветная металлургия	
Добыча медной руды	12
Переработка медной руды	31,2
Произв-во черновой меди	762,8
Произв-во рафинированной меди	547,9
Добыча никелевой руды	50,8
Переплав никелевой руды	753
Добыча свинцово-цинковых руд	34,6
Произв-во глинозема	691,5
Произв-во алюминия	17527,6
Произв-во свинцово-цинковых руд	39,1
Прокат цветных металлов	1371
Химическая и нефтехимическая промышленность	
Сода каустическая	3281
Целлофан	2942
Капролактан	4119,9
Каучук синтетический	1000-2643
Аммиачная селитра	143
Калийные удобрения	200,6
Синтетические смолы и пластмассы	1283-1583
Жидкое стекло	70,5
Карбид кальция	3058-4328
Химические волокна	4952,7
Водород	6706

Годовой расход электроэнергии для отдельных цехов и предприятия в целом [13 – 16]

$$W = K_{и} \cdot P_{ном} \cdot T_{Г}, \quad (1.6)$$

где $К_{и}$ — среднее значение коэффициента использования активной мощности за год.

Метод упорядоченных диаграмм. Эмпирический метод (формулы 1.1–1.6) дает значительные погрешности при определении энергопотребления, так как не использует информацию об особенностях технологического процесса конкретного производства и режимов работы его электроприемников. Этого недостатка лишен метод упорядоченных диаграмм, для которого исходными данными для определения расчетной мощности служит перечень приемников электроэнергии с указанием их номинальной мощности, назначения механизма или технологической установки, режима работы и числа фаз. При этом все приемники электрической энергии разбиваются на характерные группы с близким режимом работы (таблица А.1) и по каждой группе определяется суммарная номинальная мощность $P_{ном} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}$, в которую входят мощности только рабочих (не резервных) механизмов (таблица 1.1). Расчет производится всегда за наиболее загруженную смену по формуле [13–17]

$$P_{Р} = K_{max} \cdot P_{ср\,max} = K_{max} \cdot K_{и} \cdot P_{ном} \quad (1.7)$$

В последнее время метод упорядоченных диаграмм трансформировался в расчет по коэффициенту расчетной мощности, заключающегося в том, что K_{max} заменяется на $K_{Р}$ (таблица 1.4). Его применяют для расчета элементов системы электроснабжения 2УР, 3УР (нагрузка до 1кВ) при наличии данных о числе электроприемников, их мощности и режиме работы и упрощенно для сети 6 –10кВ (4УР) для эффективного числа приемников цеха предприятия.

Групповой коэффициент использования находится по формуле

$$K_{и} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ср\,i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}}, \qquad (1.8)$$

где $P_{ном\,i}$ – установленная мощность подгруппы, а эффективное число электроприемников в группе [13]

$$n_{эф} = \frac{(\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i})^2}{\sum_{i=1}^{n} (P_{ном\,i})^2}, \quad \text{и упрощенно} \quad n_{эф} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}}{P_{ном\,(max)}} \qquad (1.9)$$

Таблица 1.4 – Значения расчетного коэффициента активной мощности $K_{Р} = f(n_{э}, K_{и})$ для сетей до 1 кВ ($T_0 = 10$ мин)

$n_{эф}$	**Расчетный коэффициент активной мощности K_P для значений $K_и$**				
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
2	8,00	4,00	2,66	1,60	1,14
4	3,42	2,00	1,53	1,24	1,08
6	2,64	1,62	1,28	1,12	1,01
8	2,37	1,48	1,19	1,08	1,00
10	2,18	1,39	1,13	1,05	1,00
12	2,04	1,32	1,08	1,03	1,00
16	1,85	1,23	1,02	1,00	1,00
20	1,72	1,16	1,00	1,00	1,00
24	1,62	1,11	1,00	1,00	1,00
30	1,51	1,05	1,00	1,00	1,00
50	1,30	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00

При этом допускается исключать электроприемники, суммарная мощность которых не превышает 5% номинальной мощности рассматриваемой группы. Определение $K_{Р}$ выполняется по справочным данным (таблица 1.4) в зависимости от величин $K_{и}$ и $n_{эф}$, вычисленным с помощью (1.8) и (1.9) и постоянной времени нагрева T_0.

Расчетный максимум мощности определяется с помощью соотношения

$$P_{Р} = P_{max} = K_{Р} \sum_{i=1}^{n} P_{ср\,i}. \qquad (1.10)$$

Расчетная максимальная мощность группы электроприемников P_{max} может быть также найдена упрощенно по уравнению [13]

$$P_{max} = K_{max} K_и P_{ном} = K_{max} P_{срсмен}, \quad (1.11)$$

где $P_{ном}$ – групповая номинальная мощность (сумма номинальных мощностей, за исключением резервных по расчету электрических нагрузок);

$P_{ср\ смен}$ – средняя активная мощность за наиболее загруженную смену.

Статистические методы определения мощности. Метод упорядоченных диаграмм формулы (1.7–1.11) громоздок и нередко дает большую ошибку. Определение $P_{ср\ смен}$ для ряда действующих предприятий осложняется трудностью выбора наиболее загруженной смены (перенос начала работы разных категорий работников в пределах смены, четырехсменная работа и др.). Ограничения со стороны энергосистемы ведут к режимам, когда максимум нагрузки P_{max} имеет место в одной смене, а расход электроэнергии больше в другой. Таким образом, при определении $P_Р$ нужно отказаться от $P_{срсмен}$, исключив промежуточные расчеты. Ошибки накапливаются от уровня к уровню. Происходит простое суммирование мощностей и коэффициентов в соответствии с выражениями (1.8) – (1.9), хотя электроприемники оказываются из разных групп.

Статистические методы [15–22] основаны на измерении мощности линий, питающих характерные группы электроприемников, без обращения к режиму работы отдельных электроприемников и к числовым характеристикам индивидуальных графиков. Данные методы используют две интегральные характеристики: генеральную среднюю нагрузку $P_{ср}$ и генеральное среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{D_{P_{max}}},$$

где дисперсия $D_Р$ берется для того же интервала осреднения.

Максимум мощности [15–18]

$$P_{max} = P_{ср} + \beta\sigma, \quad (1.12)$$

где β – статистический коэффициент, зависящий от закона распределения и принятой вероятности превышения по графику нагрузки $P(t)$ уровня P_{max} $\sigma = \sqrt{P_э^2 - P_{ср}^2} = \sqrt{D_P}$ или $\sigma = P_{ср}\sqrt{K_ф - 1}$ при введении коэффициента формы $K_ф = P_э / P_{ср}$.

Для построения группового графика используются данные о графиках нагрузки. При отказе от графиков производятся измерения максимальных нагрузок ежедневно, за неделю (или другие периоды) и методами математической статистики определяется $P_{ср}$ (как математическое ожидание) и дисперсия (как центральный момент второго порядка).

Значение β принимается различным. В теории вероятности [19–21] используется правило трех сигм: $P_{max} = P_{ср} \pm 3\sigma$, что при нормальном распределении соответствует предельной вероятности 0,9973. Вероятности превышения нагрузки на 0,5 % соответствует $\beta = 2{,}5$, для $\beta = 1{,}65$ обеспечивается вероятность ошибки 5 %.

Статистические методы можно отнести к надежным методам изучения нагрузок действующего промышленного предприятия, так как они обеспечивают относительно верное значение заявляемого промышленным предприятием максимума нагрузки $P_{э\,max}$ в часы его прохождения в энергосистеме. При этом допускается нормальное распределение работы электроприемников.

Методы вероятностного моделирования. Вероятностное моделирование графиков нагрузки предполагает непосредственное изучение вероятностного характера последовательных случайных изменений суммарной нагрузки групп электроприемников во времени и основан на теории случайных процессов [19 - 22], с помощью которой получают автокорреляционную (1.13) взаимно корреляционную (1.14) функции и другие параметры [18–22]

$$kp(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - p_{ср})(p(t+\tau) - p_{ср})dt \qquad (1.13)$$

$$kp_{vs}(t) = \frac{1}{t_ц} \int_0^{t_ц - t} p_v(t) \times p_s(t + t)dt + \int_{t_ц - t}^{t_ц} p_v(t) \times p_s(t - t_ц + t)dt - p_{ср(v)} \times p_{ср(s)} \qquad (1.14)$$

Исследование графиков работы электроприемников большой единичной мощности, графиков работы цехов и предприятий с дискретным производством позволяют использовать данный метод при управлении режимами электропотребления предприятия и выравнивания графиков нагрузки.

Прогнозирование электропотребления. Технологические процессы потребления электроэнергии подчиняются циклическим, функциональным и случайным тенденциям (рисунок 1.2.). Циклические зависимости [26] составляют приблизительно около 70% всех отклонений в процессе потребления электроэнергии. К примеру, одними из наиболее существенных циклических факторов практически во всех производственных процессах дискретных производств (непрерывные производства не имеют подобного характера потребления) являются время суток, день недели.

Закономерности функционального характера являются вторым из основных изучаемых факторов при прогнозировании энергопотребления [22–30], их долевое участие составляет приблизительно 10 – 20% от всего объема отклонений. В эту группу включаются отклонения, объясняемые известными факторами производства: объемом поставок сырья, объемом самого производства, температурой воздуха или теплоносителя, давлением газа, и т.д. Для производств, носящих непрерывный характер, эти закономерности функционального характера являются основными при разработке прогноза энергопотребления.

И, наконец, случайные тенденции [22], составляющие третью компоненту прогноза: их долевое участие в общем процессе невелико, но амплитуда отклонений может быть довольно значительна. Например, внезапная остановка цеха предприятия ввиду аварии или резкая смена качества сырья в химическом производстве. Поэтому для случайных тенденций определяются вероятностные характеристики соответствующих явлений: если такое событие, как внезапная остановка цеха, случается крайне редко, то снижение потребляемой нагрузки в

предпраздничные дни можно определить как отдельный процесс и разработать для него систему понижающих коэффициентов.

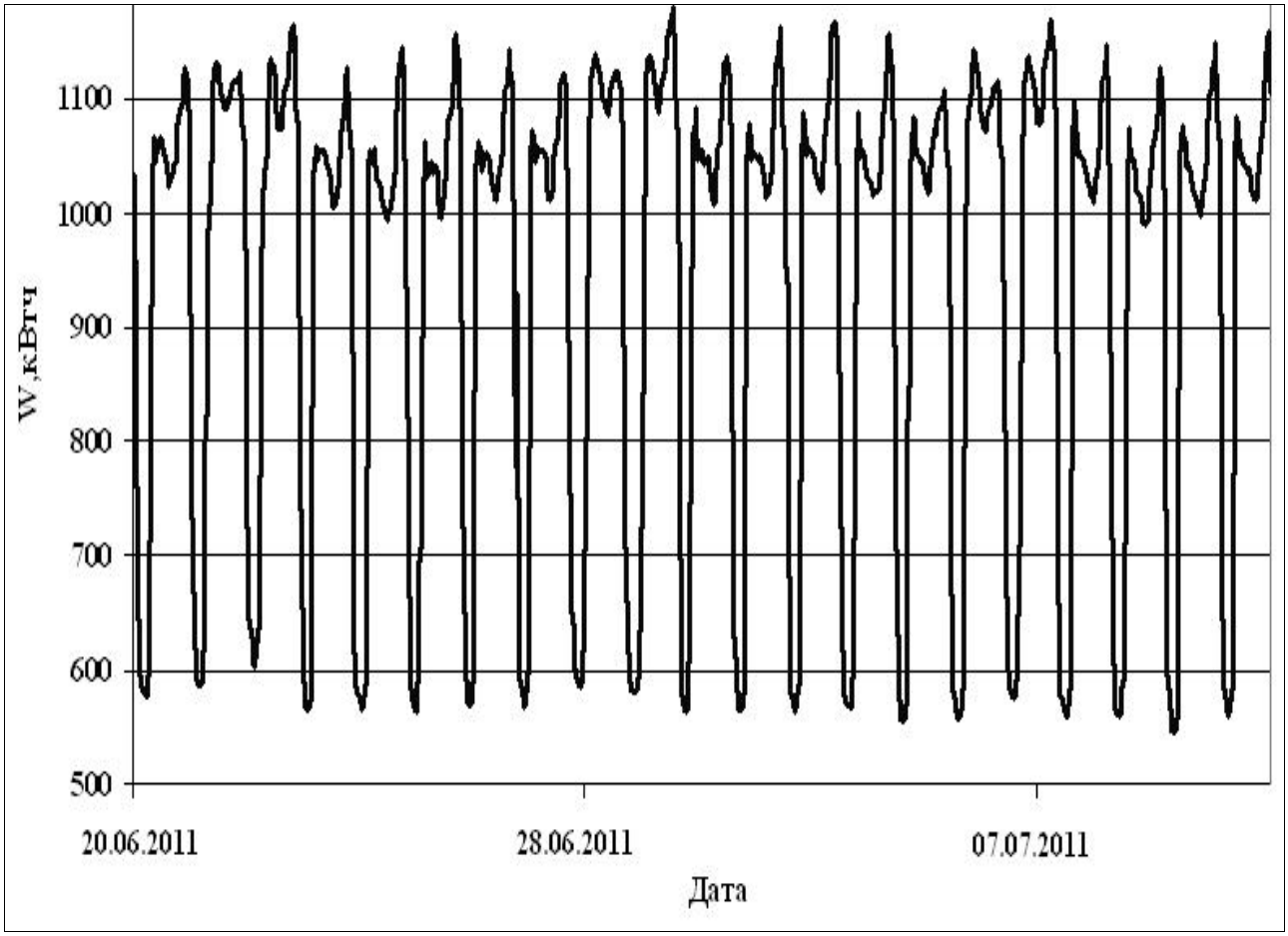


Рисунок 1.2 – График энергопотребления насосной станции

Существующие методы прогнозирования электропотребления можно разделить на две основные группы [15]:

– методы, в которых потребление электрической энергии рассматривается как детерминированный процесс;

– методы, основанные на предположении о вероятностном характере электропотребления.

К первой группе относят методы, основанные на определении коэффициентов пропорциональности между ростом электропотребления и другим показателем развития предприятий (выпуск продукции, производительности труда и др.). Прогнозируемый уровень энергозатрат [15]

$$W_n = W_{n-1}X + W_{n-1}Y\frac{F_n}{F_{n-1}}. \qquad (1.15)$$

Представлен двумя составляющими, одна из которых W_nX – равна потреблению энергии за год, предшествующий планируемому, умноженному на постоянную X, не зависящую от объема производства, а вторая $W_{n-1}Y\frac{F_n}{F_{n-1}}$ – произведение переменной составляющей, зависящей от объема производства, на отношение коэффициента прироста объема продукции за планируемый год к объему продукции за год, предшествующий планируемому. Величину Y определяют из выражения [15]

$$Y = \frac{W_{n-1} - W_{n-2}}{W_{n-2}\left(\frac{F_{n-1}}{F_{n-2}} - 1\right)}, \qquad (1.16)$$

где W_{n-1}, W_{n-2}, F_{n-1}, F_{n-2} – соответственно потребление электроэнергии и объем выпуска продукции за год, предшествующий планируемому, и за два года.

Постоянная величина X находится как разность X = 1- Y. Подобные методы расчета наглядны, могут применяться для сопоставления, сравнительного анализа, но поскольку они дают весьма приближенные результаты, то для перспективных расчетов практически их не используют.

Методы второй группы, основанные на предположениях о вероятностном характере электропотребления, объединяют в своем составе самые разнообразные способы прогнозирования, которые базируются на принципах и законах теории вероятностей и математической статистики [30–35]. К подобным методам можно отнести методы прогнозирования с помощью скользящей средней, метод экспоненциального сглаживания, метод адаптивной фильтрации, метод с использованием цепей Маркова и некоторые другие.

По существу методы прогноза с помощью скользящей средней, экспоненциального сглаживания и адаптивной фильтрации основаны на общем положении, что результат прогнозирования получается путем суммирования взвешенных результатов прошлых наблюдений [30–35]

$$W_{t+1} = \sum_{i=1}^{N} S_i X_i , \qquad (1.17)$$

где W_{t+1} – прогноз на период t + 1;

S_i – вес, назначенный для i-го наблюдения;

X – наблюдаемая величина;

N – число периодов (наблюдений и весов), используемых при вычислении W_{t+1}.

Выражение (1.17) носит общий характер и в зависимости от того, каким образом назначается значение весов S_i и количество наблюдений N, может соответствовать различным методам прогнозирования. Так, например, методу с использованием скользящей средней соответствует однозначное назначение числа N наблюдений, а затем назначение одинаковых величин S_i равных 1/N.

Простое скользящее среднее, или арифметическое скользящее среднее численно равно среднему арифметическому значений исходной функции за установленный период и вычисляется по формуле [30–35]

$$W_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-i} w_{t-i} , \qquad (1.18)$$

где W_t – значение простого скользящего среднего в точке t;

n – количество значений наблюдаемой в точке t-i величины w_{t-i} энергопотребления для расчёта скользящего среднего (сглаживающий интервал), чем шире сглаживающий интервал, тем более плавным получается график функции.

Иногда, при построении скользящей средней, некоторые значения исходной функции целесообразно сделать более значимым. Например, если предполагается, что внутри интервала сглаживания имеет место нелинейная тенденция, или последние, более актуальные данные могут быть весомее предыдущих, применяется метод взвешенного скользящего среднего, при вычислении которого вес каждого члена исходной функции, начиная с меньшего, равен соответствующему члену арифметической прогрессии. То есть последние значения исходной функции более значимы, чем предыдущие, причём функция значимости линейно убывающая.

Например, для арифметической прогрессии с начальным значением и шагом, равным 1, формула вычисления скользящей средней примет вид [30–35]

$$W_t = \frac{2}{n \cdot (n+1)} \sum_{i=0}^{n-i} (n-i) \cdot w_{t-i} . \qquad (1.19)$$

В методе простого экспоненциального сглаживания более старым наблюдениям приписываются экспоненциально убывающие веса, при этом, в отличие от скользящего среднего, учитываются все предшествующие наблюдения ряда, а не те, что попали в определенное окно. Точная формула простого экспоненциального сглаживания имеет следующий вид [30–35]

$$W_t = \alpha \cdot w_t + (1-\alpha) \cdot W_{t-1} . \qquad (1.20)$$

Когда эта формула применяется рекурсивно, то каждое новое сглаженное значение, являющееся прогнозом, вычисляется как взвешенное среднее текущего наблюдения и сглаженного ряда. Очевидно, результат сглаживания зависит от параметра α. Если α равно 1, то предыдущие наблюдения полностью игнорируются. Если α равно 0, то игнорируются текущие наблюдения. Значения коэффициента сглаживания выбирается из условия: $0 > \alpha > 1$.

В методе экспоненциального сглаживания, использующем все прошлые наблюдения, веса назначаются дифференцированно, при этом вес последнего наблюдения есть $S_i = \alpha$, а вес всех предыдущих наблюдений равен [22,23,30–35]

$$S_{t-i} = \alpha(1-\alpha)^i . \qquad (1.21)$$

Прогностическая оценка находится по выражению [22,23,30–35]

$$W_{t+1} = \alpha \cdot W_t + \alpha(1-\alpha) W_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 W_{t-2} + ... + \alpha(1-\alpha)^i W_{t-i}, \qquad (1.22)$$

где W_{t+1} – прогноз на следующий (за наблюдаемым) отрезок времени;

W_{t-i} – значение исследуемого параметра, наблюдавшееся i-периодов назад (по отношению к рассматриваемому моменту времени).

В методе адаптивной фильтрации с помощью процедуры поиска итеративного характера отыскивается такой набор весов S_i, который минимизирует среднеквадратическую ошибку прогноза. Начальные значения весов S_i назначаются

произвольно, а затем, с помощью константы обучения k, корректируются в направлении минимизации среднеквадратической ошибки.

Помимо частных недостатков (трудность определения оптимальных значений α – параметра сглаживания, k – константы обучения и некоторых других) данным способам присущ общий недостаток, заключающийся в идейном содержании методов – прогноз осуществляется по собственной предыстории показателя без вскрытия причин развития и представляет собой прямую экстраполяцию. То есть на основе этих методов невозможно установление зависимостей уровня электропотребления от изменения основных технологических показателей производства.

Использование для целей прогнозирования временных рядов [23,34,35] изменения расхода электроэнергии (трендовые и авторегрессионные модели) не всегда оправданно, так как описание тенденции изменения только с помощью функции времени означает, что время – единственная причина изменения электропотребления. На самом деле развитие того или иного явления определяется множеством внутренних причин и фактор времени аккумулирует их влияние, поэтому модель тренда не вскрывает причин изменения, а носит чисто описательный характер.

Поэтому при прогнозировании электропотребления на уровне цехов и предприятия в целом, необходимо учитывать как влияние на расход электроэнергии технологических показателей производства, так и характер изменения этих показателей во времени, т.е. использовать методы многофакторного динамического прогнозирования.

Прогнозирование расхода электроэнергии с учетом динамики технологических и энергетических показателей. Общий характер и динамика электропотребления в условиях промышленного производства нарушаются действием различных случайных факторов, но отклонения от общей тенденции могут иметь свои закономерности, которые необходимо определить [36–45]. Можно выделить следующие подходы к поиску наилучшего способа описания динамики показателей:

– строится многофакторная модель электропотребления на основе выбранных технологических показателей;

– в многофакторную модель электропотребления помимо технологических показателей вводят временные признаки;

– строят многофакторные модели для каждого года исследуемого периода, изучают динамику коэффициентов уравнений регрессии и строят прогнозную модель.

Реализация первого метода предполагает исследование факторов производства на коррелированность с уровнем его энергопотребления. Факторы, имеющие высокое значение коэффициента корреляции выбираются для построения прогнозной зависимости. Далее выбирается вид зависимости. Чаще всего выбирается линейная форма модели, а затем с помощью метода наименьших квадратов [36–46] определяются значения коэффициентов.

Так, например, для предприятий трубопроводного транспорта нефти прогнозирование и нормирование энергопотребления может производиться с использованием многофакторной регрессионной модели [40,42,44], где в качестве факторов выбираются грузооборот нефти, ее вязкость, эквивалентный диаметр нефтепровода [40,42,44]

$$W = B_F \cdot F + B_Q \cdot Q + B_D \cdot D + B_0, \qquad (1.23)$$

где B_F – коэффициент регрессии, кВт·ч/тыс. т·км;

F – грузооборот нефти, тыс. т·км/сут;

B_Q – коэффициент регрессии, кВт·ч·с/(м^2·сут);

Q – вязкость нефти, м2/с;

B_D –коэффициент регрессии, кВт·ч/(м·сут);

D – эквивалентный диаметр нефтепровода, м;

B_0 – свободный член уравнения регрессии, кВт·ч/сут.

При реализации второго подхода к прогнозированию следует иметь в виду, что введение в многофакторную модель временного фактора не означает просто учет дополнительной переменной, а представляет качественно новый уровень

исследования динамики всех переменных. В этом случае рассматривается несколько рядов динамики [34,35], содержащих какие-то тренды развития, которые требуется коррелировать между собой. В простейшем случае линейной связи зависимой Y и независимой X переменных от времени t можно записать [34,35]

$$Y_t = Y(t) + e_t = a_0 + a_1 t + e_t, \quad (1.24)$$

$$X_t = X(t) + u_t = b_0 + b_1 t + u_t, \quad (1.25)$$

где Y(t), X(t) – значения тенденций переменных на момент времени t;

a_0, a_1, b_0, b_1 – неизвестные параметры линейной тенденции;

e_t, u_t – оценки случайных компонентов (остатки).

Поскольку ряды динамики имеют общий фактор – время t, то линейные тенденции связаны между собой функционально, а случайные компоненты корреляционно. Следовательно, получаемые коэффициенты регрессии являются взвешенными, т. е. в них переплетаются функциональные связи между тенденциями и корреляционные связи между остаточными членами. Указанные соотношения справедливы и при анализе рядов динамики, содержащих нелинейные тенденции при условии их трансформирования в линейную форму.

Проблема построения многофакторной прогнозной модели усложняется, когда исследуемые ряды динамики содержат нелинейные тенденции в виде полиномов второго и выше порядков, т. к. такие тенденции могут иметь точки перегиба при разных значениях t. Удовлетворительное решение в этом случае может быть получено только тогда, когда тенденция зависимой переменной (электропотребление) выражается полиномом того же или более низкого порядка по сравнению с тенденцией независимых переменных.

Таким образом, область применения многофакторных регрессионных моделей электропотребления [15] с введением фактора времени ограничена либо одинаковым характером изменения W и X во времени, либо более простой формой тенденции W по сравнению с факторами производства. В последнем случае

строится интегральное регрессионное уравнение, включающее тенденцию W от времени плюс регрессии по остальным факторным признакам.

Построение динамической прогнозной модели электропотребления, например, для одного из листопрокатных цехов металлургического предприятия может быть выполнено на основании: данных о месячных расходах электроэнергии и выделенных наиболее значимые производственных факторах – количества прокатанного металла $F_{пр}$ и величины обжатия Q,% . На рисунке 1.3 приведен характер изменения основных показателей приводимого в качестве примера производства [15]. Как видно из графиков, характер изменения электропотребления и объемов прокатанного металла одинаков и имеет нелинейную тенденцию. Существенно отличается характер изменения величины обжатия, форма зависимости которого более сложная.

Например, при моделировании динамики расхода электроэнергии на основе значимых факторов производства простой линейной моделью [15]

$$W = 39.68 \cdot F_{пр} - 1.03 \cdot 10^{6} Q + 2.62 \cdot 10^{4} \cdot t - 1.091 \cdot 10^{8} \qquad (1.26)$$

была получена зависимость, адекватная реальному процессу, так как она имеет высокий коэффициент детерминации $R=0,96$ и незначительную среднеквадратическую погрешность $\Delta=4,4$ %. Однако, относительная погрешность определения ожидаемого расхода электроэнергии по данной модели в ряде месяцев могла превышать 20%.

Это объясняется тем, что тренды показателей листопрокатного цеха металлургического предприятия носят резко нелинейный характер (см. рисунок 1.3). Следовательно, конкретная форма многофакторной прогнозной модели должна быть установлена подбором адекватных зависимостей, минимизирующих ошибку прогноза.

В данном случае модель можно построить, использовав следующие функционалы [15]

$$W = a_0 + a_1 \cdot F_{пр}^{0,5}$$

$$W = \exp(a_0 + a_1 \cdot Q) \quad . \qquad (1.27)$$

$$W = a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3$$

А с учетом выявленных оптимальных форм зависимостей расхода электроэнергии от факторов производства и времени окончательная прогнозная модель электропотребления может иметь следующий вид [15]

$$W = 4.114 \cdot 10^4 \cdot F_{пр}^{0,5} + \exp(45.43 - 0.3212 \cdot Q) - 2.3 \cdot 10^6 - 2.844 \cdot 10^4 \cdot t + 1289 \cdot t^2 - 9.782 \cdot t^3 . \qquad (1.28)$$

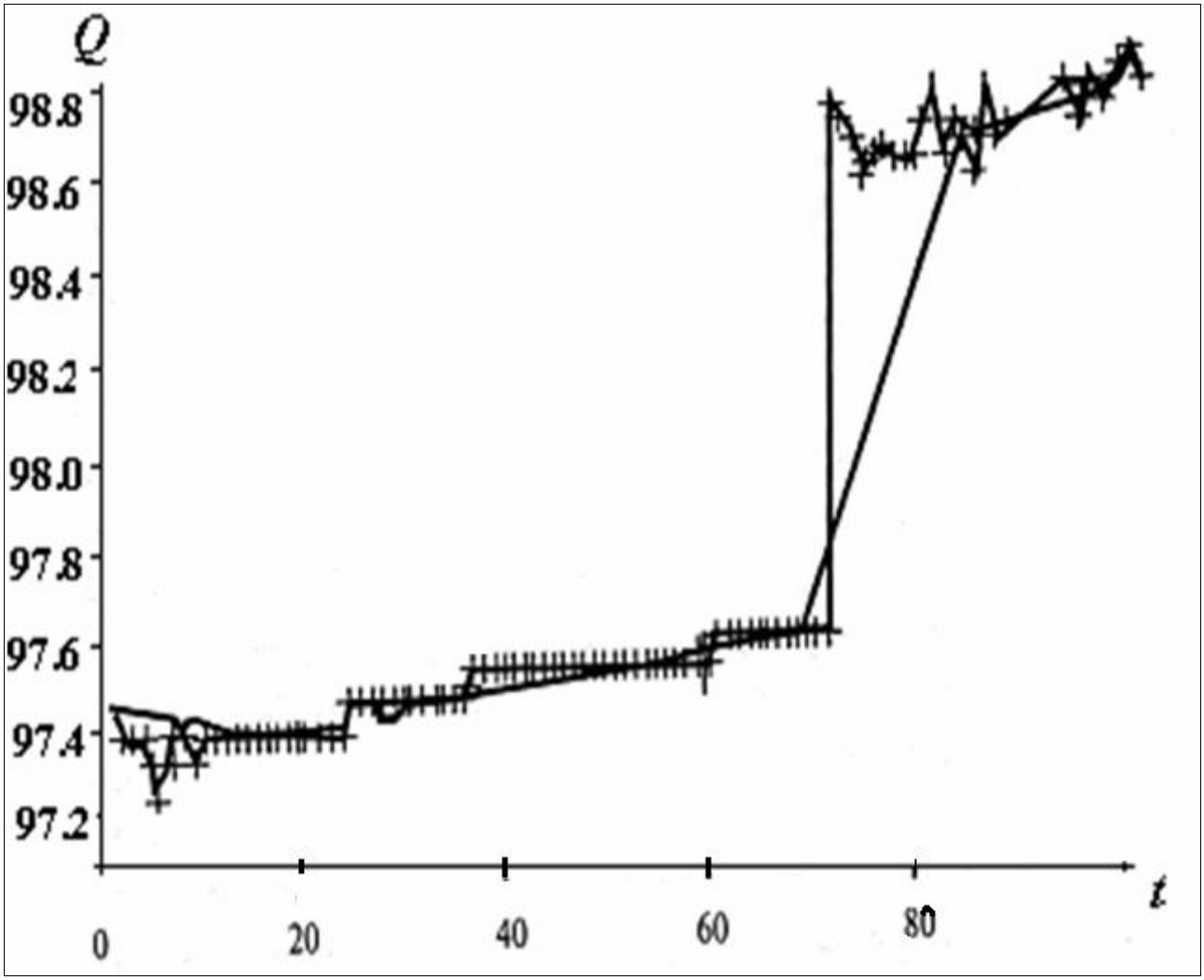


Рисунок 1.3 – Изменение относительного обжатия Q, % в листопрокатном цехе в течение месяца

Сравнение моделей на основе объемов производства (таблица 1.5) приводит нас к выводу, что полученная прогнозная модель (1.28) позволяет оценивать ожидаемое электропотребление с меньшими погрешностями.

Основа третьего подхода к прогнозированию электропотребления – изменение от периода к периоду влияния производственных факторов, выраженного коэффициентами регрессии в модели [15]. Исследуются несколько временных рядов значений расхода электроэнергии и определяющих его факторов за Т лет (Т = 1, 2, ..., k). Период времени Т разбивается на k интервалов. При гипотезе о том, что за время, равное величине одного интервала, коэффициенты регрессии остаются постоянными или изменяются несущественно.

Таблица 1.5 – Сравнительная оценка прогнозных моделей электропотребления листопрокатного цеха[15]

Месяц	**W «факт» млн. кВтч**	**Линейная модель**		**Интегральная модель**	
		***W* расч. млн. кВтч**	**Относительная погрешн., %**	**Wрасч. млн. кВтч**	**Относительная, погрешн., %**
1996 г					
Январь	14,63	14,68	-0,385	14,29	2,317
Февраль	13,97	15,05	-7,762	14,71	-5,287
Март	15,43	16,22	-5,117	16,12	-4,477
Апрель	15,56	15,97	-2,654	15,95	-2,501
Май	12,68	14,29	-12,729	13,40	-5,674
Ноябрь	8,09	11,82	-46,156	7,87	2,604
Декабрь	10,48	12,87	-22,808	10,60	-1,135

Таким образом, задача сводится к определению значений изменяющихся за период Т коэффициентов регрессии многофакторной модели электропотребления [15]

$$W_t = a_0(t) + a_1(t) \cdot x_{1t} + a_2(t) \cdot x_{2t} + ... + a_k(t) \cdot x_{kt}. \qquad (1.29)$$

Каждый коэффициент регрессии a_t будет иметь k-оценок, т. е. получается временной ряд каждого коэффициента регрессии. По этим временным рядам можно построить прогнозы для коэффициентов регрессии на момент времени

(T+i), используя для этого методы прогнозирования по одному временному ряду. Введение фактора времени в многофакторную модель требует одинакового характера изменения параметров во времени.

Основные преимущества данной методики анализа временных рядов состоят в расширении границ и совершенствовании глубины анализа главной тенденции. В этом случае главная тенденция раскладывается на составляющие, обусловленные изменчивостью во времени влияния различных факторов. Основным недостатком данных моделей, базирующихся на статистике (выражения 1.17–1.29), являются высокие требования, которые они предъявляют к анализируемому процессу, например требование о стационарности процесса, что на практике, как правило, не выполняется.

Практика показывает, что для прогнозирования потребления электроэнергии также не существует общего, единого метода [23–29,36–44, 46, 47,50–55]: каждое производство содержит индивидуальные технологические циклы, которые, суммируясь, образуют уникальный временной процесс. Однако для дискретных производств во всех производственных циклах потребления энергии можно найти общие черты, образуя тем самым методическую базу для выполнения достаточно точного прогноза на отрезок времени, сопровождающийся относительной стабильностью производственных процессов.

Любая задача прогнозирования опирается на сложные математические или эмпирические методы поиска закономерностей в рассматриваемом временном процессе. При этом причины этих закономерностей могут изменяться со временем, коренным образом влияя на дальнейшее развитие рассматриваемого процесса. Так, глобальные тенденции к изменению производственного процесса предприятия, возникшие с изменением конъюнктура рынка и заставившие изменить или перепрофилировать производство, могут за сравнительно короткий период перечеркнуть выводы экспертов и большинство методов прогноза, применявшихся ранее.

Развитие электронно-вычислительной техники и лавинообразное увеличение ее возможностей и технических характеристик привело к созданию моделей

энергопотребления предприятий на основе так называемых нейронных сетей [48–49]. Это направление компьютерного моделирования смещается в сторону комплексного логического анализа технических данных наблюдения и прогнозирования разнообразных процессов, принятия решений и определения стратегии и тактики управления электротехническими комплексами.

Однако для построения нейронов необходимо определять набор статистических методов и методику их применения, которые позволят установить показатели влияния входных факторов на величину электропотребления, то есть сформировать набор инструментов моделирования энергопотребления и оценки надежности корреляционных связей. Моделирование на основе нейронных сетей не снимает проблемы отыскания адекватных моделей и методов прогнозирования энергопотребления конкретного электротехнического комплекса.

Выводы. Эмпирический метод (выражения 1.1–1.6) дает значительные погрешности при определении мощности, так как не использует информацию об особенностях технологического процесса конкретного производства и режимов работы его электроприемников.

Аналитический метод (выражения 1.7–1.11) определения мощности громоздок и нередко дает большую ошибку, так как определение $P_{\text{ср смен}}$ для действующих предприятий осложняется трудностью выбора наиболее загруженной смены, и зачастую, происходит простое суммирование мощностей и коэффициентов, хотя электроприемники оказываются из разных групп.

Статистические методы (выражение 1.12), относящиеся к надежным методам изучения нагрузок действующего промышленного предприятия, обеспечивают только относительно верное значение заявляемого промышленным предприятием максимума нагрузки $P_{\text{э.max}}$ в часы его прохождения в энергосистеме.

Методы вероятностного (выражения 1.13–1.14) и многофакторного (выражения 1.17–1.29) моделирования не снимают проблемы отыскания адекватных моделей и методов прогнозирования нагрузки и энергопотребления конкретного электротехнического комплекса, скорее наоборот, стимулируют

разработку большего спектра моделей с определением влияния различных технологических параметров предприятия и учетом режимов работы последнего.

1.2 Особенности процесса электропотребления электротехнического комплекса с непрерывным производством и задачи управления его энергоэффективностью

Энергопотребление электротехнического комплекса любого производства целиком зависит от характера и режима работы последнего [15,24–29,36–44,46,47,50–55]. Именно по этой причине не существует единой определенной методики создания модели прогнозирования ЭТК предприятий.

Например, для линейных дискретных производств [56–59] моделирование энергопотребления может быть выполнено с применением многофакторных регрессионных моделей, описанных в параграфе 1.1. Под термином «линейное» следует понимать такое производство, где работа его технологических участков имитируется линейными стационарными связями между расходами входных и выходных материалов, например: $F_3 = a_1 \cdot F_1 + a_2 \cdot F_2$, где F_3 – средний выход полупродукта за период времени T, F_1 и F_2 – аналогичным образом отфильтрованные расходы полупродуктов на входе технологического участка, a_1, a_2 – коэффициенты. К таким производствам относятся машиностроительное, производство строительных изделий и конструкций, нефтяное производство и т.д. В этом случае построение модели потребления электроэнергии (выр.1.1–1.6) может основываться на пропорциональных зависимостях от производимой продукции и иметь вид

$$W = \sum_{i=1}^{n} W_i \cdot F_i , \qquad (1.30)$$

где i – номер производимого продукта, n – количество видов производимой продукции;

W_i – затраты электроэнергии на единицу *i* -ой продукции (КВт·час);

F_i – объем выпускаемого i-го продукта.

Решение подобной задачи для непрерывных производств, имеющих нелинейный характер (для таких производств отсутствует пропорциональная зависимость между объемом выпускаемой продукции и энергопотреблением) [60–64], может быть выполнено двумя способами:

– первым, для краткосрочного стационарного режима, когда не меняются технологические параметры, или меняются незначительно. В этом случае моделирование энергопотребления может реализовываться на основе статистики (выражения 1.1-1.6,1.15-1.22), то есть аналогично линейным производствам;

– вторым, для динамического, то есть в реальности, когда происходят изменения технологических режимов производства в значительных диапазонах. Для таких режимов моделирование энергопотребления должно основываться имитации работы предприятия с использованием закономерностей технологических преобразований и удельного энергопотребления по каждому выходу полупродукта всех технологических переделов. Только при таком подходе модель энергопотребления ЭТК будет способной адекватно реагировать на изменения параметров производства.

К таким непрерывным производствам относится энергоемкое нелинейное инерционное гидро-химическое производство (мощность среднего производства 200МВт) глинозема, в котором более 90% электроэнергии потребляется электродвигателями, реализующими технологический процесс. Глинозем – технический оксид алюминия (сырье для электролитического получения металла алюминия) вырабатывают на крупнотоннажных непрерывных производствах наиболее широко распространенным способом Байера, по которому работает большинство заводов в мире (производительность среднего глиноземного завода – 1млн. тонн продукта в год).

В основе рассматриваемого типа производства лежат два фундаментальных процесса:

– извлечение из руды (боксита) оксида алюминия (Al_2O_3) в ходе его выщелачивания;

– разложения щелочно-алюминатного раствора с выделением из него гидроксида алюминия [60–63].

Основные преобразования щелочно-алюминатных растворов в кольце Байера при производстве глинозема иллюстрирует диаграмма с изотермами равновесия системы $Na_2O – Al_2O_3 – H_2O$ (рисунок 1.4).

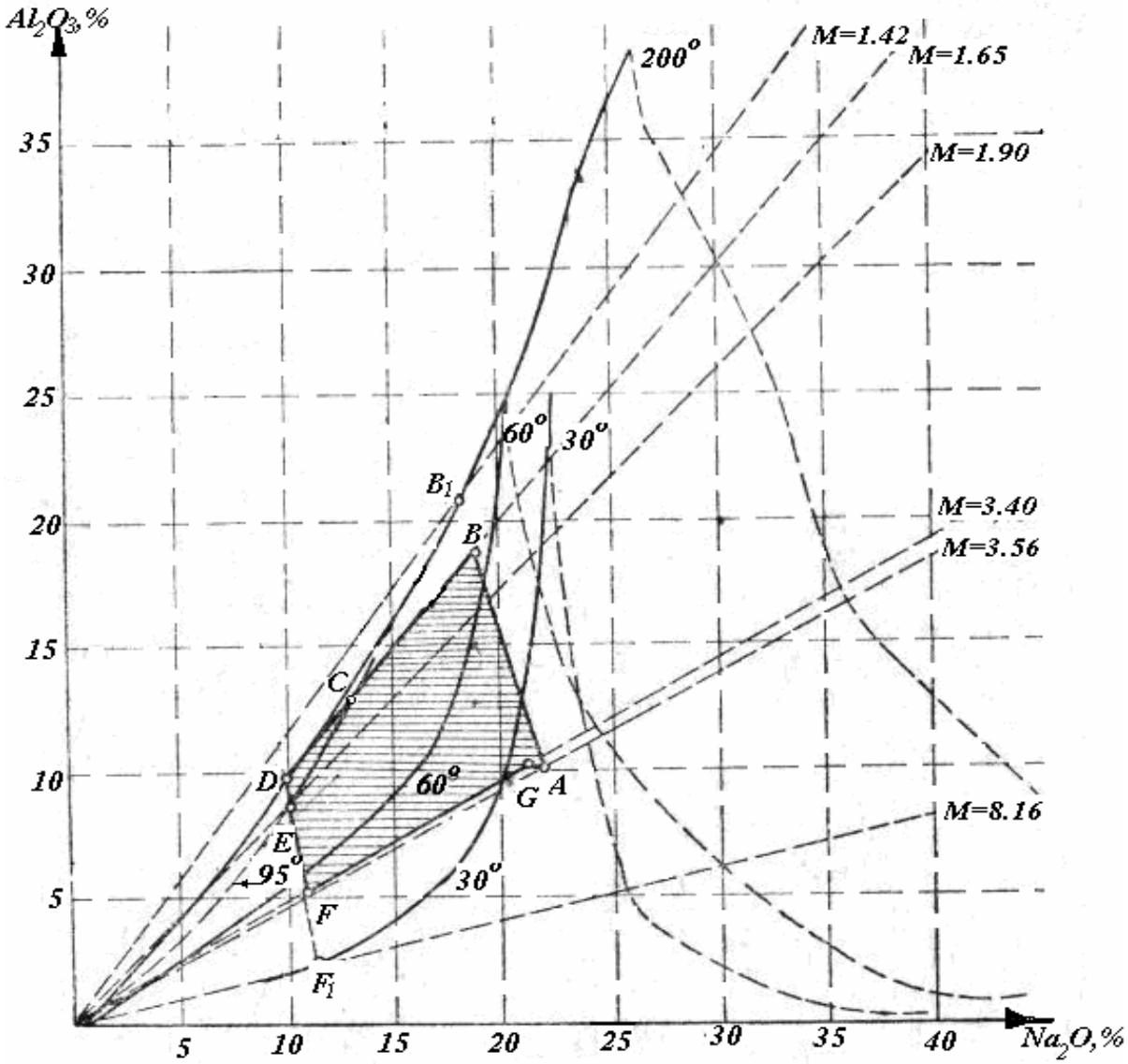


Рисунок 1.4 – Циклограмма способа Байера в системе $Na_2O – Al_2O_3 – H_2O$

Выщелачивание боксита концентрированным оборотным раствором щелочи (Na_2O) описывается переходом А–В, при котором жидкая фаза бокситовой пульпы обогащается Al_2O_3 и ее модуль (отношение концентрации Na_2O к концентрации Al_2O_3) снижается, например, от 3.56 до 1.65. Наклон линии А–В определяется химическим и минералогическим составом боксита. Процесс

разбавления пульпы промводой от промывки шлама идет по отрезкам B – C – E. Отрезок C – E немного отклоняется от луча модуля 1.65 за счет гидролиза (точка D недалеко от границы равновесия). Линия E–F – процесс разложения алюминатного раствора в зоне пресыщения при постепенном снижении его температуры. Упаривание отделенного от гидрата маточного раствора, до концентрации оборотного – линия F–G. Подщелачивание оборотного раствора свежей каустической содой – отрезок G–A, параллельный оси абсцисс.

Умелое управление координатами циклограммы на стадии планирования производства глинозема обеспечивает минимизацию затрат на его получение, так как координаты этого пятиугольника влияют на расход материалов и энергоносителей, реализующие движение материалов в кольце, и эти затраты составляют более 70% от полных затрат на получение глинозема. Анализ данной циклограммы позволяет сделать вывод, что процессы получения готового продукта носят нелинейный характер, помимо этого, все преобразования взаимосвязаны между собой. Следовательно, вся технология должна описываться системами нелинейных и дифференциальных уравнений.

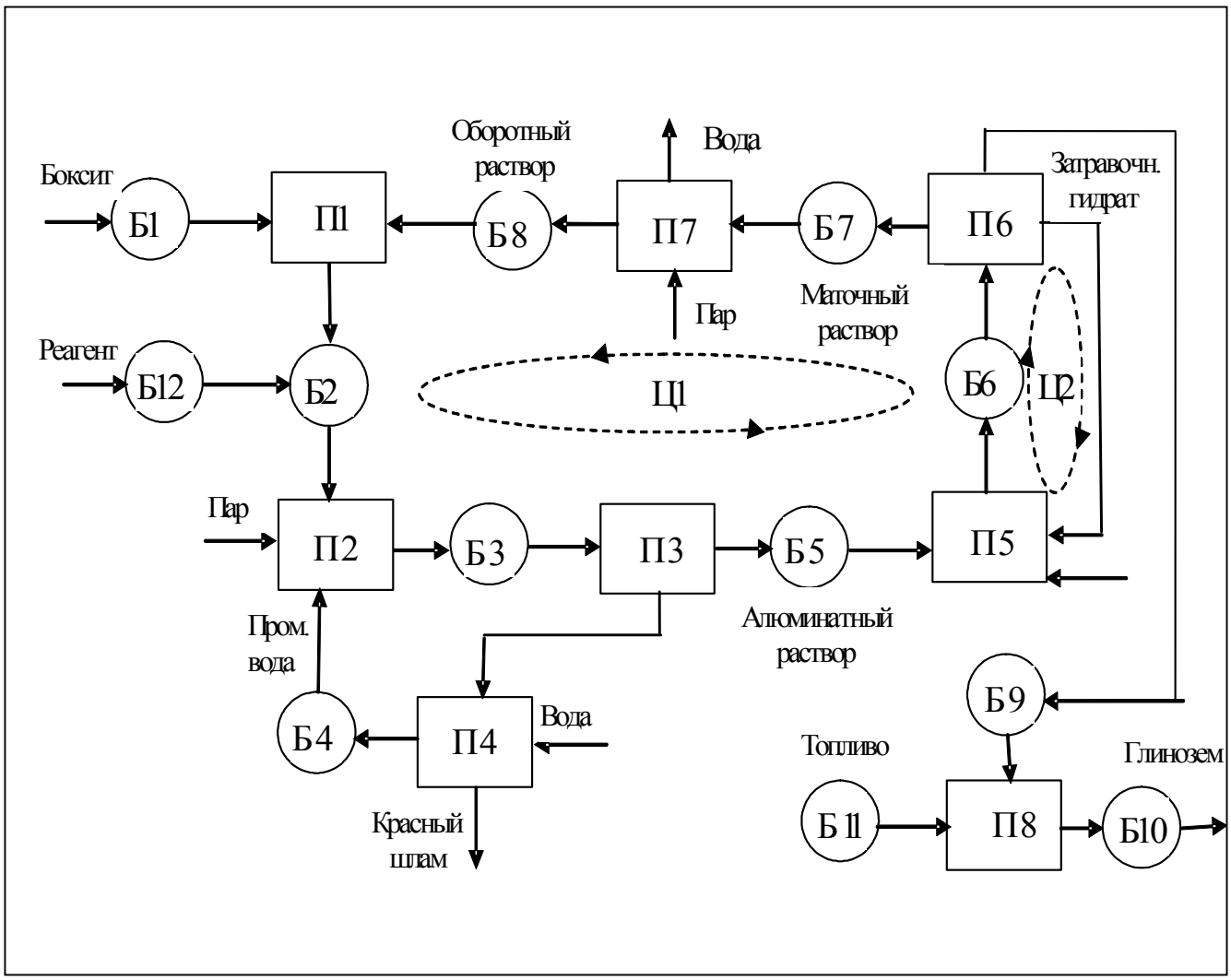


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема глиноземного производства

Структура основных преобразований [60 – 65] сырья в готовый продукт изображена на рисунке 1.5. Преобразования эти осуществляются посредством электродвигателей (В таблице 1.1 приведены сгруппированные по технологическим участкам электродвигатели, задействованные в производственном процессе, их вид, мощности и коэффициенты использования одного из глиноземных заводов).

На рисунке 1.1 изображена схема электротехнического комплекса рассматриваемого типа производства; прямоугольники, обозначенные П1 - П8 представляют собой технологические переделы производства, которые выполняют преобразование веществ с помощью двигателей синхронных (передел П1) и асинхронных на всех остальных переделах производства. На рисунке 1.5 производственные переделы обозначены аналогично: П1 – П8.

В рассматриваемом типе производств исходная руда – бокситы с содержанием в них оксида алюминия Al_2O_3 от 30 до 70 % поступает на передел П1. Здесь она размалывается на мельницах (синхронные двигатели) в присутствии реагента (каустическая сода). Основной поток реагента поступает с оборотным раствором (мешалки, асинхронные двигатели), а дополнительный для компенсации потерь реагента из кольца участков – с внешним потоком каустической соды. Полученную бокситовую суспензию (пульпу) на участке П2 (мешалки, насосы, асинхронные двигатели) выщелачивают при высокой температуре острым паром и после разбавляют оборотной промводой. На участке П3 (насосы, асинхронные двигатели) готовую пульпу разделяют на твердую часть (красный шлам) и жидкую (алюминатный раствор).

Красный шлам промывают в ряду последовательных промывателей водой (участок П4; насосы, асинхронные двигатели) и отправляют в отвал (или для дополнительной переработки способом спекания в другом производстве), а богатый Al_2O_3 раствор поступает на дальнейшую переработку (участки П5 – П8; насосы, транспортеры, асинхронные двигатели) для реализации обратного процесса – выделения из раствора оксида алюминия. Обратная реакция разложения раствора в нитках последовательно соединенных реакторов (участок П5) осуществляется при охлаждении раствора в присутствии катализатора – мелких кристаллов возвратного затравочного гидроксида алюминия $Al(OH)_3$.

Полученная гидратная пульпа с использованием отстойников, классификаторов и фильтров разделяется на участке П6 на три части: маточный раствор, мелкодисперсный затравочный гидрат и крупнодисперсный продукционный гидрат. Относительно бедный оксидом алюминия маточный раствор упаривают в многокорпусный выпарных станциях (участок П7) до требуемой кондиции с использованием пара высоких параметров и с получением конденсата. Продукционный гидрат прокаливают в печах на конечном участке П8. При прокаливании исходный материал теряет несвязанную и связанную влагу, частично изменяет свою кристаллическую структуру. Участки разделяются буферными емкостями Б2 – Б8 между собой.

Вся замкнутая цепь участков (так называемое кольцо Байера КБ) также отделена от окружающей среды складами Б1, Б9 – Б12 исходных материалов (боксит, реагент, топливо) и конечного продукта. На схеме штриховыми овалами изображены технологические циклы по щелочесодержащему раствору (Ц1) и затравочному гидрату (Ц2). В таблице 1.6 приведены средние численные характеристики участков, буферов и мощностей циркуляционных потоков. ВПЖ, ВПТ – время пребывания жидкой и твердой фазы материала в аппаратах участка. ВПВ – время пребывания вещества в незавершенном производстве (НП). УСБ – удерживающая способность буфера, отношение его объема к диапазону колебаний потока через него. ПМЦ – показатель мощности циркуляционного потока, отношение мощности потока вещества в циркуляционном и прямом потоке.

Таблица 1.6 - Характеристики глиноземного производства

Буфера		**Участки, незавершен. пр-во**				**Циркуляционные потоки**	
Номер	УСБ	Номер	ВПЖ	ВПТ	ВПВ	Наименование	ПМЦ
Б1	10 суток	П1	0.3ч.	0.3ч.	0.2ч.	Цикл 1	
Б2	1 час	П2	3ч.	3ч.	5ч.	По Na_2O	1.3
Б3	1 час	П3	3ч.	8ч.	4ч.	По Al_2O_3	0.2
Б4	2 часа	П4	1ч.	6ч.	10ч.	Цикл 2	
Б5	4 часа	П5	3сут.	3сут.	3сут.	По Al_2O_3	3
Б6	1 час	П6	1ч.	1ч.	2ч.		
Б7	8 часов	П7	0.5ч.	-	1ч.		
Б8	2 часа	П8	-	0.5ч.	0.5ч.		
Б9	1 сутки						
Б10	5 суток						
Б11	30 суток						
Б12	15 суток						

Анализ значений таблицы 1.6 позволяет сделать вывод, что данное производство носит явно выраженный замкнутый характер. Это видно по

мощностям основных циркуляционных потоков, в несколько раз превышающим мощности прямых потоков и показателям УСБ: в незавершенном производстве (в аппаратах замкнутого кольца участков) находятся большие объемы веществ (таблица 1.6), в среднем в несколько раз превышающие их суточный выход.

Модели электропотребления глиноземного производства. Объемы веществ, циркулирующие в данном производстве, препятствуют использованию эмпирических регрессионных моделей для имитации поведения объекта, так как приходится пользоваться усредненными за десятки дней данными, «поглотившими» полезную информацию, а проведение активных экспериментов невозможно, поскольку требует длительных отклонений от режима нормальной эксплуатации. Имеется отрицательный опыт применения статистических моделей для данного производства [64]. Но имеется и положительный опыт построения детерминированных нелинейных моделей, использующих уравнения баланса по количеству вещества и энергии [63]. Поэтому моделирование энергопотребления данного производства ввиду его особенностей целесообразно выполнять на основе уравнений материального баланса потоков веществ с учетом удельного электропотребления по каждому потоку. В результате модель должна представлять собой системы нелинейных алгебраических уравнений и дифференциального уравнения, описывающего кинетику перехода Al_2O_3 из жидкой фазы в твердую. Такого рода модель имеет три основных достоинства: достаточно точно описывает характер наблюдаемых нелинейностей, дает не нуждающуюся в дополнительной идентификации чувствительность изменений выходных параметров модели ко входным, точно описывает структуру взаимосвязей между величинами.

В результате разработки стационарной модели, позволяющей рассчитывать все материальные потоки в производстве и расход электрической энергии на их преобразование и перемещение, будет решена задача расчета энергопотребления на основании формулы (1.30) с той лишь разницей, что F_i – это объемы i-ого потока вещества в производственном кольце ($м^3$ или т), W_i – его энергозатраты на единицу объема (КВт·час/$м^3$ или КВт·час/т).

Однако данного вида модель не может определить характер изменения энергопотребления при переходе производства на другие технологические режимы, например, при изменении химического состава сырья, так как не позволяет промоделировать характер переходных процессов, которые могут возникнуть в этом, характеризующимся нелинейностью, производстве. Если учесть тот факт, что мощность среднего такого производства 200МВт, то незапланированное отклонение его энергопотребления даже на 2% может серьезно повлиять на работу всей энергосистемы. Следовательно, необходима разработка модели на основе баланса по количеству вещества и энергии по каждому технологическому участку с моделированием во времени динамики работы ниток последовательно соединенных декомпозеров (аппаратов, в которых реализуется процесс перехода Al_2O_3 из жидкой фазы в твердую) с помощью системы дифференциальных уравнений. Полученная в результате модель может стать инструментарием для решения задачи прогнозирования энергопотребления при переходе на иные технологические режимы, а так же определения стратегии управления энергопотреблением производства с целью выравнивания графика нагрузки энергосистемы.

Управление электропотреблением и энергоэффективностью ЭТК с непрерывным производством. Задачи управления ЭТК рассматриваемого типа производства иерархически делятся на два уровня [65–73]. Верхний уровень – технико-экономический (оптимизирующие разные аспекты технико-экономической деятельности предприятия), нижний – задачи управления приводами, реализующими технологический процесс. Критерии качества управления – в основном экономические, а результат решения задачи оптимального управления – значения технологических параметров и объемы материальных потоков, определяющих нагрузку приводов каждого технологического передела.

Принятые распоряжением Правительства Российской Федерации Федеральный закон и Государственная программа по энергосбережению [1–9] ставят перед предприятиями задачу повышения энергоэффективности

производства и переводят управление в русло, подчиненное задаче энергосбережения.

На верхнем уровне управления ЭТК кроме перечисленных выше задач решается задача составления договоров на поставку заранее оговоренной величины активной мощности электроэнергии с предприятиями-поставщиками последней. При этом превышение (уменьшение) потребления от оговоренной величины мощности облагается значительными штрафными санкциями.

Эти взаимосвязанные задачи требуют особого подхода для рассматриваемого производства, и для их решения требуется разработка инструментария, позволяющего ЛПР (лицу, принимающему решения) выбрать оптимальный, с точки зрения энергоэффективности и себестоимости производимой продукции, режим работы производства и его ЭТК.

При оперативном управлении решаются две задачи, оказывающие значительное влияние на электропотребление ЭТК рассматриваемого производства:

1) задача минимизации переменной части себестоимости глинозема при существующих ценах на сырье и энергоресурсы путем корректировки заданных концентрационных режимов участков,

2) задача управления выпуском продукции путем корректировки суточной производительности кольца Байера при минимизации энергопотребления.

Задача 1) решалась ранее [64] в предположении о стабильности цен на сырье и о наличии экстремальной зависимости переменной части S себестоимости готового продукта от режимных технологических параметров, но как показала практика, все эти предположения относительны ввиду постоянно изменяющейся конъюнктуры рынка, и необходима разработка новых алгоритмов оптимизации и моделей для их реализации.

Задача 2) решалась [67–70] при допущении о линейных взаимосвязях между переделами. Такое упрощение моделирования приводило к тому, что не учитывались разрывы потока в кольце, наблюдаемые при резких изменениях его производительности, режимных технологических параметров и характеристик

сырья, не всегда компенсируемые промежуточными буферами Б2–Б7, а управляющие воздействия, сформированные с помощью такой модели порой оказывались не только нереализуемыми, но и приводящими к техногенным катастрофам. Кроме того, в ранее разработанных моделях не решалась оптимизационная задача с критерием минимизации энергопотребления.

Энергоемкое глиноземное производство относится к нелинейным, инерционным и замкнутым, то есть представляет собой цикл, который управляется с помощью ряда технологических параметров, и электропотребление его ЭТК целиком зависит от значения этих параметров. Следовательно, разработка модели электропотребления данного ЭТК должна выполняться на основе имитации технологических преобразований данного производства.

Для предотвращения ошибочных управляющих воздействий ввиду особенностей рассматриваемого производства, необходима разработка динамической модели прогнозирования изменения его параметров, имитирующей во времени процесс перехода на иные технологические режимы.

Поиск режима производства, обеспечивающего минимальное потребление энергоресурсов и сырья должен выполняться на основе следующих положений:

– построение критерия оптимального управления производством на основе упрощенной статической модели производства, базирующейся на уравнениях материального баланса технологических переделов последнего, учетом изменяющихся во времени цен **C** на энергоресурсы и сырье в диапазонах изменения технологических параметров производства **X**;

– решение многопараметрической многокритериальной оптимизационной задачи с получением значений технологических параметров **X**, обеспечивающих энергоэффективный режим функционирования рассматриваемого производства;

- определение электропотребления производства в динамическом режиме при переходе к найденным оптимальным технологическим параметрам.

1.3 Концептуальные задачи повышения эффективности функционирования и безопасности эксплуатации электротехнических комплексов

Электротехнические комплексы рассматриваемого типа энергоемких производств содержат на своей территории большое число электроустановок, а при поисках энергоэффективного режима в производствах рассматриваемого типа могут резко изменяться объемы потоков вещества, что может повлечь за собой возникновение аварий электрооборудования и техногенных аварий.

Для предотвращения аварий электрооборудования, вызывающих его полное разрушение, на предприятиях предусматриваются устройства релейной защиты, срабатывающие при возгикновении тока срабатывания в трансформаторах тока или возникновении необходимого уровня магнитного потока в магнитных трансформаторах, устанавливаемых на защищаемых объектах. Для нормального функционирования всего этого комплекса оборудования требуется установка устройствс заземлений [74 - 77].

Кроме того, на электрооборудавении работают люди, и при возникновении аварий на этом оборудовании они подвергаются опасности получения электротравм. Статистика утверждает, что наибольшее число электротравм (до 70%) происходит при работе на электроустановках напряжением до 1000. Для решения проблемы безопасности работы с электрооборудованием существует ряд методов, к которым относятся зануления и заземления, способных отводить потенциал, возникший на токопроводящих частях этого оборудования.

Зануление выполняют в сетях с глухозаземленной нейтралью. Оно представляет собой преднамеренное соединение металлических нетоковедущих частей оборудования, которые могут оказаться под напряжением, с нулевым защитным проводником. Зануление превращает пробой на корпус в короткое замыкание между фазным и нулевым проводами и способствует протеканию тока большой силы через устройства защиты сети, которые могут быстро отключить поврежденное оборудование от сети. Согласно указаниям ПУЭ, сопротивление

заземления нейтрали источника тока должно быть не более: 8 Ом при напряжении 220/127 В; 4 Ом при напряжении 380/220 В; 2 Ом при напряжении 660/380 В.

Заземления выполняют в сетях с изолированной нейтралью. Основными функциями заземления являются: снижение уровня потенциалов на корпусах электрооборудования до безопасных значений [76,77] и отвод токов короткого замыкания в землю. Заземляющие устройства представляют собой неотъемлемую часть электротехнических комплексов и предназначены для обеспечения надежности их функционирования и безопасности работающего там персонала [14,74,75]. Условно заземления делятся на две группы. К первой группе относят простые заземлители, состоящие из одного электрода, выполненного, к примеру, в виде полусферы, вертикального или горизонтального электрода, тора и т.д. Ко второй группе относятся сложные заземления, представляющие собой комбинацию горизонтальных и вертикальных электродов. Если все электроды (элементы) сложного заземления расположены горизонтально и образуют в плане замкнутый контур, то его называют заземляющей сеткой, а при наличии также и вертикальных электродов – комбинированным заземлением [76].

Работоспособность ЗУ электроустановок в первую очередь обеспечиваются точным определением их сопротивления. Однако эта задача до конца так и не решена ввиду сложности, хотя ей посвящено много работ [78–90].

Сопротивление одиночных заземлителей. Сопротивление растеканию тока одиночного заземлителя определяется по формуле [80]

$$R = \frac{\rho}{\pi \Gamma} C, \qquad (1.31)$$

где Г – наибольший линейный размер в метрах (называемый, зачастую, главным) заземлителя; ρ (Ом·м) – удельное электрическое сопротивление грунта; С – безразмерный коэффициент, величина которого зависит от формы заземлителя и условий его заглубления.

Для сферы или полусферы $\Gamma = d$, где d – ее диаметр, для протяженного электрода $\Gamma = l$, где l - его длина. Значения коэффициента С для наиболее характерных условий заглубления одиночных электродов представлены в [85,90],

например, для вертикального заземлителя

$$C = \frac{1}{2}\left(\ln \frac{4l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l}{4h - l} \right), \text{ при условии } l >> d,\ h > \frac{l}{2},$$

где h – глубина заложения электрода.

Расчет сопротивления контурного заземления. Сопротивление заземляющего устройства выполненного в виде контурного заземления, состоящего из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, рассчитывается [78, 80] по формуле

$$R = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}}, \tag{1.32}$$

где R_{11} – сопротивление горизонтальной сетки, Ом;

R_{22} – сопротивление вертикальных электродов, Ом;

R_{12} – взаимное сопротивление между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами, Ом.

Сопротивления R_{11}, R_{12}, R_{22} определяются выражениями [80]:

$$\begin{aligned}
R_{11} &= \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln \frac{2L}{\sqrt{b_c h}} + 1.37 \frac{L}{\sqrt{S_C}} - 5.6 \right); \\
R_{22} &= \frac{\rho}{2\pi n_1 L}\left(\ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2.75 l}{\sqrt{S_C}} (\sqrt{n_1} - 1)^2 \right); \\
R_{12} &= \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln \frac{2L}{l} + 1.37 \frac{L}{\sqrt{S_C}} - 4.6 \right).
\end{aligned} \tag{1.33}$$

Здесь L – полная длина проводников, образующих горизонтальную сетку, м;

S_C – площадь, покрытая сеткой, м;

l и d –длина и диаметр вертикального электрода, м;

n_1 – их число;

b_c – ширина полосы горизонтального проводника, образующего сётку, м;

h – глубина заложения горизонтальной сетки.

Таким образом, виды заземлений и их расчет весьма разнообразны и зависят от множества параметров, таких как удельное сопротивление грунта, размеры ЗУ,

их конструкции, глубина заложения и т.д. При расчете сопротивления ЗУ учитываются такие факторы, как количество слоев земли, в которых располагаются заземляющие устройства, и их взаимное расположение, которое сводится к различным комбинациям параллельных, пересекающихся и скрещивающихся горизонтальных и вертикальных электродов (элементов).

Модель оптической аналогии. В настоящее время эта модель [85] считается одной из наиболее точных и применяется в различных, поставляемых на рынок программах расчета устройств заземления (например, программа «ОРУ-М», НПФ ЭЛНАП, Москва) [87]. Для расчета, основанного на методе наведенных потенциалов (см. рисунок 1.6) [88, 89], находится функция Ψ (функция пропорциональности между током, выходящим из точечного источника (ТИ) тока, и потенциалом φ_N в произвольной точке N проводящего полупространства), которая используется в виде значений в конечном числе точек в табличной форме.

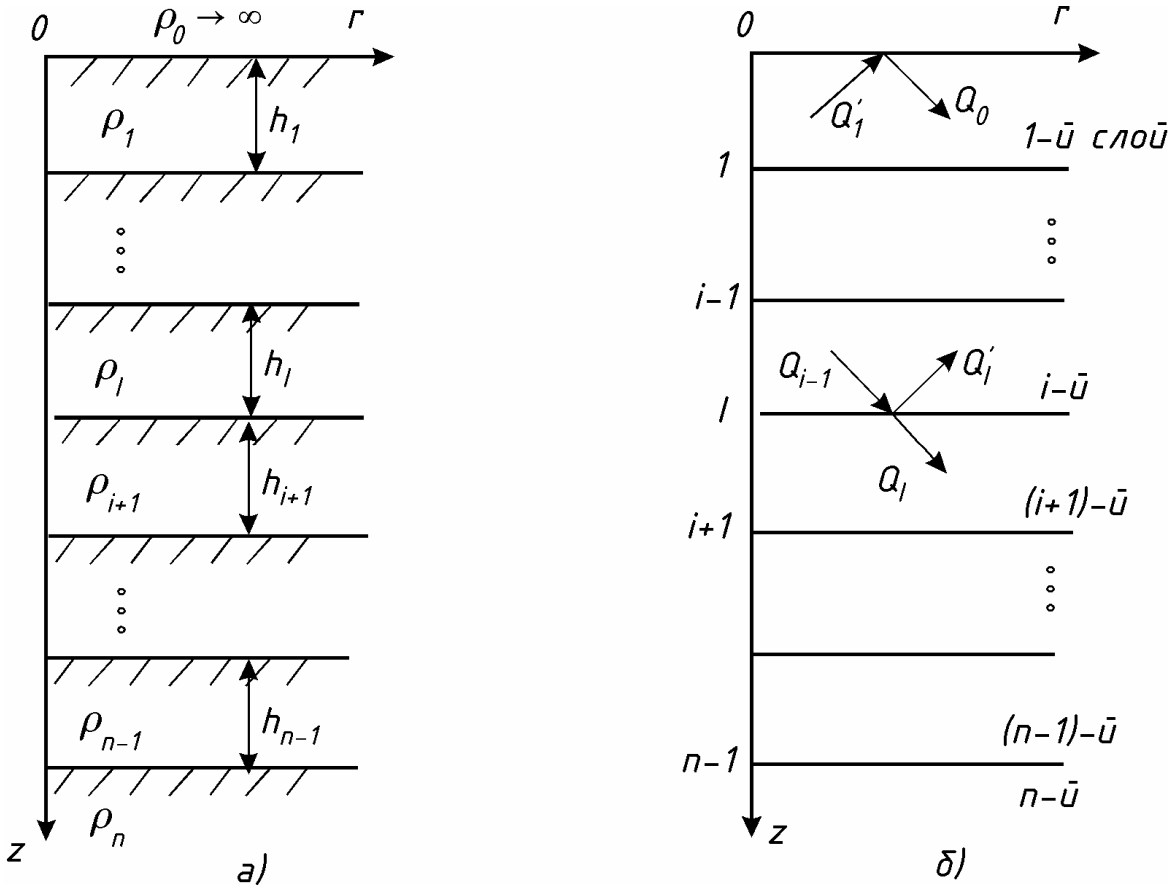


Рисунок 1.6 - Электрическая n-слойная структура земли (а) и аналогичное абсолютно прозрачное оптическое полупространство с частично прозрачными зеркалами (б)

При расчете значений этих точек приняты следующие допущения:

– модель электрической структуры земли – многослойное проводящее полупространство с однородным ρ;

– горизонтальные элементы прямые и расположены на одной и той же глубине h_t от поверхности земли;

– верхние концы вертикальных элементов с одинаковой длиной находятся на глубине h_t от поверхности земли, что и горизонтальные элементы;

– значения ρ_i и мощности h_i всех слоев задаются, при этом мощность последнего n-ого слоя бесконечно велика.

Модель оптической аналогии [85] основывается на замене ТИ тока I и проводящего многослойного полупространства соответственно ТИ света с интенсивностью Q и абсолютно прозрачным полупространством с системой прозрачных зеркал, т.е. I=Q: рассматривается траектория двух лучей и относительное изменение их интенсивностей, по которым строится последовательность ТИ тока (фиктивных). Потенциал φ_{NN} в точке NN находится в соответствии с принципом наложения с помощью выражения

$$\varphi_{NN} = I \cdot \Psi_{1,2}(r, z \le h_t, \eta = h_t) = \\ = \frac{\rho_1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{q_{i-1,n}}{\sqrt{r^2 + (2nh_t + h_t - z)^2}} + \frac{q'_{i-1,n}}{\sqrt{r^2 + (2nh_t + h_t + z)^2}} \right]. \qquad (1.34)$$

Исходными данными являются: число слоев n, удельные сопротивления и толщины слоев $\rho_1, \rho_2, \ldots \rho_n$ и $h_1, h_2, \ldots, h_{n-1}$; глубина h_t от поверхности земли ТИ тока; координаты точек $NN - r_{NN1}, z_{NN1}; r_{NN2}, z_{NN2}; \ldots; r_{NNm}, z_{NNm}$, относительно которых требуется определить функцию Ψ взаимного сопротивления между ТИ тока и точкой NN [85].

Алгоритм модели следующий: дано n-слойное проводящее полупространство (рисунок 1.6,а), у которого толщины всех слоев, за исключением n-ого, обладают общей наибольшей мерой ω (наибольшим общим

делителем), такой, что $h_1 = p_1\ \omega$; $h_2 = p_2\ \omega$;…; $h_i = p_i\ \omega$;…; $h_{n-1} = p_{n-1}\ \omega$. ТИ тока I располагается на любой из границ между слоями, включая границу полупространства. Если ТИ тока I находится не на границе между слоями, то вводится дополнительная (фиктивная) граница, проходящая через ТИ тока, т.е. n заменяется на (n+1). Рисунок 1.6,б поясняет нумерацию j зеркал и слоев, зеркало под номером i разделяет i-й и (i+1)-й слой.

Оптические свойства зеркал определяют показатели: a – коэффициент отражения и b – коэффициент пропускания, которые вычисляются по формуле, если луч направлен из i-го слоя в (i+1)-й: $a_{i,i+1} = \dfrac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_i + \rho_{i+1}}$; $b_{i,i+1} = 1 - a_{i,i+1} = \dfrac{2\rho_i}{\rho_i + \rho_{i+1}}$.

Интенсивность отраженного луча $Q_i^{'}$, направленного из i-й границы вверх, вычисляется по $Q_i^{'} = Q_{i-1} a_{i,i+1}$, а Q_i – интенсивность луча, прошедшего через зеркало от i-й границы вниз, равна $Q_i = Q_{i-1} b_{i,i+1}$. Если луч падает из (i+l)-го слоя на границу с i-м слоем, то $a_{i+1,i} = \dfrac{\rho_i - \rho_{i+1}}{\rho_i + \rho_{i+1}} = a_{i,i+1}$; $b_{i+1,i} = 1 - a_{i+1,i} = 1 + a_{i,i+1}$; а $Q_i^{'} = Q_{i+1}^{'} b_{i+1,i}$; $Q_i = Q_{i-1}^{'} a_{i+1,i}$. Если луч падает на границу оптического полупространства, то с учетом стремления ρ_0 к бесконечности коэффициенты равны: $a_{1,0} = \lim\limits_{\rho_0 \to \infty} \dfrac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_1 - \rho_0} = 1$; $b_{1,0} = 1 - a_{1,0} = 0$.

Для построения последовательности ТИ в общем случае, когда исходный источник света не расположен на границе полупространства, рассматривают два луча, направленных от исходного источника вверх и вниз под одинаковыми углами (рисунок 1.6). Лучи, идущие от этого источника, отраженные от зеркала и прошедшие через него, есть блики, которые находятся по формулам [85]

$$\begin{aligned} q_{ik} &= q_{i-1,k-p_i} b_{i,i+1} + q^{'}_{i+1,k-p_{i+1}} a_{i+1,i};\ q^{'}_{ik} = \\ &= q_{i-1,k-p_i} a_{i,i+1} + q^{'}_{i+1,k-p_{i+1}} b_{i+1,i} \end{aligned} . \qquad (1.35)$$

Формулы (1.35) являются рекуррентными, т. е. справедливыми для любого блика, за исключением тех, где расположен ТИ.

Формула для определения α_{wp} двух элементов заземления имеет вид [85]

$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_w l_p} \int_{l_w} \int_{l_p} f'_{0w} f'_{0p} \Psi_{(wp)} dl_w dl_p \ . \qquad (1.36)$$

Анализ формул модели оптической аналогии, а также (1.34–1.36) показывает, что полученное с их помощью сопротивление ЗУ находится в прямой зависимости от ρ грунтов, в которых расположено заземляющее устройство. Следовательно, точное определение ρ необходимо для того, чтобы правильно рассчитать параметры ЗУ.

Расчет напряжения прикосновения и шага. Стекание тока в землю происходит через проводник, находящийся с нею в непосредственном контакте, и сопровождается возникновением в земле некоторого потенциала [84]. При этом максимальный потенциал будет в непосредственной близи от проводника, а минимальный – в бесконечном от него удалении, практически это расстояние равно 20м. Существует выражение для определения потенциальной кривой [84]:

$$\varphi = \frac{I_з \rho}{4 \pi x}, \qquad (1.37)$$

где I_3 – ток, стекающий в землю, ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, x – расстояние до проводника. Из выражения (1.37) видно, что при допущении об однородности земли, то есть, при неизменном ρ, потенциал изменяется по закону гиперболы, уменьшаясь от максимального до нуля по мере удаления от проводника на расстояние x.

Для протяженного горизонтального заземлителя, находящегося на поверхности земли и заглубленного так, что его продольная ось совпадает с поверхностью земли, потенциал изменяется по разным законам. Рисунок 1.7

иллюстрирует различие потенциала такого заземлителя. Уравнение для определения потенциала вдоль заземлителя, где x – расстояние в метрах (рисунок 1.7,а) [84]:

$$\varphi_X = \frac{I_з \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x + l}{2x - l}. \quad (1.38)$$

Уравнение для определения потенциала поперек заземлителя в зависимости от расстояния y (рисунок 1.7,б) [84]:

$$\varphi_y = \frac{I_з \rho}{\pi l} \ln \frac{\sqrt{4y^2 + l^2} + l}{2y}. \quad (1.39)$$

Близ заземлителя эквипотенциальные кривые этого заземлителя имеют форму эллипса, при увеличении расстояния y эти кривые приобретают форму окружности (рисунок 1.7,в) [84]:

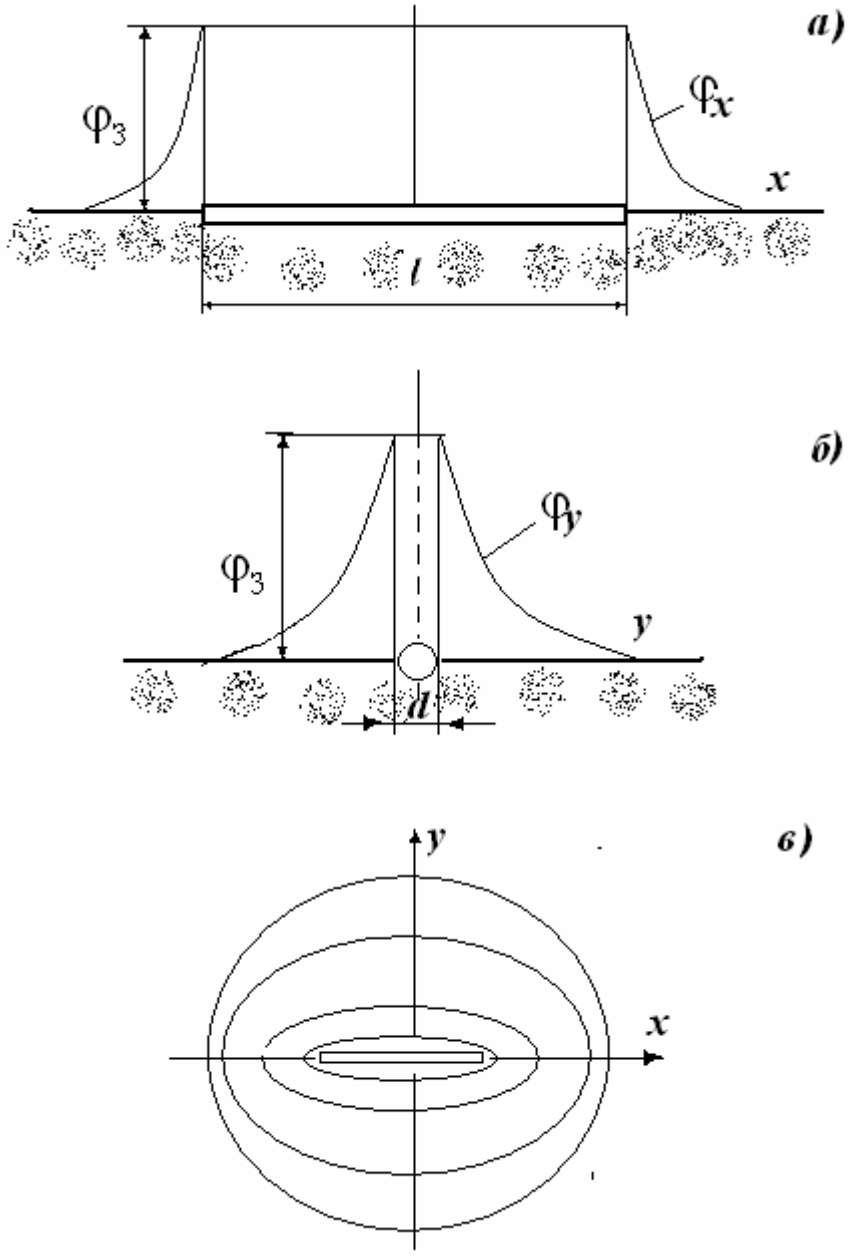


Рисунок 1.7 – Распределение потенциала на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя круглого сечения

Между сопротивлением заземлителя любой формы, потенциалом заземлителя и током, стекающим с него, существует зависимость:

$$R = \frac{\varphi_3}{I_з}. \qquad (1.40)$$

По условиям безопасности заземление должно обладать малым сопротивлением, которое чаще всего обеспечивается проектированием

группового заземления. При этом, если заземление состоит из нескольких электродов, возникает возможность выравнивания потенциала на территории, где он размещен.

Известно, что наиболее опасной зоной для прикосновения в случае пробоя напряжения на корпус оборудования, является зона наибольшего удаления от заземления.

Напряжением прикосновения является напряжение между двумя точками, которых одновременно касается человек:

$$U_{пр} = I_ч R_ч, \qquad (1.41)$$

где $I_ч$ (А) – ток, проходящий через человека по пути руки–ноги, $R_ч$(Ом) – сопротивление тела человека.

В области защитных заземлений, занулений одна из этих точек имеет потенциал заземления $\varphi_З$(В), а другая – потенциал поверхности, на которой стоит человек $\varphi_{ОСН}$(В). Напряжение прикосновения в этом случае вычисляется с помощью выражения:

$$U_{пр} = \varphi_З - \varphi_{ОСН}. \qquad (1.42)$$

Напряжение шага. Это напряжение между двумя точками на поверхности земли (или какого-нибудь другого основания, где стоит человек) в зоне растекания тока, находящимися на расстоянии шага а. Длина шага принимается равной 0.8м.

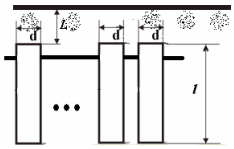
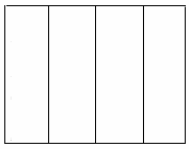
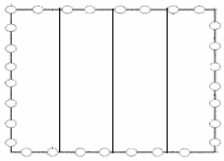
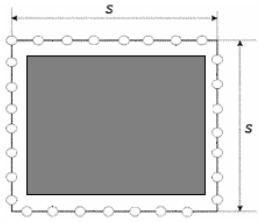
$$U_Ш = \varphi_х - \varphi_{х+а} = \varphi_З \cdot \beta_1, \qquad (1.43)$$

где $\varphi_х$ и $\varphi_{х+а}$ – потенциалы в двух точках поверхности в зоне растекания тока, β_1 – коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой. Наибольшее значение $U_Ш$ и β_1 будут при наименьшем расстоянии от заземления, наименьшее при бесконечном удалении от последнего, практически дальше 20м.

При групповом заземлении максимальное значение коэффициента напряжение шага β_1 [84] сведено в таблицу 1.7.

Методы определения удельного сопротивления грунта. При проектировании заземлений в качестве расчетного удельного электрического сопротивления ρ по ПУЭ [74] рекомендуется брать наибольшее его в течение года, т.е. ориентироваться на худший вариант. Чем ρ грунта меньше, тем благоприятнее условия для расположения заземления [13,90].

Таблица 1.7 – Максимальное значение коэффициента напряжение шага в сложных заземлениях

Тип заземления	**Графическое представление**	**β_1**
Вертикальные электроды, расположенные в ряд, соединенные полосой, заглубление 0.8м		0.6
Групповой контурный с внутренними параллельными полосами, заглубление 0.5м		0.15
Групповой контурный из вертикальных стержней и с внутренними параллельными полосами, заглубление 0.5м		0.15
Групповой контурный из стержней и полос вокруг сооружения, заглубление 0.5м		0.3

В зависимости от состава (песок, глина и т.п.), размеров и плотности прилегания друг к другу частиц, влажности и температуры ρ грунтов изменяется в очень широких пределах. Наиболее важными факторами, влияющими на

величину ρ грунта, являются влажность и температура [14,91,92], а также плотность (таблицы 1.8–1.12).

Таблица 1.8 – Пределы электрического удельного сопротивления водосодержащих пород ρ

Геологический возраст пород	**Удельное сопротивление ρ, Ом·м**				
	Морской песок, глинистый сланец	**Континентальные пески, песчаник**	**Вулканические породы (базальты, туфы)**	**Граниты, габбро**	**Известняки, доломиты, ангидриты, соль**
Третичный, четвертичный период	1.0÷10.0	15.0÷20.0	$10.0 \div 2.0 \cdot 10^2$	$5.0 \cdot 10^2 \div 2.0 \cdot 10^3$	$50.0 \div 5.0 \cdot 10^3$
Мезозойский период	5.0÷20.0	$25.0 \div 1.0 \cdot 10^2$	$20.0 \div 5.0 \cdot 10^3$	$5.0 \cdot 10^2 \div 2.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^2 \div 1.0 \cdot 10^4$
Карбоновый период	10.0÷40.0	$50.0 \div 3.0 \cdot 10^2$	$50.0 \div 1.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3 \div 5.0 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^2 \div 1.0 \cdot 10^5$
Докарбоновый палеозой период	40.0÷200.0	$1.0 \cdot 10^2 \div 5. \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^2 \div 2.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3 \div 5.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4 \div 1.0 \cdot 10^5$
Докембрийский период	$1.0 \cdot 10^2 \div 2. \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^2 \div 5. \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^2 \div 5.0 \cdot 10^3$	$5.0 \cdot 10^3 \div 20.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4 \div 1.0 \cdot 10^5$

Сухой грунт любого вида практически не проводит электрического тока, поэтому его вид сильно не влияет на его удельное сопротивление [84]. Если грунт увлажняется, то его сопротивление резко уменьшается, но в разной мере, в зависимости от количества растворенных веществ. Влажность грунта зависит от его дисперсности и способности удерживать свободную воду. Например, песок очень быстро лишается влаги, в то время как глина удерживает ее долго [91]. Глина – порода, состоящая из плотных и очень мелких частиц, образующих с водой массу, хорошо задерживающую влагу, обладает весьма малой пористостью; при обычной влажности имеет относительно низкое сопротивление; является хорошим грунтом для устройства заземлений. Песок – рыхлая смесь зерен горных пород, имеет пористую структуру, обладает большой плотностью и очень малой влагоемкостью.

Таблица 1.9 – Значения пористости Ф, параметров a_* и m_* для водонасыщенных пород

Формации водонасыщенных пород	**Ф**	a_*	m_*
Песок (Девон, мел, эоцен)	0.15÷0.367	0.62	2.15
Песчаник (Юра)	0.14÷0.23	0.62	2.10
Чистый миоценовый песчаник	0.11÷0.26	0.78	1.92
Чистый меловой песчаник	0.08÷0.25	0.47	2.23
Чистый ордовикский песчаник	0.07÷0.15	1.30	1.71
Сланцевый песчаник (Эоцен)	0.09÷0.22	1.80	1.64
Сланцевый песчаник (Олигоцен)	0.07÷0.26	1.70	1.65
Сланцевый песчаник (Мел)	0.07÷0.31	1.70	1.80
Оолитовый известняк (Мел)	0.07÷0.19	2.30	1.64
Оолитовый известняк (Юра)	0.09÷0.26	0.73	2.10
Кремнистый известняк (Девон)	0.07÷0.30	1.20	1.88
Известняк (Мел)	0.08÷0.30	2.20	1.65

Таблица 1.10 – Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод

Образец породы	**Сопротивление при 20°С, Ом·м**	
	Пределы изменения	**Среднее значение**
Изверженные породы	3.0÷40.0	7.60
Современные и плейстоценовые континент. осадки	1.0÷27.0	3.90
Третичные осадки	0.7÷3.5	1.40
Мезозойские осадочные породы	0.31÷47.0	2.50
Палеозойские осадочные породы	0.29÷7.1	0.93
Хлоридные воды нефтяных месторожд.	0.049÷0.95	0.16
Сульфатные воды нефтяных месторожд.	0.43÷5.0	1.20
Бикарбонатные воды нефтяных месторожд.	0.24÷10.0	0.98

При обычной влажности песок имеет высокое сопротивление и является плохим грунтом для устройства заземлений. Супесь больше похожа на песок с примесью небольшого количества глины. Чернозем – рыхлая почва с большими влагоемкостью и содержанием перегноя [92]. Он часто имеет удельное сопротивление, близкое к сопротивлению глины.

Горные породы, различные структуры земли и естественные водные среды это полупроводники. Удельные электрические сопротивления для

водосодержащих пород [80] представлены в таблицах 1.8-1.12.

С ростом температуры t влагосодержащего грунта его ρ уменьшается, так как с повышением t увеличивается степень диссоциации молекул веществ, растворенных в воде. Эта закономерность сохраняется до тех пор, пока влага не начнет испаряться, что сопровождается резким увеличением сопротивления. Испарение влаги грунта происходит под воздействием температуры окружающего воздуха или из-за сильного ветра, который поднимает влагу из грунта [93]. В этом случае влаги лишается верхний слой грунта толщиной до 1м.

Таблица 1.11 – Рекомендуемые расчетные значения удельного электрического сопротивления верхнего слоя земли (мощностью не более 50м)

Слой земли	**Сопротивление земли, Ом·м**
Песок (при температуре выше 0°С):	
– сильно увлажненный грунтовыми водами	10.0÷60.0
– умеренно увлажненный	60.0÷130.0
– влажный	130.0÷400.0
– слегка влажный	400.0÷1500.0
– сухой	1500.0÷4200.0
Суглинок:	
– сильно увлажненный грунтовыми водами (при температуре выше 0 °С)	10.0÷60.0
– промерзший слой (при температуре -5 С)	60.0÷190.0
Глина (при температуре выше 0°С)	20.0÷60.0
Торф.:	
– при температуре около 0°С	40.0÷50.0
– при температуре выше 0°С	10.0÷40.0
Солончаковые почвы (при температуре выше 0°С)	15.0÷25.0
Щебень.:	
– сухой	Не менее 5000.0
– мокрый	Не менее 3000.0
Дресва (при температуре выше 0°С)	5500.0
Гранитное основание (при температуре выше 0°С)	22500.0

Таблица 1.12 – Пределы изменения значений ρ для разных типов грунтов

Тип грунта	Удельное сопротивление, ρ, Ом·м
Почвенный слой	$50.0\text{-}1.0\cdot10^4$
Пески чистые: сыпучие естественной влажности водоносные	 $4.0\cdot10^3\text{-}1.5\cdot10^5$ $150.0\text{-}2.0\cdot10^3$ $50.0\text{-}4.0\cdot10^2$
Пески с примесью глины (до 3%): неводоносные водоносные	 80.0-200.0 55.0-130.0
Супеси, (3-16% глины): неводоносные водоносные	 45.0-115.0 20.0-70.0
Суглинки, (12-25% глины): неводоносные водоносные	 17.0-46.0 17.0-32.0
Глины (более 25% глины): неводонасыщенные водонасыщенные	 1.0-30.0 0.7-20.0
Галечники чистые: неводоносные водоносные	 $4.0\cdot10^2\text{-}1.0\cdot10^4$ $2.0\cdot10^2\text{-}1.0\cdot10^3$
Песчано-глинистые отложения с гравием, галькой и валунами: неводоносные водоносные	 $90.0\text{-}3.0\cdot10^3$ $25.0\text{-}8.0\cdot10^2$
Щербнисто-древесные отложения: с супесчаным заполнителем с глыбами (до 40%)	 270.0-330.0 420.0-780.0
Валунно-галечные отложения с песчаным заполнителем: неводоносные водоносные	 $8.0\cdot10^2\text{-}2.0\cdot10^4$ $85.0\text{-}4.0\cdot10^3$
Известняки	$60.0\text{-}5.0\cdot10^3$
Скальные породы (сланцы, граниты): разрушенные и выветренные крепкие	 $6.0\cdot10^2\text{-}1.0\cdot10^3$ $2.0\cdot10^3\text{-}1.0\cdot10^5$

Анализ приведенной информации позволяет сделать вывод, что точное определение ρ – сложная задача, которую в настоящее время нельзя считать решенной. При расчетах сопротивления ЗУ ПУЭ рекомендует брать ρ, измеренное, как правило, в летнее время и умноженное на поправочные коэффициенты, которые должны учитывать наихудшие климатические условия. Однако, полученные по этим рекомендациям значения ρ, как правило, далеки от

реальных, зачастую эти значения получаются сильно завышенными.

В литературе имеется ряд эмпирических зависимостей, рекомендуемых для определения ρ грунта от его влажности и температуры, но, как показали расчеты, формула ρ в зависимости от влажности [80], например, практически не пригодна для сыпучих грунтов

$$\rho = a_* \rho_w \Phi^{-m_*} S^{-n_*}, \qquad (1.44)$$

где ρ_w – удельное электрическое сопротивление содержащейся в породе воды;

Ф – пористость;

S – доля порогового объема, заполненного водой;

a_*, m_*, n_* – эмпирические параметры (приложение Б).

Параметр m принимается от 1,3 для рыхлого песка до 2,5 для плотно сцементированной зернистой породы. В приложении В представлены значения Ф, a_*, m_* для водосодержащих пород [80]. Если вода заполняет более 30% порового пространства, то n=20, если же зерна минералов не смочены, то параметр n_*=10. В таблице 1.10 представлены значения ρ грунтовых вод, верхнего слоя земли мощностью до 50м [80] и пределы их изменений для разных типов грунтов (таблицы 1.11 и 1.12).

Для определения удельного сопротивление ρ грунта от температуры имеется зависимость, выражаемая формулой [80]

$$\rho_t = \rho_{20} e^{-0,022(t-20)}, \qquad (1.45)$$

где ρ_t, ρ_{20} – сопротивления при температурах t и 20 °С соответственно.

Однако, как показывают экспериментальные данные [94], представленная эмпирическая зависимость применима лишь для определенного диапазона значений температур. Формула (1.45) работает на интервале от +4°С до 24°С. Вне этого диапазона она начинает давать большую погрешность, а в отрицательном диапазоне вообще неприменима, как утверждают и ее авторы.

В справочниках и в ПУЭ приводятся ориентировочные значения ρ, которые могут отличаться от истинных в десятки и сотни раз [94]. Измерение его в самое неблагоприятное время на практике связано с серьезными затруднениями.

Поэтому эти измерения проводят в летнее время [84]. Для измерения ρ однородного грунта используется метод разового (глубокого) зондирования с помощью контрольного зонда с диаметром $d_з$=4-5см. Его погружают в землю вертикально на глубину $l_з$ м, предлагаемого заложения заземления, и измеряют его сопротивление $R_{изм}$, Ом. Затем вычисляют измеренное значение ρ по формуле, Ом·м

$$\rho_{изм} = \frac{R_{изм} 2\pi l_з}{\ln(4l_з / d_з)}. \qquad (1.46)$$

Для большей точности измерений этот зонд погружают в землю в трех-четырех местах исследуемой площадки и в качестве расчетного $R_{изм}$ принимают среднее арифметическое значение. Для многослойного грунта используется метод послойного (ступенчатого) зондирования [84] с помощью контрольного зонда, погружаемого в землю в несколько приемов участками длиной $h_{пз} = 0{,}5 - 1{,}5$ м. Каждый участок представляет собой отдельный слой грунта со своим $R_{n,изм}$ при глубине $l_{nз}$. Измеренное ρ, соответствующее данной глубине погружения зонда, определяется по формуле (1.46) для каждого из n слоев грунта, Ом·м. После чего вычисляются ρ каждого слоя грунта:

$$\rho_{n,изм} = \frac{h_{nз}}{\frac{l_{nз}}{\rho_{n,изм}} - \frac{l_{(n-1)з}}{\rho_{n-1,изм}}}. \qquad (1.47)$$

Полученное значение ρ умножается на коэффициент сезонности [84]. Этот метод часто используется, т.к. дает более точный результат. Как видно, это очень трудоемкие измерения и проводить зимой их весьма сложно.

Выводы

Анализ приведенных методик и моделей расчета заземляющих устройств и расчета напряжения прикосновения и шага позволяет сделать следующие выводы:

– существующие достаточно точные модели и методы расчета ЗУ используют удельное электрическое сопротивление слоев грунта, в котором будут

располагаться заземления;

– существующие методы расчета напряжения прикосновения и шага используют удельное электрическое сопротивление слоев грунта, в котором располагается заземляющее устройство или происходит растекание тока;

– рекомендуемые методики измерения удельного электрического сопротивления ρ и пересчет его с помощью сезонных коэффициентов дают значительную погрешность;

– имеющиеся модели определения ρ от влажности и температуры малопригодны для расчета удельного электрического сопротивления слоев грунта в реальных условиях;

– существующие методы и рекомендации не позволяют учесть сезонное изменение удельного электрического сопротивления, например, в сезон снеготаянья или в период обильных дождей, а также в период засухи или сильных морозов, что ведет к ошибочному расчету напряжений прикосновения и шага и может способствовать травмированию обслуживающего персонала;

– ввиду сложности задачи определения ρ различных грунтов в реальных условиях, то есть в разное время года и на разных глубинах залегания, требуется разработка его модели имитационного характера, учитывающей изменение температуры и влажности грунта под воздействием климатических факторов.

1.4 Основная концепция работы

Для решения вышеозначенных сложных задач выбран единый подход: создание моделей на основе имитации всех основных реальных процессов с использованием методов искусственного интеллекта; тем самым расширяется спектр разрабатываемых моделей параметров электротехнических комплексов мощных энергоемких непрерывных производств, повышается полнота данных технических систем и их интеллектуальность и, в конечном итоге, эффективность функционирования последних.

1. Управление электротехническими комплексами подразделяется на два уровня: верхний, где решаются задачи глобального характера, определяющие стратегию управления технического комплекса в целом, и нижний, определяющий режимы работы механизмов, с помощью которых непосредственно реализуется технологический процесс.

2. Прогнозирование электропотребления (используемой мощности) электротехническими комплексами предприятий – сложная задача, и ее решение должно базироваться на знании особенностей технологического процесса самих предприятий с целью выявления значимых факторов и закономерностей, влияющих на искомые электротехнические параметры, а также на достижениях компьютерной техники, позволяющей выполнять собственно сам процесс моделирования.

3. Рассматриваемый тип непрерывного производства обладает свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости, что не позволяет производить моделирование его энергопотребления на основе статистических данных. Поэтому разработка моделей должна базироваться на уравнениях материального баланса вещества и энергии его технологических переделов, при этом, ряд особо сложных закономерностей может быть определен на основе теории нечетких множеств.

4. Изменение технологического режима, вызванное, к примеру, минералогическим составом сырья, может вызвать резкое увеличение или уменьшение энергопотребления, поэтому актуальна разработка моделей:

1) статической, рассчитывающей объем электропотребления при выбранном технологическом режиме;

2) динамической, способной определить:

– объем превышения (или уменьшения) потребления электроэнергии по сравнению с прежним режимом производства;

– длительность и характер переходного процесса изменения электропотребления во времени.

5. Решение вышеперечисленных задач позволит выработать стратегию управления электропотреблением при изменении технологического режима

производства, не ухудшая равномерности (а может даже и улучшая) графика нагрузки энергосистемы.

6. В связи с условиями рынка, вынуждающими к постоянному поиску новых технологических решений, обеспечивающих наибольшую прибыль, актуальна разработка модели оперативного управления рассматриваемым производством, способной определить оптимальные технологические режимы с точки зрения повышения энергоэффективности производства и минимизации себестоимости готовой продукции при существующем или прогнозируемом уровне цен. Ввиду сложности оптимизационной задачи для ее решения целесообразно применение методов искусственного интеллекта.

7. Для реализации задач, описанных в пунктах 1–5, способных выполнить процессы моделирования, многомерной многокритериальной оптимизации и построения графиков энергопотребления, необходима разработка алгоритмов и программ.

8. Так как рассматриваемое производство является энергоемким, то на его территории имеются ОРУ, подводятся линии с напряжением 110кВ, его электротехнический комплекс содержит мощные синхронные и асинхронные электродвигатели. Поэтому одной из важнейших задач является безопасность и надежность работы подобных ЭТК.

9. Заземляющие устройства – неотъемлемый компонент любого электротехнического комплекса, основной функцией которых является обеспечение нормальной и безопасной работы электрооборудования. Основной параметр ЗУ, сопротивление, находится в прямой зависимости от ρ, а ρ колеблется в широких пределах, так как зависит от температуры и влажности грунта, что сказывается и на величине напряжения прикосновения и шага. Определение ρ для расчета ЗУ, которое выполнялось по ранее предлагаемым методикам, приводит к перерасходу материалов, а напряжение прикосновения и шага даже могут быть вычислены ошибочно в период активного снеготаянья и ливневых дождей. Поэтому ввиду сложности задачи актуальна разработка модели ρ от температуры и влажности в течение года на интересующей исследователя

глубине и с достаточной для практики точностью, а ввиду неопределенности информации, моделирование целесообразно выполнять на основе теории нечетких множеств, специально разработанной для подобных задач.

10. Плотность грунта оказывает влияние на величину ρ. Однако количественная оценка этого влияния в литературе представлена без учета состояния грунта (наличия в нем влаги, пустот и комков). Поэтому возникает необходимость моделирования зависимости ρ грунта от его плотности.

11. Анализ имеющихся программ по расчету сопротивлений заземлений показал, что их основным недостатком является ввод измеренного в летний период ρ грунта, умноженного на сезонные коэффициенты, или среднего его значения без учета зависимости ρ от температуры и влажности. Следовательно, в данной работе актуальны разработка алгоритмов и программ для определения параметров ЗУ, а также расчета напряжения прикосновения и шага на основе полученных моделей ρ грунта.

2 Прогнозирование электропотребления электротехнического комплекса нелинейного непрерывного инерционного производства

2.1 Постановка задачи

Согласно анализу, проведенному в параграфах 1.1 и 1.2, и выводам, сформулированным в параграфе 1.3, решение задачи построения модели энергопотребления ЭТК и предупреждения техногенных катастроф рассматриваемого и ему подобным производствам должно базироваться на определении потоков веществ технологических участков и удельного энергопотребления по каждому потоку, затрачиваемого на преобразование и перемещение последнего.

1. Следовательно, в основу разрабатываемой модели должны быть положены уравнения материального баланса веществ всего технологического процесса с определением объемов потоков веществ, проходящих через все технологические участки производства с последующим умножением на удельное потребление электроэнергии по каждому потоку.

2. Таким образом, для стационарной модели энергопотребления ЭТК в каком-то определенном установившемся режиме, необходимо разработать систему нелинейных алгебраических уравнений материального баланса веществ по каждому технологическому участку и одного дифференциального уравнения, описывающего кинетику перехода основного вещества из жидкого состояния в твердое.

3. Коэффициенты этого дифференциального уравнения представляют собой сложные зависимости перехода Al_2O_3 из жидкого состояния в твердое под воздействием температуры, концентрации щелочи $Na_2O_к$ и катализаторов. Поэтому для упрощения модели следует воспользоваться зарекомендовавшим себя в решении подобных задач одним из методов искусственного интеллекта, теории нечетких множеств, и заменить эти коэффициенты формулами, полученными на её основе.

4. Предлагаемая модель прогнозирования электропотребления ЭТК непрерывного нелинейного производства строится на основе имитации определяющих технологических процессов, проходящих в технологических участках, поэтому моделирование должно выполняться с последовательным расчетом значений по каждому технологическому переделу. В связи с этим, необходимо произвести выбор численных методов решения этих систем уравнений и определить интервалы устойчивости.

5. Модель имеет в своем составе дифференциальные уравнения. Следовательно, необходимо выбрать численный метод интегрирования, определить накопление погрешности на временном отрезке интегрирования и реализовать численный алгоритм интегрирования.

6. Разработанная по такому принципу модель, позволит определять энергопотребление ЭТК данного производства при любом режиме его функционирования, не требуя накопления статистики при различных режимах, для построения прогноза потребления электрической энергии.

7. Для решения задачи прогнозирования изменения энергопотребления ЭТК рассматриваемого и ему подобным производствами при переходе на иные режимы функционирования необходимо моделирование динамики изменения потоков веществ во времени. Эта проблема должна решаться введением в балансовую модель системы дифференциальных уравнений преобразования основного вещества вдоль ниток аппаратов декомпозиции, а также добавлением модели буферных емкостей между технологическими участками производства.

8. Для получения динамики изменения энергопотребления ЭТК рассматриваемого типа производства выполнить эксперименты на полученной модели при изменении основных его управляемых параметров.

9. Для предупреждения техногенных катастроф в данном типе производств, в разрабатываемую динамическую модель включить моделирование буферных емкостей. Провести эксперименты на модели с изменением всех внешних управляемых параметров.

2.2 Основы теории нечетких множеств

Неопределенная информация о каком-либо объекте или процессе или их характеристиках может возникнуть при полной неопределенности или когда известен лишь предполагаемый диапазон изменений рассматриваемых величин. Решение задачи в этом случае до появления теории нечетких множеств было практически невозможно или сводилось к вероятностному определению.

Теория нечетких множеств была впервые предложена американским ученым Лотфи А. Заде (Lotfi Zadeh) в 1965 г. [95]. Его работа «Fuzzy Sets» в журнале Information and Control, №8, заложила основы моделирования интеллектуальной деятельности человека и явилась начальным толчком к развитию новой математической теории. Основной причиной появления новой теории стало наличие нечетких и приближенных рассуждений при описании человеком процессов, систем, объектов.

Математическая теория нечетких множеств и нечеткая логика [96 –103] являются обобщениями классической теории множеств и классической формальной логики. Этот аппарат включает в себя нечеткость и неопределенность выражений, который прекрасно подходит для решения сложных процессов, в которых данные, цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными для того, чтобы допустить точный математический анализ [97,104,105]. Л. Заде расширил классическое канторово понятие множества, допустив, что характеристическая функция (функция принадлежности элемента множеству) может принимать любые значения в интервале [0,1], а не только значения 0 или 1.

Математическая теория нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. Здесь допускаются результаты несколько размытые или неопределенные. Это обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реального мира. Наличие математических средств отражения такой исходной информации позволяет построить модель, адекватную реальности.

Преимущества fuzzy-систем по сравнению с другими:

1) возможность оперировать нечеткими данными: например, непрерывно изменяющимися во времени значениями (динамические задачи), которые невозможно задать однозначно;

2) возможность нечеткой формализации критериев оценки и сравнения: оперирование критериями «большинство», «возможно», «преимущественно» и т.д.;

3) возможность проведения качественных оценок, как входных данных, так и выходных результатов: оперируются не только значения данных, но и их степень достоверности;

4) возможность проведения быстрого моделирования сложных динамических систем и их сравнительного анализа с заданной степенью точности, оперируя принципами поведения системы, описанными fuzzy-методами.

То есть, во-первых, не тратится много времени на выяснение точных значений переменных и составление описывающих уравнений, во-вторых, оцениваются разные варианты выходных значений.

Нечеткое моделирование выполняется по следующим этапам:

1) анализ факторов, создающих проблемную ситуацию в системе;

2) структуризация этой ситуации и построение нечеткой модели;

3) выполнение вычислительных экспериментов или наблюдений с нечеткой моделью;

4) использование полученных результатов;

5) корректировка и доработка полученной модели.

Использование нечеткости при построении условных высказываний позволяет формально включать в них знания экспертов, выраженные вербальными категориями, например, «высокая концентрация реагента», «низкая температура», «среднее давление», «влажно», «сухо», «сильно влажно» и т.п. В результате удается получить модель представления данных об объекте, отражающую его поведение при изменении влияющих на него параметров.

Нечеткие множества. Основные характеристики нечетких множеств.

Пусть дано произвольное универсальное множество E. Под понятием «множество» понимают совокупность элементов, обладающих некоторым общим свойством. Назовем его базовым множеством, а R – некоторое свойство множества. При этом на языке обычных множеств, любой элемент либо принадлежит, либо не принадлежит данному множеству.

В природе зачастую данная аксиома не отвечает процессам, протекающим в сложных системах, например, «идет процесс растворения» или «идет процесс выпадения в осадок». Известно, что одновременно с процессом растворения идет и процесс образования нерастворенных кристаллов. Понятие нечеткого множества основывается на предположении о том, что любой элемент лишь в некоторой степени принадлежит данному множеству. То есть, если в произвольном универсальном множестве E задать нечетко некоторое подмножество A, в котором для элементов этого множества нет однозначного ответа «да – нет» (1 или 0) относительно свойства *R*, то степень принадлежности любого элемента $x \in E$ множеству E может быть оценена с помощью функции принадлежности $\mu(x): E \rightarrow [0;1]$, которая обладает тем свойством, что в любой точке выполняется условие: $\sum_{i=1}^{M} \mu_i(x) = 1.$

Функция принадлежности – это некоторое субъективное измерение нечеткой принадлежности элемента заданному множеству, и это измерение отличается от вероятностной меры. Для каждого конкретного элемента $x \in E$ величина $\mu(x)$ принимает конкретное значение на интервале [0;1]. Это значение функции и называют степенью принадлежности элемента $x \in E$ нечеткому множеству A.

Для описания нечетких множеств вводится понятия нечеткой или лингвистической переменной, значением которой являются не числа, а слова естественного языка, называемые термами. Значениями лингвистической переменной могут быть нечеткие переменные, т.е. лингвистическая переменная находится на более высоком уровне, чем нечеткая переменная. Каждая лингвистическая переменная состоит из:

- названия, например, «температура», «давление», «влажность»;
- множества своих значений, которое также называется базовым терм-множеством T. Элементы базового терм-множества представляют собой названия нечетких переменных, например, «низкая», «высокое», «сухо», «влажно», «сильно влажно»;
- универсального множества E;
- синтаксического правила R, по которому генерируются новые термы с применением слов естественного или формального языка;
- семантического правила P, которое каждому значению лингвистической переменной ставит в соответствие нечеткое подмножество множества X.

Так как понятия «влажный», «сухой» не определены, то для эксперта заданным является терм-множество: T_1(«величина влажности»)={«сухой», «влажный», «сильно влажный»}. Или для определения давления терм-множество имеет вид: T_1(«величина давления»)={« низкое», «среднее», «высокое»}.

Затем строятся функции принадлежности для каждого лингвистического терма. Для того, чтобы согласовывать мнения различных экспертов, удобно построить «гладкий» график функции принадлежности на базовой шкале области определения. Это позволит для каждого конкретного факта или события заданной области определения лучше оценивать принадлежность заданному классу. Построение «гладкой» функции по известному набору значений степени принадлежности в некоторых точках базовой шкалы, или на носителе нечеткого множества, требует использования классических методов аппроксимации. Так, метод наименьших квадратов позволяет получить достаточно гладкую функцию $\mu_A(x)$, которая равномерно приближается в смысле среднего квадратического отклонения к заданному набору точек. Существует свыше десятка типовых форм кривых для задания функций принадлежности. Стандартные функции принадлежности показаны на рисунке 2.1, которые легко применимы к решению большинства задач.

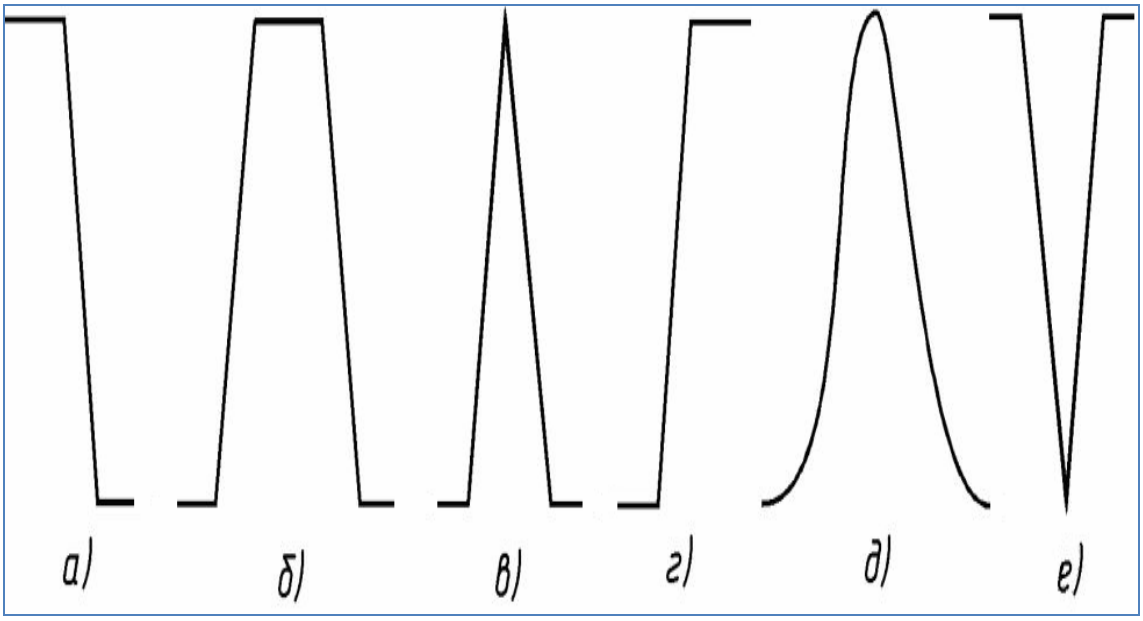


Рисунок 2.1 – Стандартные функции принадлежности: а) Z-функция; б) П-функция; в) Л-функция; г) S-функция; д) Гауссова; е) V-функция

Наибольшее распространение получили: треугольная, трапецеидальная и гауссова функции принадлежности. Треугольная (рисунок 2.1,в) определяется тройкой чисел (a,b,c). Их значения в точке *x* вычисляются по выражениям [101]

$$\mu(x)=\begin{cases}1-(b-x)/(b-a), & a\le x\le b\\ 1-(x-c)/(c-b), & b\le x\le c\\ 0, \text{ в остальных случаях}\end{cases}. \qquad (2.1)$$

Если $\mu(x)$ треугольная функция (Л-функция) и (b-a)=(c-b), то она симметрична.

Трапецеидальная функция принадлежности класса П (рисунок 2.1,б) определяется через функцию класса S.

$$\mu(x)=\begin{cases}s(x;c-b,c-b/2,c), & x\le c,\\ 1-s(x;c;c+b/2,c+b), & x\ge c\end{cases}, \qquad (2.2)$$

где $b=(a+c)/2$ или $\mu(x)=\begin{cases}1-(b-x)/(x-a), & a\le x\le b\\ 1, & b\le x\le c\\ 1-(x-c)/(d-c), & d\le x\le c\\ 0, \text{ в остальных случаях}\end{cases}$

Если трапецеидальная ФП (П-функция) и (b-a)=(d-c), то она принимает симметричный вид.

Функция принадлежности Гауссова типа [101] (рисунок 2.1,д), имеет вид

$$\mu(\nu) = \exp\left[-\left(\frac{\nu - \sigma_{\phi}}{\delta_{\phi}}\right)^2\right] \tag{2.3}$$

Она оперирует двумя параметрами. Параметр σ_{ϕ} обозначает центр НМ, а параметр δ_{ϕ} отвечает за крутизну функции.

Функция принадлежности класса Z (рисунок 2.1,а) определяется как

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \le a, \\ 1 - \dfrac{x - a}{b - a}, & a \le x \le b, \\ 0, & x \ge b \end{cases} \tag{2.4}$$

Функция принадлежности класса S (рисунок 2.1,г) определяется с помощью выражения

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \le a, \\ \dfrac{b - x}{b - a}, & a \le x \le b, \\ 1, & x \ge b \end{cases} \tag{2.5}$$

V-функция принадлежности (рисунок 2.1,е) определяется следующим образом

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \le a, \\ 1 - \dfrac{x - a}{b - a}, & a \le x \le b, \\ 1 - \dfrac{c - x}{c - b}, & b \le x \le c, \\ 1, & x \ge c \end{cases} \tag{2.6}$$

О методах построения функций принадлежности. В приведенных выше

примерах использованы *прямые* методы, когда эксперт либо просто задает для каждого $x \in E$ значение $\mu_A(x)$, либо определяет функцию совместимости. Как правило, прямые методы задания функции принадлежности используются для измеримых понятий, таких как давление, температура, скорость, время, расстояние и т.д., или когда выделяются полярные значения.

Во многих задачах при характеристике объекта можно выделить набор признаков и для каждого из них определить полярные значения, соответствующие значениям функции принадлежности, 0 или 1.

Совокупность функций принадлежности для каждого терма из базового терм-множества T изображаются вместе на одном графике. На рисунке 2.2 приведен пример описанной выше лингвистической переменной «Влажность».

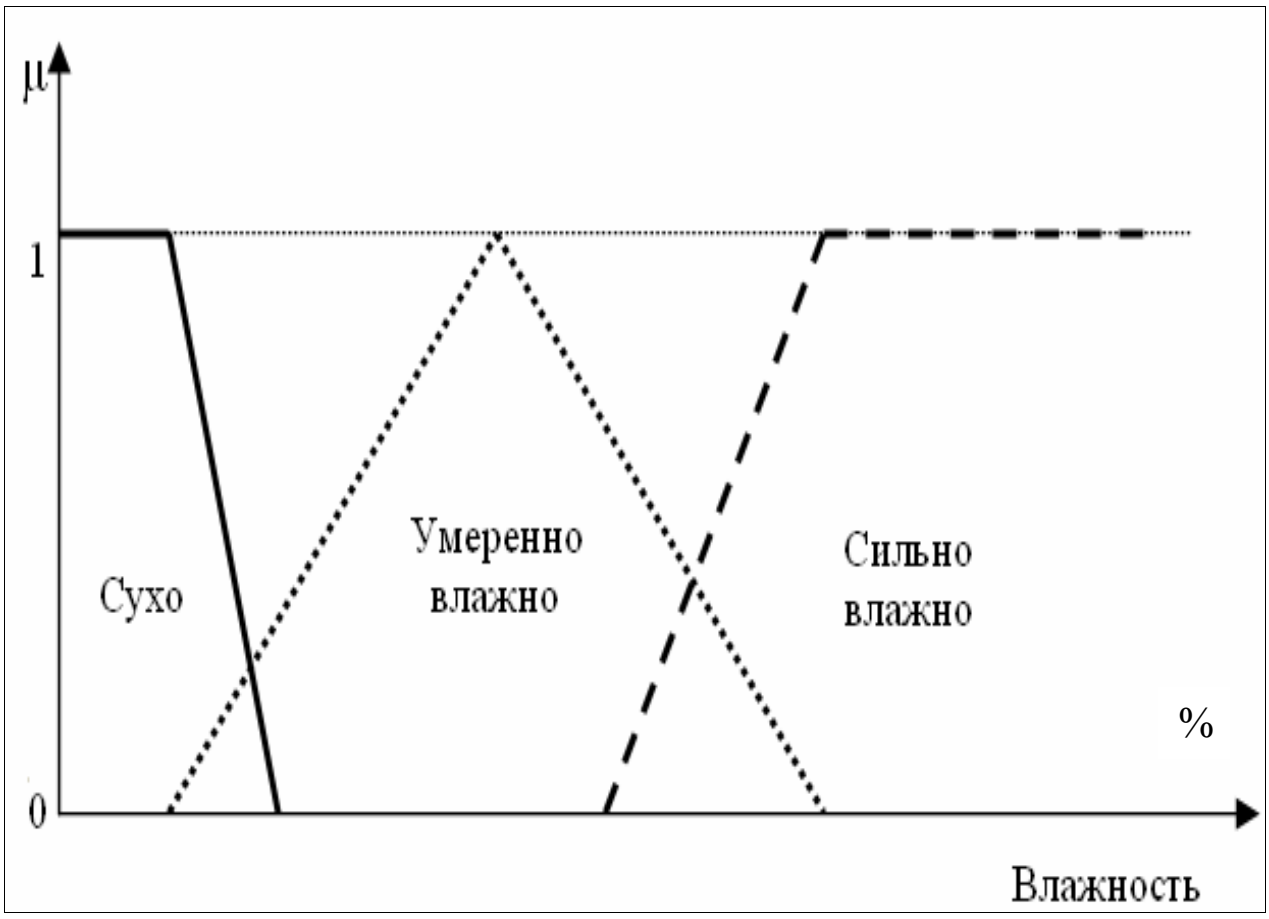


Рисунок 2.2 – Описание лингвистической переменной «Влажность»

Для нахождения верного пути и для проведения операции нечеткого логического вывода создается база нечетких правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «если – то» и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов. Совокупность таких правил описывает стратегию управления, применяемую в данной задаче.

Большинство нечетких систем используют продукционные правила для описания зависимостей между лингвистическими переменными. Типичное продукционное правило состоит из антецедента (часть IF …) и консеквента (часть THEN…). Антецедент может содержать более одной посылки. В этом случае они объединяются посредством логических связок И или ИЛИ. Общий вид [101-105]

$$\text{IF}(x_1 \in A_{1i}) \text{И} (x_2 \in A_{2i}) \text{И} \ldots \text{И} (x_k \in A_{ki}) \ \text{THEN} \, y = \eta_i(x), i = 1,\ldots, N,$$

где A_{ji} – нечеткое подмножество, то есть нечеткий интервал, для переменной x_j с функцией принадлежности $\mu_{ji}(x)$, N – число правил (число интервалов); $y = \eta_i(x)$ – функция, определяющая локальное решение модели от набора $x=(x_1, \ldots, x_k)$.

Все системы с нечеткой логикой функционируют по одному принципу [101,104,105], например показания измерительных приборов, фаззифицируются, то есть преобразуются в нечеткий формат, обрабатываются, дефаззифицируются и далее подаются на выход, например на исполнительные устройства в виде обычных сигналов.

Так, формализация задачи в терминах нечеткой логики для одной переменной представляет следующую последовательность шагов:

1. Для каждого терма лингвистической переменной определяется диапазон значений, наилучшим образом характеризующих данный терм и для него задается единичное значение функции принадлежности.

2. Далее определяется значение параметра с принадлежностью «0» к данному терму.

3. После определения экстремальных значений определяются ФП, например S- или Z-функции, для промежуточных значений выбираются П- или Л-функции.

Решение задачи в терминах нечеткой логики для нескольких переменных осуществляется в четыре этапа:

1) Введение нечеткости, фазификация. Функции принадлежности, определенные на входных переменных применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2) Логический вывод. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила, что приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются операции логического умножения (min). В логическом выводе «минимума» функция принадлежности вывода «отсекается» по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечеткая логика «И»).

3) Следующий этап – композиция. Все нечеткие подмножества, объединяются вместе, формируя одно нечеткое подмножество для переменной вывода. При подобном объединении обычно используются операции max «максимум» или sum «сумма».

4) Заключительный этап – приведение к четкости (дефазификация).

Например, некоторая система описывается следующими нечеткими правилами [103]:

правило1: если x есть A, тогда w есть D;

правило2: если y есть B, тогда w есть E;

правило3: если z есть C, тогда w есть F.

Здесь x, y и z – имена входных переменных, w – имя переменной вывода, а A, B, C, D, E, F – заданные функции принадлежности.

Процедура получения логического вывода иллюстрируется рисунком. 2.3. Входные переменные принимают некоторые конкретные (четкие) значения – x0, y0 и z0. На этапе 1 для данных значений и исходя из функций принадлежности A, B, C, находятся степени истинности a(x0), b(y0) и c(z0) для предпосылок каждого из трех приведенных правил (см. рисунок 2.3).

На этапе 2 происходит «отсекание» функций принадлежности заключений правил (т.е. D, E, F) на уровнях a(x0), b(y0) и c(z0).

На этапе 3 рассматриваются усеченные на втором этапе функции принадлежности и производится их объединение с использованием операции max, в результате чего получается комбинированное нечеткое подмножество, описываемое функцией принадлежности $\mu_{\Sigma}(w)$ и соответствующее логическому выводу для выходной переменной w.

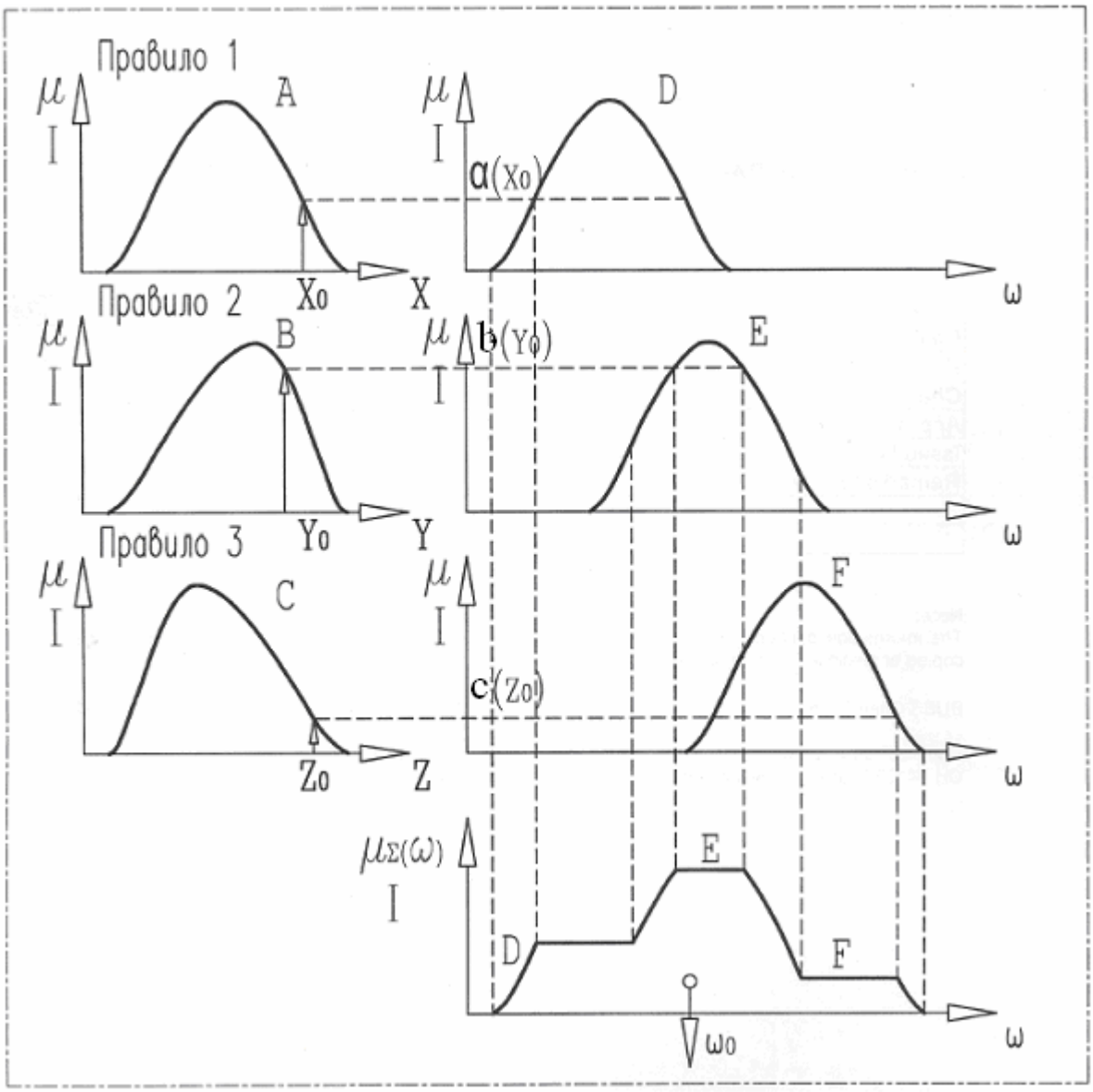


Рисунок 2.3 – Иллюстрация получения четкого вывода посредством нечетких правил

На 4-м этапе – при необходимости – находится четкое значение выходной переменной, например, с применением центроидного метода [97]: четкое значение выходной переменной определяется как центр тяжести для кривой $\mu_{\Sigma}(w)$:

$$w_0 = \frac{\int_{\Omega} w\mu_{\Sigma}(w)dw}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(w)dw}. \qquad (2.8)$$

Таким образом, математический аппарат нечеткой логики может быть использован при нечетко определенных данных с получением четкого результирующего значения. Это позволяет строить модели, которые наиболее адекватно отражают различные аспекты неопределенности при расчете сложных задач.

2.3 Балансовые уравнения статической модели нелинейного непрерывного производства

Энергопотребление ЭТК энергоемкого предприятия, каким является глиноземное производство, целиком определяется его сутью. Следовательно, при решении задач функционирования такого ЭТК, необходимо опираться на технологический процесс данного производства. Как было показано в разделах 1.1 и 1.2, решение задачи такой сложности возможно на основе построения адекватной модели, использующей знания о технологическом процессе предприятия. Энергопотребление в непрерывных производствах и, в частности, в рассматриваемом, направлено на переработку и перемещение материальных потоков, циркулирующих в данных производствах. Поэтому для решения задачи энергопотребления данного производства в стационарном режиме была разработана его статическая модель, имитирующая весь технологический процесс с получением всех материальных потоков и определением энергозатрат по ним.

Модель разработана на основе уравнений материального баланса. Принцип материального баланса подразумевает равенство суммы потоков вещества (или энергии), входящих в узел преобразования и выходящих из него. Таким образом, модель строилась, основываясь на этом положении.

В качестве модели-прототипа была взята модель переделов рассматриваемого производства [63, 106]. Она была упрощена; были изменены и условия ее идентификации, которые требовали совпадения номинальных значений расходов и показателей состава полупродуктов на выходе всех участков, когда как для расчета электропотребления точность модели должна обеспечивать лишь совпадение координат циклограммы (Рисунок 1.4), моделируемых и фактических, а также удельных затрат материалов и энергоносителей, связанных с этими координатами. Подробнее идентификация рассмотрена в разделе 2.6. Модель электропотребления всего производства была представлена в виде семи блоков (рисунок 2.4.), привязанных к технологическому циклу Байера (см. рисунок 1.5).

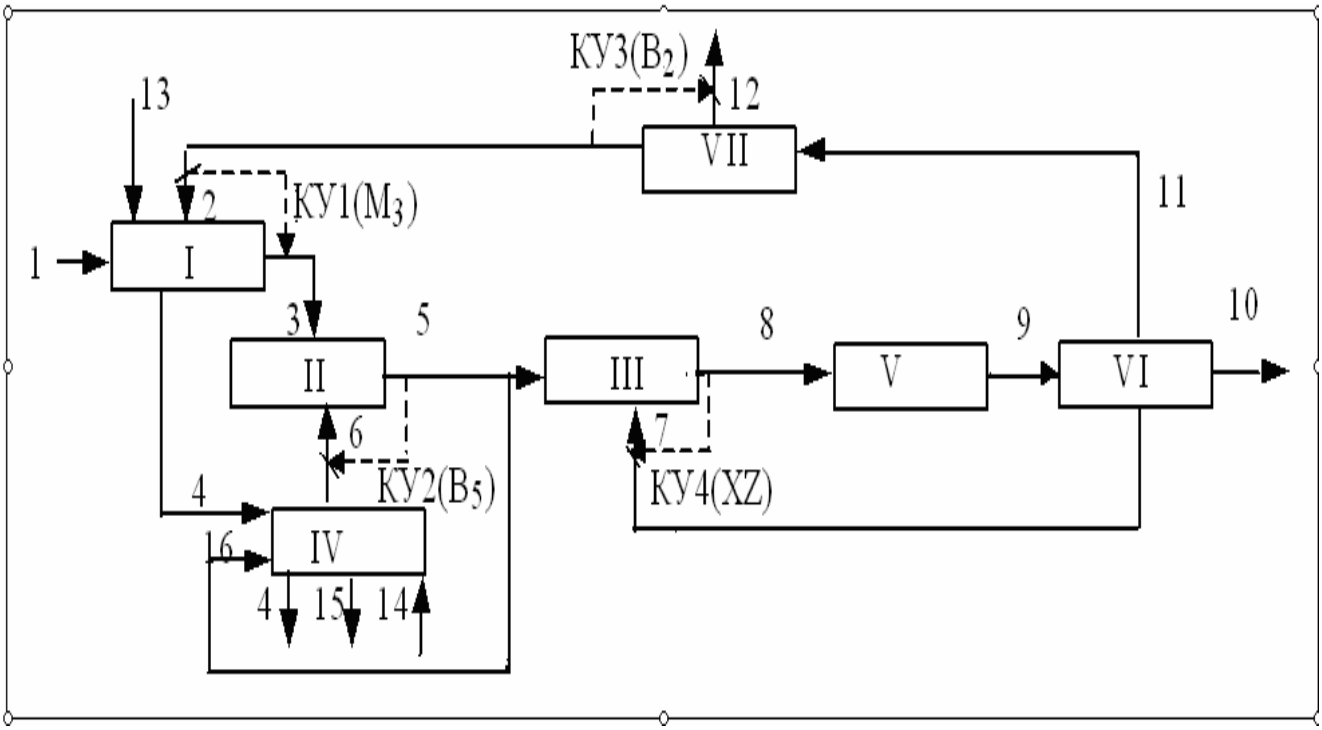


Рисунок 2.4 – Принципиальная структура статической модели электропотребления производства

Расчет электропотребления вдоль всего производственного кольца выполняется по формуле

$$W = K_э \cdot \sum_{i=1}^{16} W_{iэ} \cdot F_i , \qquad (2.9)$$

где Wiэ – затраты электроэнергии на *i*-ый материальный поток гидрохимического кольца (кВт.ч/ед.изм.F).

Их значения определяются мощностями приводов, насосов, мешалок и т.п. Кэ поправочный коэффициент, отражающий долю не учтенных затрат электроэнергии.

Блок I – энергопотребление при выщелачивании боксита; блок II – при разбавлении бокситовой пульпы щелочной водой с промывки шлама; блок III – при смешении пульпы с затравочным глиноземом; блок IV – при промывке шлама с целью извлечения щелочи; блок V – при разложении пульпы с получением глинозема; блок VI – при разделении на щелочной раствор, продукционный и затравочный гидрат; VII – при выпаривании оборотного щелочного раствора до требуемой концентрации. Входные и выходные потоки семи блоков-переделов производства обозначены на схеме оцифрованными стрелками. В основу моделирования j-тых блоков-переделов (j=I,II,III,IV,V,VI,VII) положены нелинейные алгебраические уравнения материального баланса, записываемые для всех i-тых потоков (i=1,2,...16), проходящих через моделируемый блок. Если i-тый поток не проходит через j-тый передел, то его величина приравнивается нулю. Модель имеет четыре контура управления, аналогично реально существующим в производстве, с помощью которых поддерживается концентрационный технологический режим КУ1→M_3, КУ2→B_5, КУ3→B_2, КУ4→XZ. В результате все производство было представлено в виде семи систем уравнений (2.10), которые решались последовательно, по блокам переделов, повторяя технологический процесс.

В общем виде системы уравнений можно представить соотношениями, описывающими баланс 16-ти потоков вещества (см. рисунок 2.4, на нем потоки

обозначены оцифрованными стрелками). Соотношения учитывают баланс потоков (Fi) по объему, баланс потоков (Fi·Di) по массе, баланс по щелочи (Bi), алюминию (Ai) в жидком состоянии, алюминию (Gi) в твердом состоянии, а также соотношение концентраций (щелочи и алюминия: Mi) для блоков-переделов j=I,II,III,IV,V,VI,VII (всего уравнений, описывающих процесс, более ста):

$$\begin{array}{ll} \sum_{i=1}^{16} K_{ij} \cdot B_i \cdot G_i \cdot F_i = 0 & \sum_{i=1}^{16} L_{ij} \cdot A_i \cdot G_i \cdot F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{16} H_{ij} \cdot F_i \cdot G_i = 0 & \sum_{i=1}^{16} I_{ij.} \cdot F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{16} I_{ij.} F_i \cdot D_i = 0 & M_i = 1.645 \cdot \frac{B_i}{A_i} \end{array} , \qquad (2.10)$$

где F_i – расходы растворов, D_i плотности растворов;

H_{ij} – весовое соотношение жидкого к твердому;

A_i и B_i – концентрации жидкой фазы Al_2O_3 и $Na_2O_к$ соответственно;

G_i – концентрации твердой фазы Al_2O_3;

I_{ij}, K_{ij}, L_{ij}, H_{ij} – функции i-го потока, имеющие положительное значение, если поток входящий, отрицательное, если выходящий и равные 0, если данный поток не проходит через j-ый моделируемый блок.

Для потока F_1 функции I_1, K_1 и L_1 представляют собой нелинейные зависимости характеристик боксита и плотности раствора D_1. Для потока F_9 функции K_9 и L_9 представляют собой зависимости от G_i – концентрации твердого Al_2O_3 в суспензии, а I_9 – функция степени выкрутки алюминатного раствора (относительные единицы). Для потока F_7 функции I_7 – нелинейная зависимость от затравочного отношения на входе V (отношение приносимых с потоком затравочного гидрата и алюминатного раствора количеств Al_2O_3). M_i – каустический модуль растворов, равный отношению концентраций щелочи к концентрации растворенного Al_2O_3.

В основу моделирования промывки шлама (блок IV) была положена известная формула Монтвида[63]

$$W_{п} = \frac{R_{п} \cdot W_{B} - 1}{(R_{п} \cdot W_{B})^{N_{п}+1} - 1}, \qquad \text{где } W_{B} = \frac{F_{14} \cdot D_{5}}{F_{4} \cdot H_{ш}}, \tag{2.11}$$

$H_{ш}$ – весовое отношение жидкого к твердому на конусе гидравлических отстойников Дорра (сгустителей и промывателей);

$N_{п}$ – число ступеней промывки шлама;

W_{B} – отношение потоков поступающих на промывку воды и жидкой фазы шлама;

$W_{п}$ – доля теряемой щелочи от пришедшей на промывку.

В нее введен мультипликативный идентифицирующий параметр $R_{п}$, он учитывает поступающие на промывку потоки оборотных и других переделов и содержание в них щелочи. Неравенство модулей алюминатного раствора и промводы вследствие гидролиза раствора учитывается идентификационной поправкой R_{h}: $M_{6} = M_{5} + R_{h}$. Используются линейные зависимости плотности растворов D_{i} от содержания в нем оксидов. Коэффициенты I_{4}, K_{4} и L_{4} для F_{4} представляют собой нелинейные функции $H_{ш}$ и D_{i}.

Модель кинетики в достаточной мере опробована в промышленной практике [106], поэтому значения основных ее параметров [107] были взяты без изменения и для настоящей работы [108-110]. В основу моделирования блока V (кинетики перехода оксида алюминия из раствора в твердую фазу) положено дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dA}{dl} = -R_{d} K_{d} \left(\frac{G_{8}}{1.529 - 0.629 G_{8}} + A_{8} - A \right) \cdot \left(\frac{A - A_{r}}{A_{r}} \right)^{2}. \tag{2.12}$$

При этом:

$A_{r} = 1.1 \cdot e^{2.3 \cdot p1}$,

где

$$p1 = 0.92 - 1.76 \cdot 10^{-2} T_d + 29 \cdot 10^{-4} B_8^{\,2} - 1.68 B_8 T_d \cdot 10^{-6} + 4.09 \cdot 10^{-4} T_d,$$

где A – концентрация оксида алюминия в растворе;

A_r – его равновесная концентрация, она имеет экспоненциальную зависимость от показателей состава раствора и его температуры;

l – длительность процесса разложения;

K_d – коэффициент, характеризующий скорость реакции.

2.4 Выбор коэффициента дифференциального уравнения статической модели электропотребления на основе нечеткой логики

Величина K_d (скорость реакции разложения раствора на составляющие) имеет сложную зависимость от трех параметров: температуры, концентрации щелочи и площади поверхности катализатора. Для упрощения вычислений данная скорость Kd была представлена нечеткой величиной, определяемой с помощью теории нечетких множеств для трех переменных, а именно: температуры, концентрации щелочи и площади поверхности катализатора.

Задача определения коэффициента дифференциального уравнения Kd на основе нечеткой логики [111] была выполнена в 4 этапа (см. рисунок 2.5).

На первом этапе определены функции принадлежности для каждого из параметров в виде треугольной (Л) функции:

для параметра T_d – «температура», правило I:

$$\mu_T = \begin{cases} 0 \quad \text{при} \, T_d < 30^o C \\ \dfrac{T_d - 30}{15} \, \text{при} \, 30^o C \le T_d < 45^o C \\ 1 - \dfrac{T_d - 45}{15} \, \text{при} \, 45^o C \le T_d < 60^o C \\ 0 \quad \text{при} \, T_d \ge 60^o C \end{cases}, \tag{2.13}$$

для параметра B_8 – «концентрация Na_2O_k», правило II:

$$\mu_{B_8} = \begin{cases} 0 \quad \text{при } B_8 < 5\% \\ \dfrac{B_8 - 5}{20} \text{ при } 5\% \le B_8 < 25\% \\ 1 - \dfrac{B_8 - 25}{20} \text{ при } 25\% \le B_8 < 45\% \\ 0 \quad \text{при } B_8 \ge 45\% \end{cases}, \tag{2.14}$$

для параметра S – «площадь поверхности катализатора», правило III:

$$\mu_S = \begin{cases} 0 \quad \text{при } S < 0.6 \\ \dfrac{S - 0.6}{1.6} \text{ при } 0.6 \le S < 2.2 \\ 1 - \dfrac{S - 2.2}{1.6} \text{ при } 2.2 \le S < 3.8 \\ 0 \quad \text{при } S \ge 3.8 \end{cases}. \tag{2.15}$$

На втором этапе находятся степени истинности для каждого параметра при конкретных текущих значениях T_d, B_8 и S. То есть формируется логический вывод при получении значений T_d, B_8, S.

На третьем этапе все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной, объединяются вместе, чтобы формировать одно нечеткое подмножество для переменной вывода. На рисунке 2.5 это неправильный восьмиугольник.

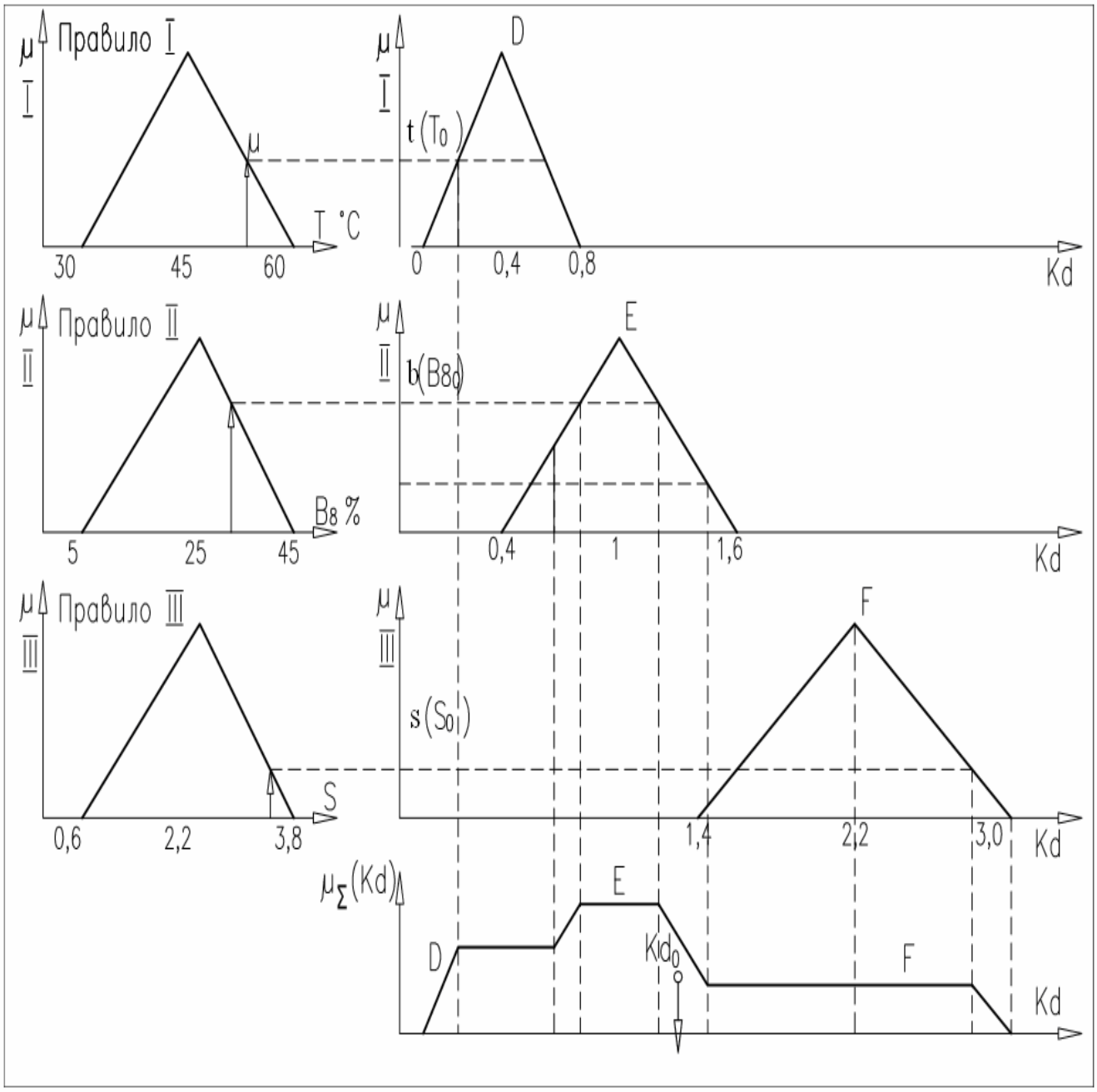


Рисунок 2.5 – Иллюстрация к решению задачи определения коэффициента скорости реакции K_d на основе использования теории нечеткой логики

На четвертом этапе вычисляется численное значение скорости реакции K_d с помощью выражения $K_d = \frac{\int_{K_d} K_d \mu_\Sigma(K_d) dK_d}{\int_{K_d} \mu_\Sigma(K_d) dK_d}$. (См. формулу 2.8)

Ход решения задачи представлен рисунком 2.5. Затем в модель был введен идентифицирующий параметр R_d, который корректирует кинетическую константу K_d под реальный процесс.

2.5 Обоснование выбора методов решения задач моделирования

Из раздела (2.3) видно, что исследуемый технологический процесс описывается системой нелинейных алгебраических уравнений (2.10 – 2.11) и одним дифференциальным уравнением, представляющим работу блока V (см. рисунок 2.9) для статической модели. При этом переменные в этой системе не являются независимыми, а представляют собой зависимости, которые невозможно представить аналитически. Пояснение этому факту дает циклограмма способа Байера (рисунок 1.4), которая иллюстрирует взаимозависимости отношений концентраций жидкой фазы Al_2O_3 и Na_2O при 3-х вариантах температуры технологического процесса.

Ввиду отсутствия возможности применения единого численного математического метода для решения такой сложной задачи, математическое описание процесса решено было представить в виде 7 отдельных блоков, которые должны были решаться последовательно, на каждом итерационном приближении повторяя технологический цикл производства.

В качестве метода решения систем нелинейных уравнений блоков I, II, III, IV, VI, VII был выбран метод простой итерации ввиду легкости его реализации для данной задачи. Известно, что для применения данного метода [112–116] решения систем нелинейных уравнений должно быть выполнено условие его сходимости. Если представить данную систему нелинейных уравнений в векторном виде

$$\mathbf{X}=\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), \qquad (2.16)$$

где $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})=(\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}),..., \varphi_m(\mathbf{x}))^T$, то по теореме о сходимости метода простой итерации видим следующее.

Теорема 1. [113,114] Пусть в некоторой области δ – окрестности решения $\mathbf{x}^{\cdot}$ функции $\boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x})$ (i=1,2,...,m) дифференцируемы, и выполнено неравенство

$$\left| \varphi'_i(\mathbf{x}) \right| \le q, \qquad (2.17)$$

где $0 \le q \le 1$; q – постоянная.

Тогда независимо от выбора начального приближения $\mathbf{x}[0]$ из указанной δ – окрестности корня, итерационная последовательность сходится со скоростью геометрической прогрессии, и справедлива следующая оценка погрешности

$$\left| \mathbf{x}[n] - \mathbf{x}^{\cdot} \right| \le q \left| \mathbf{x}[0] - \mathbf{x}^{\cdot} \right| . \qquad (2.18)$$

Условие (2.17) означает, что в окрестности решения частные производные $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}$ для всех i и j должны быть достаточно малы по модулю. Иными словами систему (2.16) следует преобразовать к такому виду, чтобы функции φ_i слабо менялись при изменении аргументов.

Анализ вида систем нелинейных уравнений, описывающих работу блоков I, II, III, VI, VII, показал, что эти системы нелинейных уравнений достаточно легко преобразовать к такому виду, поделив все уравнения, в которые входят значения потоков Fi, на значение равное максимально возможному потоку в кольце Байера. В результате таких преобразований было достигнуто выполнение условия (2.17) на интервале от 0 до Fmax, что достаточно для решения задачи моделирования.

Систему нелинейных уравнений, описывающих работу блока IV, оказалось весьма затруднительным преобразовать к виду, удовлетворяющему условию (2.17) на вышеуказанном интервале. Для увеличения области устойчивости получения решения к трем уравнениям системы было добавлено уравнение, описывающее баланс потоков F_3 и F_6 по щелочи с помощью следующей зависимости

$$F_3(b_3 - b_5) = F_6(b_3 - b_6) . \qquad (2.19)$$

В результате область устойчивости получения решения была увеличена до пределов изменения всех параметров модели для рассчитываемого режима производства, что полностью соответствует задачам модели.

Для ускорения сходимости и экономии оперативной памяти был использован следующий аналог метода Зейделя

$$\begin{cases} X_{1[k+1]} = \varphi_1(X_{1[k]}, X_{2[k]}, \ldots, X_{m[k]}) \\ X_{2[k+1]} = \varphi_2(X_{1[k+1]}, X_{2[k]}, \ldots, X_{m[k]}) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X_{m[k+1]} = \varphi_m(X_{1[k+1]}, X_{2[k+1]}, \ldots, X_{m[k]}) \end{cases} . \qquad (2.20)$$

Задача, которая решается блоком V, описываемая обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка для статической модели (см. выражения (2.12)), является задачей Коши. При выборе метода решения данной задачи преследовалась цель: метод должен иметь достаточную точность и иметь наименьшее число вычислений на каждой итерации. Наименьшее число вычислений для каждого шага интегрирования имеет простейший численный метод решения задачи Коши – метод Эйлера.

Приведем рассуждения, обосновывающие выбор метода Эйлера в качестве метода решения задачи Коши для данной модели. Пусть y(t) – решение обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка

$$y'(t) = f(t, y(t)) \qquad (2.21)$$

и Nт – множество точек (t,y) , удовлетворяющих условию

$$to \le t \le T, \; -\infty < y < +\infty,$$

называемым полосой. Приведем теорему о разрешимости задачи Коши.

Теорема 2. Пусть функция f(t,y) определена и непрерывна в полосе Пт. Предположим также, что она удовлетворяет условию Липшица для всех to≤t≤T и произвольных y1, y2,

$$\left|f(t,y_1)-f(t,y_2)\right| = L\left|y_1-y_2\right|, \tag{2.22}$$

где L – некоторая постоянная (постоянная Липшица).

Тогда [113–116] для каждого начального значения *yo* существует единственное решение y(t) задачи Коши (2.12), определенное на отрезке [t0,T]. При этом для дифференцируемых по y функций f, условие (2.22) выполняется тогда, когда для всех (t,y) из Nт справедливо неравенство

$$\left|f'_y(t,y)\right| \le L. \tag{2.23}$$

Условие (2.23), называют условием Липшица. Теорема 2 остается справедливой, если в ее формулировке условие Липшица заменить менее ограничительным односторонним условием Липшица:

$$\left(f(t,y_1)-f(t,y_2)\right)\cdot\left(y_1-y_2\right) \le \sigma\cdot\left(y_1-y_2\right)^2, \tag{2.24}$$

причем постоянная σ может иметь произвольный знак. Ясно, что для функций, удовлетворяющих условию Липшица с постоянной L, одностороннее условие выполняется с постоянной $\sigma \le L$. Отметим следующий полезный результат, указывающий на зависимость степени гладкости решения задачи Коши от степени гладкости правой части дифференциального уравнения.

Устойчивость решения задачи Коши. Рассмотрим процесс распространения погрешностей внесенных в начальные значения. Пусть $y_o\cdot$ – возмущенное начальное значение, $\varepsilon_0 = y_0 - y_0^*$ – его погрешность, а $y^*(t)$ – решение соответствующей задачи Коши, а $\tilde{y}(t)$ – некоторое промежуточное решение между $y^*(t)$ и $y(t)$. В результате получим, что погрешность $\varepsilon(t) = y(t) - y^*(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\varepsilon'(t) = \lambda(t)\cdot\varepsilon(t) \tag{2.25}$$

и начальному условию

$$\varepsilon(t_0) = \varepsilon_0. \tag{2.26}$$

Решение задачи (2.25), (2.26) выражается формулой

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_o \cdot e^{\left\{\int_{t0}^{t} \lambda(\tau)\,d\tau\right\}}. \qquad (2.27)$$

Таким образом, величина

$$C(t) = e^{\left\{\int_{t0}^{t} \lambda(\tau)\,d\tau\right\}} = e^{\left\{\int_{t0}^{t} f'_y(\tau,\tilde{y}(\tau))\,d\tau\right\}} \qquad (2.28)$$

играет в задаче Коши роль коэффициента ошибки. Следует иметь в виду, что знак производной f'_y оказывает существенное влияние на поведение погрешности ε(t). Если $f'_y > 0$, то величина C(t), а вместе с ней и модуль погрешности, монотонно возрастают. При этом соответствующие кривые расходятся. Иначе ведет себя погрешность в случае $f'_y < 0$. Здесь C(t) и ε(t) с ростом t монотонно убывают, а соответствующие интегральные кривые сближаются. Отметим, что в любом случае выполнение одностороннего условия Липшица (8.8) гарантирует, что коэффициент C(t) роста ошибки окажется ограниченным, если задача решается на конечном отрезке $[t_0,T]$, и поэтому $C(t) \le K(T)$ для всех $to \le t \le T$

$$K(T) = \begin{cases} e^{\sigma(T-t_0)} & \text{при} \sigma > 0, \\ 1 & \text{при} \sigma < 0 \end{cases}. \qquad (2.29)$$

Таким образом, при выполнении условия $f'_y \le \sigma$ справедлива оценка

$$\max_{t_o \le t \le T} \left| y(t) - y^*(t) \right| \le K(T) \cdot \left| y_o - y_o^* \right|, \qquad (2.30)$$

выражающая устойчивость на конечном отрезке $[t_0,T]$ решения задачи Коши по начальным значениям.

Задача Коши, которую пришлось решать в данной модели, представлена уравнением (2.12). Значение функции f(t,y), являющейся правой частью выражения (2.12), при $t= t_0$ может колебаться в пределах от -0.0024 до -0.0022, а

при $t=t_к$ – в пределах от -0.00021 до -0.00015 в зависимости от режима производства.

Производная f'_y, где в качестве *y* выступает переменная *A*, имеет вид:

$$f'_A = \frac{-R_d K_d}{A_r^2}(0.96+0.29S_K)(A-A_r)\left(3A-A_r-2\left(\frac{G_8}{1.529-0.629G_8}+A_8\right)\right). \quad (2.31)$$

Сама функция f(t,y) не удовлетворяет условию Липшица, так как значение модуля f'_A не ограничено по A. Функция f'_A представляет собой квадратичную зависимость от A (см. рисунок 2.6). В тоже время моделируемый процесс проходит при таких значениях A, являющейся концентрацией Al_2O_3, при которых f'_A ограничено и находится в пределах от -0.047738 до -0.000647. Следовательно, можно определить значение постоянной Липшица L для нашей задачи. Минимальное значение f'_A равно -0.047738 , следовательно, L= 0.047738.

Кроме того, моделируемый процесс идет для значений A, находящихся в пределах от 0.19 до 0.07, а в этих пределах значение $f'_A < 0$, следовательно, величина погрешности ε(t) должна неуклонно убывать. Следует обратить внимание на то, что решение данной задачи идет на больших временных отрезках, поэтому необходимо оценить значение K(T). Ввиду того, что σ<0, то K(T) из (2.29) равно 1, следовательно, коэффициент роста ошибки ограничен, и задача является обусловленной на достаточно больших T. Итак, решение задачи Коши для нашей модели является устойчивым.

Оценим погрешность решения выбранным методом. Так как метод Эйлера устойчив на конечном отрезке и имеет первый порядок аппроксимации, то он сходится с первым порядком точности [112]. Тогда для метода Эйлера справедлива такая оценка глобальной погрешности:

$$\max_{0\le n\le N}\left|y(t_n)-y_n\right| \le C(T)\cdot h \text{ , где} \quad (2.32)$$

$$C(T) = e^{L(T-t_0)}\cdot(T-t_0)\cdot\frac{M_2}{2}, \quad \text{и} \quad M_2 = \max_{[t_0,T]}\left|y''(t)\right|.$$

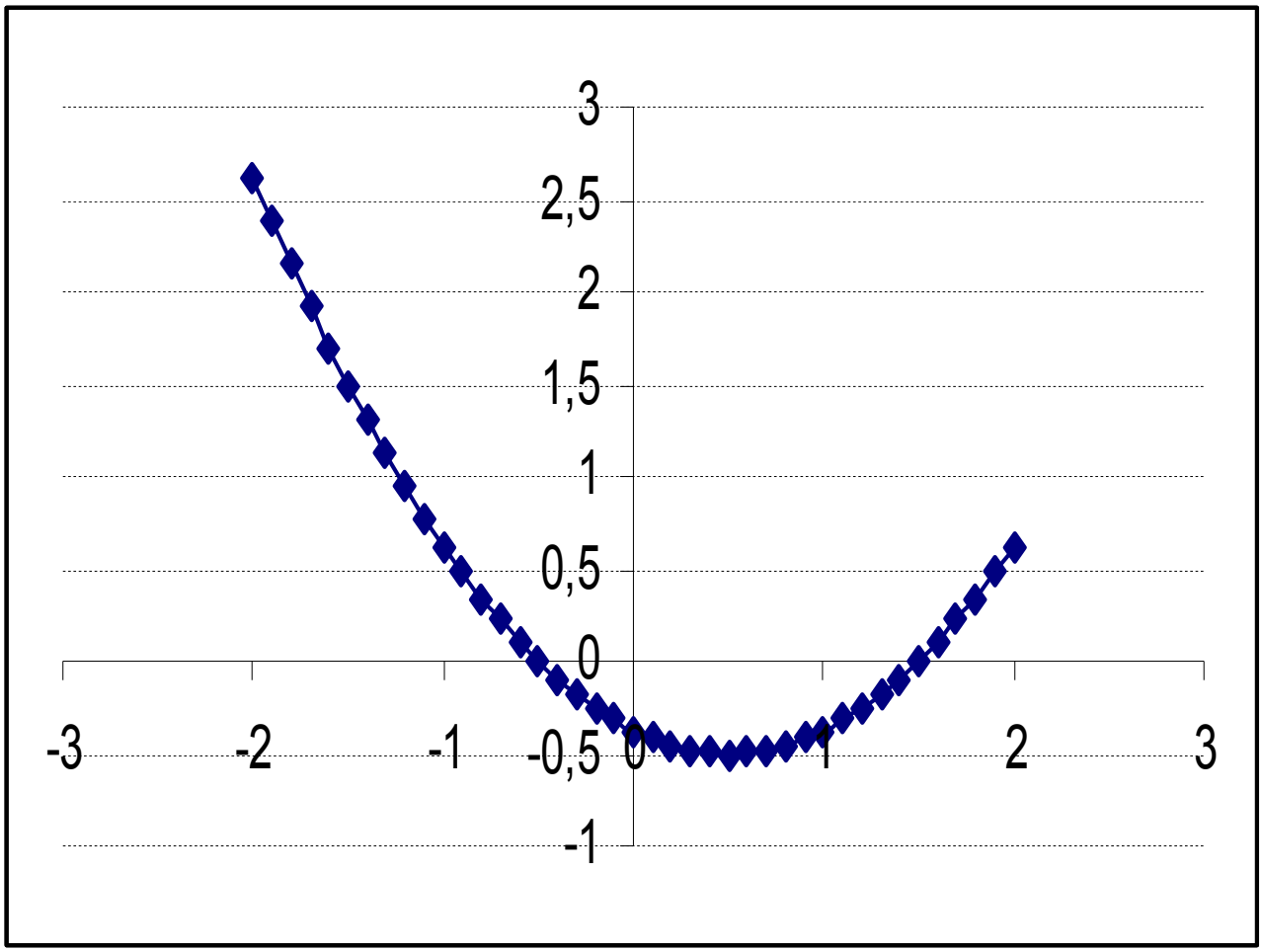


Рисунок 2.6 – Зависимость f'_A от A в диапазоне допустимых значений параметров производства

Произведем оценку глобальной погрешности для нашей задачи. Для интервала интегрирования в 100 часов, h=0.05, M_2=0.0001(максимальное значение $y''(t)$ было найдено по экспериментально полученной зависимости y(t), имеющей форму экспоненты с отрицательным аргументом, и ее численному дифференцированию). Итак, глобальная погрешность на промежутке интегрирования 100 часов равна 0.029, что вполне достаточно для решения поставленной задачи.

2.6 Идентификация статической модели электропотребления электротехнических комплексов производства

Представленная модель обладает существенной нелинейностью, при этом, в силу взаимосвязанности параметров рассматриваемого производства (Рисунок 1.4), все уравнения модели, включая дифференциальное, должны решаться в едином итерационном цикле, поэтому выполнено аналитическое преобразование нелинейных систем уравнений к виду, обеспечивающему сходимость итерационного процесса в трех вариантах в зависимости от значений искомых в итерационном процессе величин, и разработан алгоритм, по которому поиск решения ведется по одному из этих вариантов.

Полученная модель имеет входные величины $\mathbf{X}=\{B_2,M_3,B_5,XZ\}$($B_2$ и B_5 – концентрация щелочи в материальных потоках 2 и 5 соответственно, M_3 – величина, вычисляемая как $1.65\cdot B_3/A_3$, XZ – затравочное отношение, определяемое как отношение объема материального потока катализатора F_7 к прямому потоку F_5, содержащему растворенный Al_2O_3), $\mathbf{Z}=\{A_1,R_a,R_b,T_d,H_ш,L_{(ср)},N_п\}$, где **Z**-контролируемые внешние воздействия, и выходные **W** (энергопотребление) и $\mathbf{Y}=\{\mathbf{YY},B_3,A_4,B_4,M_6,G_8,G_9,B_{11},B_{15},M_{15}\}$,
где $\mathbf{YY} = \{B_6,M_5,M_2\}$. Входная величина **X** определена наличием четырех контуров управления (рисунок 2.4) КУ1 – КУ4. В реальном производстве они реализуются аппаратами, контролирующими заданный уровень технологических величин: КУ1 – M_3, КУ2 – B_5, КУ3 – B_2, КУ4 –XZ.

В векторе внешних воздействий **Z** факторы A_1, R_a, R_b характеризуют состав боксита, $N_п$ – количество находящихся в работе аппаратов промывки красного шлама, $L_{(ср)}$ – длительность процесса разложения алюминатного раствора в аппаратах декомпозиции, T_d – температуру в последних, а $H_ш$ – принятый при данном составе боксита режим отжатия красного шлама в промывателях.

С учетом результатов научно-исследовательских работ по идентификации [117–120] статической модели глиноземного производства [121] и анализа циклограммы (рисунок 1.4), из выходных величин **Y** были выделены значения,

нуждающиеся в идентификации: **YY**={B_6,M_5,M_2}. Для соответствия их рассчитываемых значений реальным введены три идентификационных параметра, представляющих собой вектор идентификации модели **U**=$\{R_n, R_h, R_d\}$.

При выбранном способе моделирования на основе уравнений материального баланса идентификация выполняется подстройкой модели к номинальным (средним) режимам наблюдаемого производства [117–120]. Если же математическая модель объекта является нелинейной многомерной статической

$$Y_i = f_i(Y_k, X_j, U_{l,j}), \qquad j=1,2,...,N_1,\ i=1,2,...,N_2, \qquad (2.33)$$

$$k=1,2,...,N_2,\ k \neq i,\ l=1,2,...,N_3,$$

(где N_1, N_2, N_3 – количество входных (j-ых) и выходных (k-ых) переменных, а также l-ых идентифицируемых параметров **U**), то возможно применение двух методов ее идентификации.

Допустим, оценка JJ(n) точности модели на каждом n-ом шаге решения – это взвешенный квадрат отклонений измеренных и моделируемых (**Yэ** и **Y**) значений выходных величин (Li – весовые коэффициенты)

$$JJ(n) = \sum_{i=1}^{N_2} L_i (Y_{э,i} - Y_i)^2 . \qquad (2.34)$$

Тогда точность модели за период $T_{оц}$ ее оценивания – это математическое ожидание этого критерия за этот период

$$J = M[JJ(n)] , \qquad (2.35)$$

где n=1,2,...,N4, N_4 – количество шагов расчета за период $T_{оц}$.

Если идентификация проводится как разовая процедура для целей научного исследования или проектирования, то для поиска оптимальных значений параметров **U** рационально использовать один из методов нелинейного программирования, наиболее подходящий к конкретной модели по ее свойствам и

минимизирующий критерий J. Это могут быть различные поисково-итеративные методы. К ним относятся следующие методы: различные градиентные методы, случайный поиск [112–116].

Из градиентных методов чаще всего применяется метод наискорейшего спуска. В этом случае движение происходит по траектории, которая при фиксированной скорости настройки обеспечивает наиболее быстрое уменьшение ошибки. Эта траектория в каждой точке ортогональная к изоповерхностям критерия J. В двумерном случае уравнение поверхности уровня J=const имеет вид

$$dJ = \frac{\partial J}{\partial A_1} dA_1 + \frac{\partial J}{\partial A_2} dA_2 = 0 \cdot \tag{2.36}$$

Уравнение касательной к линии уровня в точке k =(A_{1k} , A_{2k}) запишется как

$$\left(\frac{\partial J}{\partial A_1}\right)_k \left(A_1 - A_{1k}\right) + \left(\frac{\partial J}{\partial A_2}\right)_k \left(A_2 - A_{2k}\right) = 0 \cdot \tag{2.37}$$

Вектор $\left(\frac{\partial J}{\partial A_1}, \frac{\partial J}{\partial A_2}\right)'$ ортогонален к касательной и, следовательно, к линии уровня.

В методе наискорейшего спуска настройка параметров производится по формуле

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A_1} \\ \mathbf{A_2} \end{pmatrix} = -\Gamma \begin{pmatrix} \frac{\partial J}{\partial A_1} \\ \frac{\partial J}{\partial A_2} \end{pmatrix} = -\Gamma \left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{A}}\right), \tag{2.38}$$

где Γ – константа, которая вместе с частными производными определяет скорость изменения параметров.

Алгоритм настройки параметров имеет вид

$$\mathbf{A}_{[k+1]} = \mathbf{A}_{[k]} - \Gamma_{[k]} \cdot \frac{\partial J}{\partial \mathbf{A}} \Big| \mathbf{A} = \mathbf{A}_{[k]} \cdot \tag{2.39}$$

Метод случайного поиска характеризуется намеренным введением элемента случайности в алгоритм поиска. Многие варианты метода случайного поиска сводятся к построению последовательности:

$$\mathbf{A}_{[k+1]} = \mathbf{A}_{[k+1]} + \alpha_k \xi, \qquad (2.40)$$

где α_k — некоторая положительная величина; $\xi=(\xi^1,\xi^2,...,\xi^n)$ – какая-либо реализация n-мерной случайной величины ξ, распределенной равномерно на отрезке [-1, 1].

Существует несколько вариантов метода случайного поиска минимума функции J(**A**) на множестве $\mathbf{A}\subseteq E^n$, где **A** – множество всех значений идентифицирующих параметров $\mathbf{A}_{[k]}\in\mathbf{A}$, $k \geq 0$.

Приведем один из них. Алгоритм с возвратом при неудачном шаге. Смысл этого алгоритма в следующем. С помощью датчика случайного вектора получают некоторую его реализацию ξ и в пространстве E^n определяют точку $\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]}$ с помощью соотношения (2.40). Если $\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]}\in\mathbf{A}$ и $J(\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]})<J(\mathbf{A}_{[k]})$, то сделанный шаг считается удачным, и в этом случае полагается $\mathbf{A}_{[k+1]} =\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]}$. Если $\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]}\in\mathbf{A}$, но $J(\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]})\geq J(\mathbf{A}_{[k]})$, или же $\hat{\mathbf{A}}_{[k+1]} \notin \mathbf{A}$, то сделанный шаг считается неудачным и полагается $\mathbf{A}_{[k+1]} =\mathbf{A}_{[k]}$. Если окажется, что $\mathbf{A}_{[k]}=\mathbf{A}_{[k+1]}...=\mathbf{A}_{[k+N]}$ для достаточно больших N, то точка $\mathbf{A}_{[k]}$ может быть принята в качестве приближения искомой точки минимума.

Прототипом для разрабатываемой модели глиноземного производства (**МП**) послужила модель, описанная в [63]. Результаты ее исследований показали допустимость использования применяемой методики ее идентификации.

В рассматриваемом случае нет жестких требований к минимизации систематической ошибке оценивания нескольких десятков параметров состояния модели. Исходя из этого, в настоящей работе должны решиться следующие задачи:

- определение идентификационных параметров модели;
- нахождение вида функции критерия идентификации;

– оценена формы поверхности отклика J(**U**) и ее частных срезов;

– выбор наиболее рационального метода нелинейного программирования, обеспечивающего минимизацию J.

Результат этих исследований поможет отказаться от процедур ручного подбора параметров **U** модели производства и поможет проводить ее идентификацию автоматически. Однако использование нелинейных балансов, особенно для производства со многими рециклами, создает нетиповую структуру его модели, что усложняет использование известных приемов и алгоритмов идентификации, а также численных методов решения (раздел 2.5) задач моделирования.

В качестве приводимых в данной работе реальных значений были взяты три номинальных режима глиноземного производства, характеризующиеся средними данными работы Павлодарского (НР1 за 1992 г. и НР2 за 1995 г.) и Николаевского (НР2 за 1998 г.) глиноземных заводов. В приложении А, в таблице А2 приведены характеристики этих режимов.

Для решения задачи идентификации [121], которая первоначально выполнялась методом ручного подбора, было выполнено исследование влияния каждого идентификатора на выходные параметры модели. Первоначально были определены по реальным выборкам дисперсии месячных значений величин **YY:**

$$D[B6]=4.72\cdot10^{-6}(т^2/м^6),\quad D[M5]=0.0005(о.е.)^2,\ D[M2]=0.0055(о.е.)^2.$$

Далее оценена чувствительность составляющих **YY** к изменениям **U**. На рисунках 2.7–2.9 приведены девять графических функций **YY**(**U**) для режима НР1. Данное графическое исследование проведено с целью определения степени влияния каждого идентифицирующего параметра на значения трех основных зависимых концентрационных характеристик производства **YY**=$\{B_6,M_2,M_5\}$. Анализ полученных графических зависимостей показывает, что изменение идентифицирующего параметра R_n от 1 (что характеризует идеальность промывки) до 14 (ухудшение качества промывки) приводит к уменьшению

значения режимного параметра B_6 на 3% относительно B_6э (индекс «э» означает значение параметра в точке экстремума); увеличению значения режимного параметра M_2 на 7.1% относительно M_2э, уменьшению значения режимного параметра M_5 на 0.4% относительно M_5э. При этом нетрудно заметить, что R_n оказывает наибольшее влияние на режимный параметр M_2.

Реакция модели на изменение идентифицирующего параметра R_d, корректирующего расчетную кинетическую константу скорости процесса перехода Al_2O_3 из растворенного состояния в твердое, показывает, что изменение идентифицирующего параметра R_d от 0.5 до 1.7 приводит к увеличению значения режимного параметра B_6 на 22% от $B_{6э}$, увеличению значения режимного параметра M_2 на 32% от M_2, увеличению значения режимного параметра M_5 на 1.5% от M_5э. Необходимо отметить, что идентифицирующий параметр R_d оказывает наибольшее влияние на значение режимных параметров M_2 и B_6.

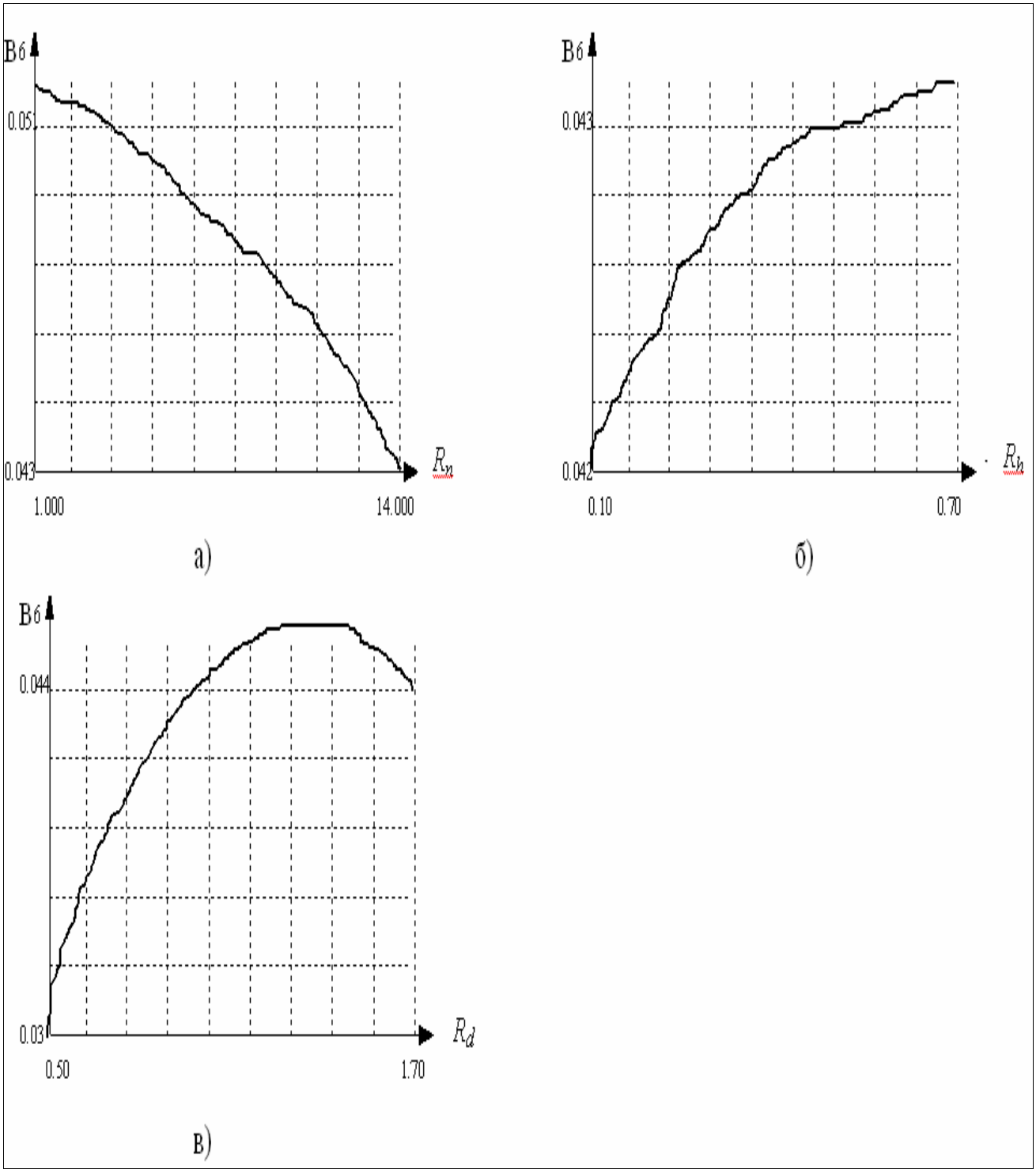


Рисунок 2.7 – Зависимость режимного параметра B_6 модели от идентифицирующих коэффициентов

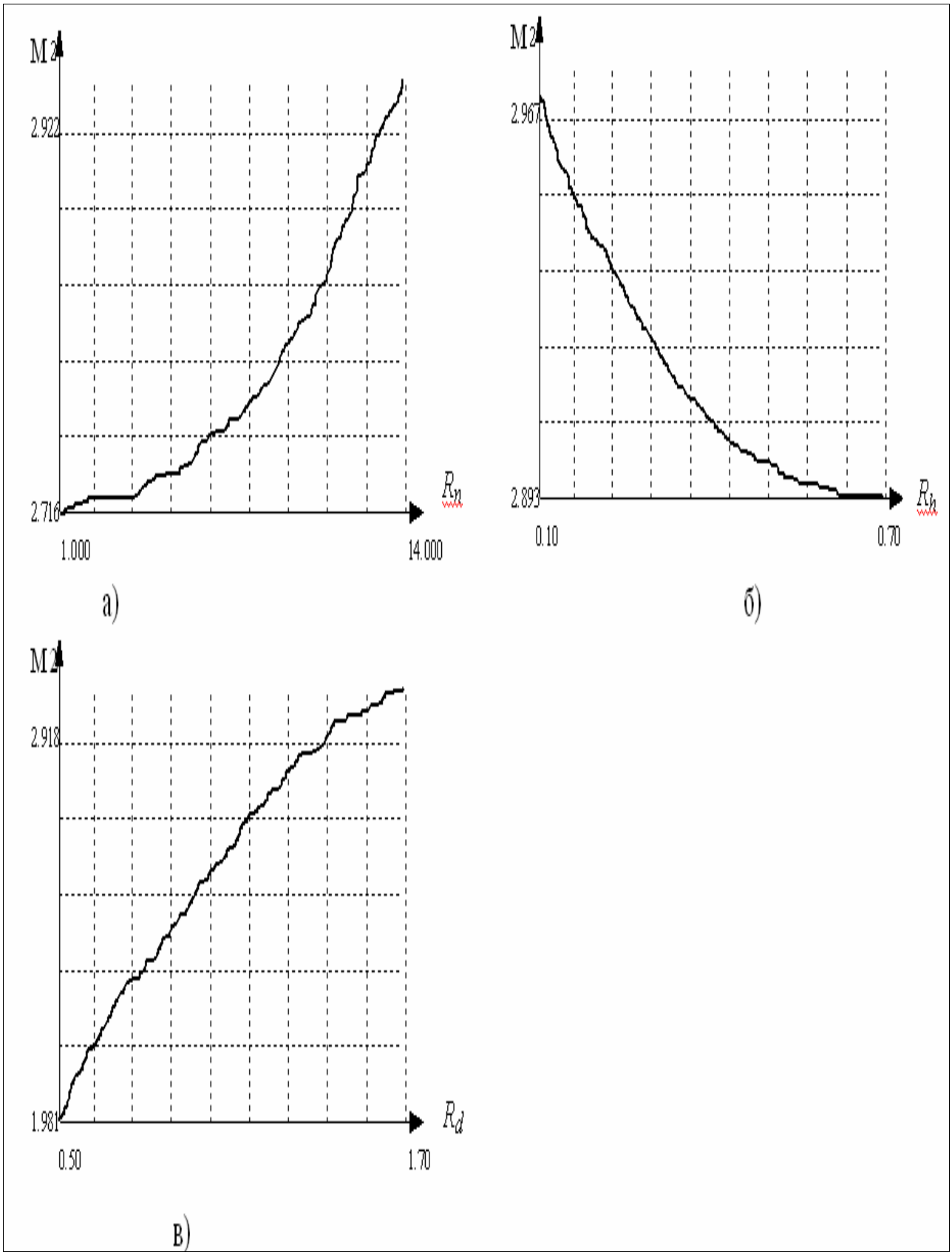


Рисунок 2.8 – Зависимость режимного параметра M_2 модели от идентифицирующих коэффициентов

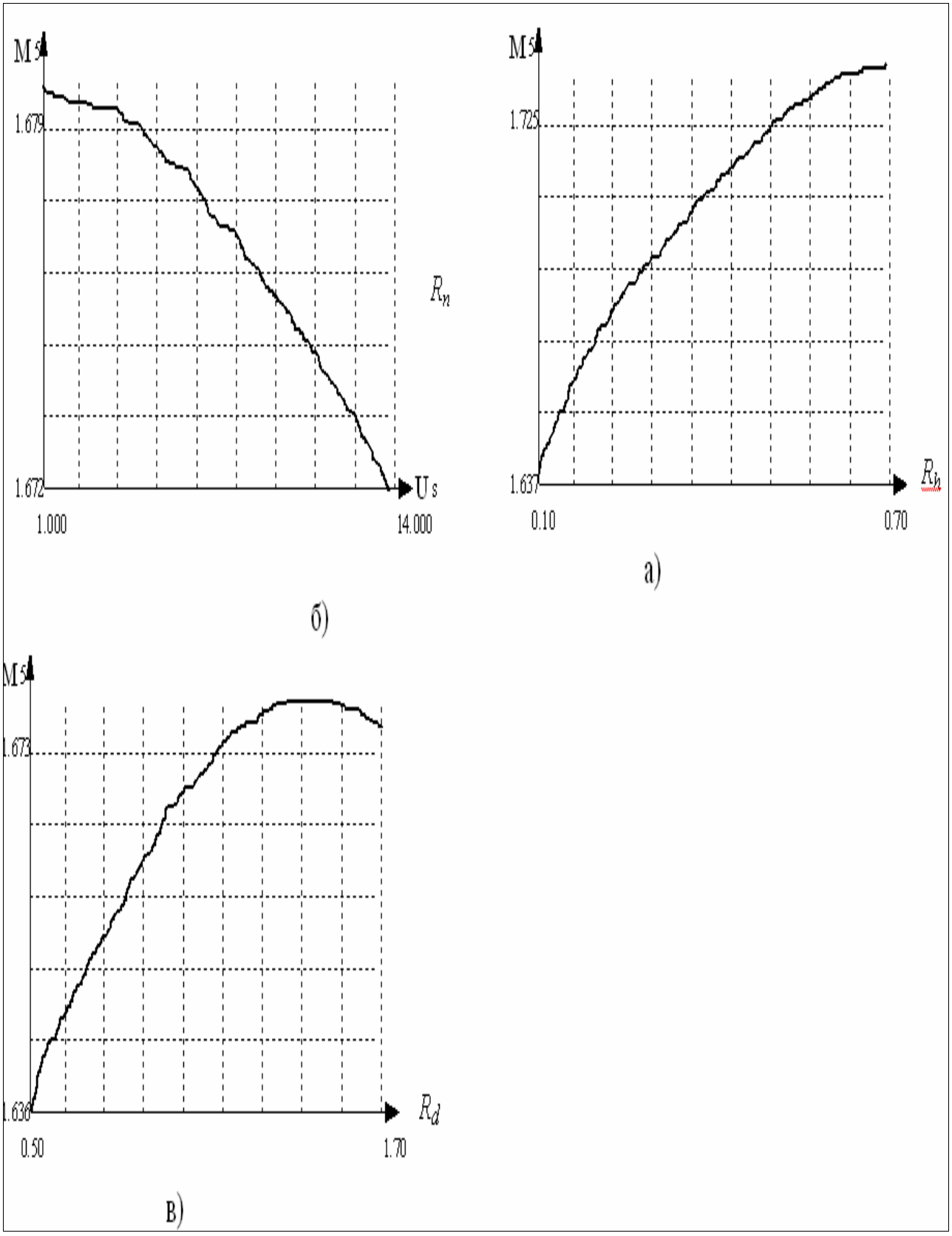


Рисунок 2.9 – Зависимость режимного параметра M_5 модели от идентифицирующих коэффициентов

Реакция модели на изменение идентифицирующего параметра R_h, учитывающего неравенство модулей алюминатного раствора и промводы вследствие гидролиза. Увеличение идентифицирующего параметра R_h от 0.1 до 0.8 приводит к увеличению значения режимного параметра B_6 на 1.5% относительно B_6э; уменьшению значения режимного параметра M_2 на 3% относительно M_2э; увеличению значения режимного параметра M_5 на 5.9% относительно M_5э. При этом очевидно, что R_h оказывает наибольшее влияние на режимный параметр M_5. Многочисленные эксперименты на модели [121–124] показали, что выделенные идентификационные параметры $\mathbf{U}=\{R_n, R_h, R_d\}$ обеспечивают хорошую автономность их воздействия на основные координаты состояния производства $\mathbf{YY}=\{B_6,M_5,M_2\}$ по каналам: $R_n \rightarrow B_6$, (рисунок 2.4 контур управления обозначен КУ2), $R_d \rightarrow M_2$ (контур управления – КУ1), $R_h \rightarrow M_5$ (контур управления – КУ4), что создает предпосылки для достаточно эффективной методики идентификации.

Результаты экспериментов, а также большая значимость составляющей M_2 перед другими составляющими (B_6,M_5) позволили задать формулу для оценивания J [121]

$$J = \frac{\left(B_{бэ} - B_6\right)^2}{D[B_6]} + \frac{\left(M_{5э} - M_5\right)^2}{D[M_5]} + 5\,\frac{\left(M_{2э} - M_2\right)^2}{D[M_2]}. \qquad (2.41)$$

Расчеты критерия J (2.41) с применением модели при вариации **U** дают частные срезы $J(R_n)$, $J(R_h)$, $J(R_d)$ поверхности J(**U**) (рисунок 2.10). Их сравнение показывает, что функция оценивания идентификации модели производства НР1 имеет минимальное значение внутри допустимых интервалов изменения всех идентифицирующих параметров, причем, наибольшее влияние на значение J*(***U***)* оказывает идентифицирующий параметр R_d. В пределах его изменения J*(***U***)* уменьшается в десять с лишним раз.

Частные срезы получены при фиксировании двух других идентифицирующих параметров на значениях, полученных при идентификации

модели производства методом подбора. Анализ полученных зависимостей дает некоторое представление о характере изменения J(**U**), но наиболее полное представление четырехмерной поверхности отклика J(**U**) получается на фрагментах рисунка 2.10 б), г) и е). Они иллюстрируют с использованием средств компьютерной графики трехмерное изображение поверхности $J(R_h, R_d)$ при значении $R_n = R_n\min$ (рисунок 2.10б), $J(R_h,R_n)$ при значении $R_d=R_d\min$ (рисунок 2.10г) и $J(R_n,R_d)$ при значении $R_h=R_h\min$ (рисунок 2.10е). Эти поверхности получены для режима НР1 производства. Характер поверхности отклика для двух других режимов НР2 и НР3 производства аналогичный.

Форма полученных поверхностей J*(***U***)* свидетельствует, что для оптимизации параметров **U** подходят как градиентные методы, так и методы случайного поиска. В пользу градиентных методов говорят графики зависимостей J(**U**) на рисунках 2.10 б), г) и е). При формировании данных графиков, применен достаточно большой масштаб, при котором не заметны «шероховатости» локальных минимумов, а только показана глобальная тенденция изменения J(**U**). А за возможность применения случайных методов поиска минимума говорят графики, приведенные на рисунках 2.10 а), в) и д). На частных срезах поверхности J(**U**), изображенных на этих рисунках, можно наблюдать наличие локальных минимумов, так как применен малый масштаб изображения.

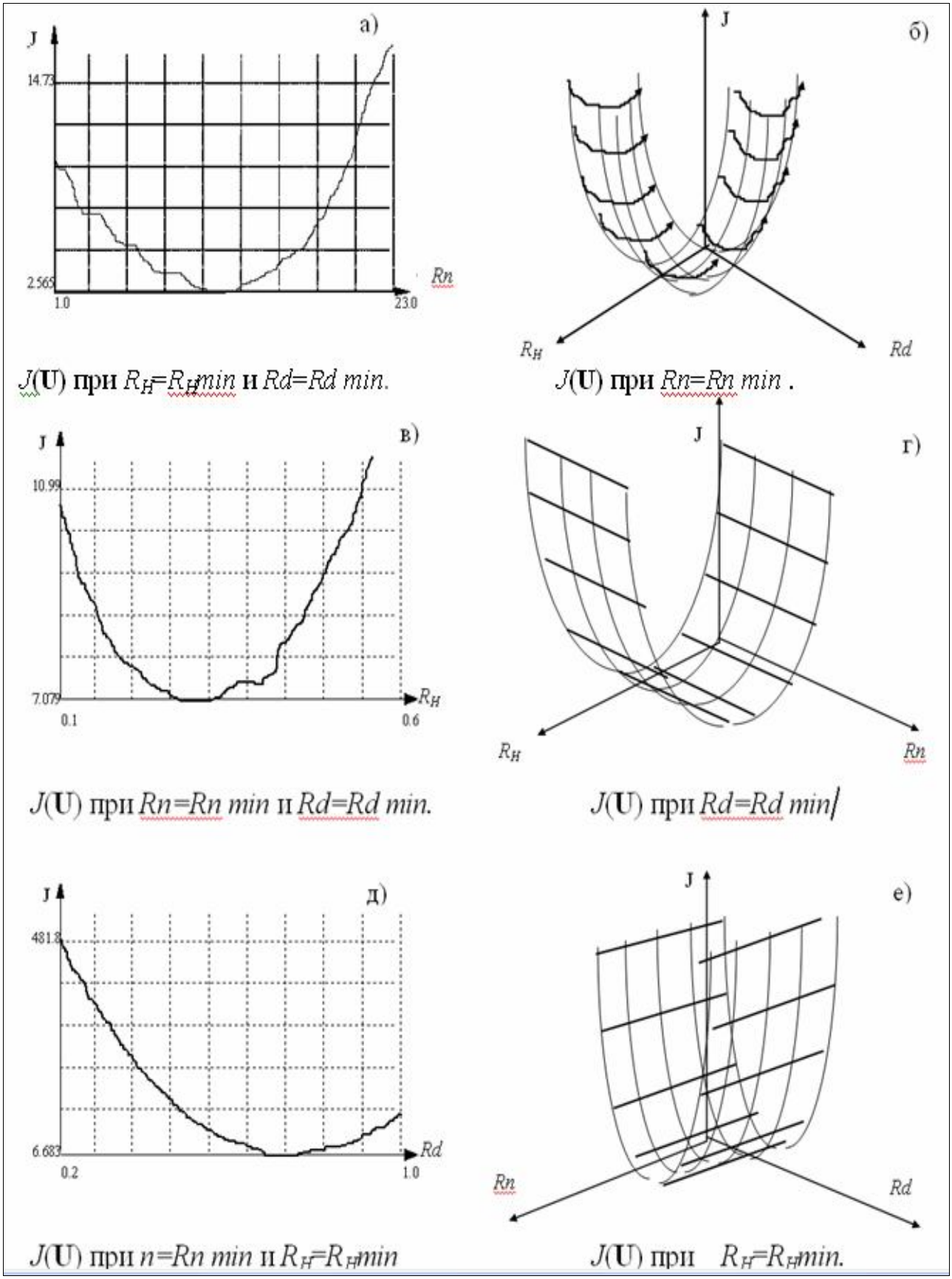


Рисунок 2.10 – Частные срезы функции критерия точности идентификации модели

Необходимо было определить наиболее подходящий метод для минимизации J(**U**). Характеристиками метода, важными для проводимого анализа могут служить длительность ПМ1 поиска (секунды) и точность ПМ2 – абсолютная разница между Jmin (получена из анализа графических поверхностей) и Jпск (получена при применении методов нелинейного программирования).

Эти методы были применены для трех режимов НР1,НР2 и НР3. Для режима НР1 характеристики градиентного метода – ПМ1=15сек, ПМ2=16.79, метода случайного поиска ПМ1=45сек, ПМ2=17.23. Для режима НР2 характеристики градиентного метода – ПМ1=20сек, ПМ2=2.055, метода случайного поиска – ПМ1=25сек, ПМ2=2.52. Для режима НР3 характеристики градиентного метода – ПМ1=25сек, ПМ2=2.85, метода случайного поиска – ПМ1=25сек, ПМ2=3.17.

Очевидно, что при использовании современных ПЭВМ оба метода могут быть использованы для идентификации модели режимов производства: время, потраченное на поиск оптимальных значений идентифицирующих параметров практически одинаковое. Тем не менее, для режима производства НР3 при благоприятных начальных значениях параметров вектора U время поиска оптимальных значений параметра $\mathbf{U}=\{R_n,R_h,R_d\}$ примерно в восемь раз меньше, чем при случайном поиске, что объясняется сильной вытянутостью поверхности отклика J(**U**) по параметру R_n (рисунок 2.10 г, 2.10 е), хотя во всех случаях Jпск при применении метода случайного поиска оказывалось меньше, чем Jпск градиентного метода. Кроме этого, в пользу метода случайного поиска говорит и тот факт, что для градиентного метода необходимо выбирать величину «шага спуска» при переходе от одного режима производства к другому и определять «удачные» начальные приближения параметров вектора **U**, так как при малых значениях шага или неудачных начальных приближениях резко замедляется процесс нахождения оптимального значения **U**, а при больших значениях шага часто происходит выход за пределы допустимых значений параметра, что влечет за собой прекращение процесса поиска оптимума [121].

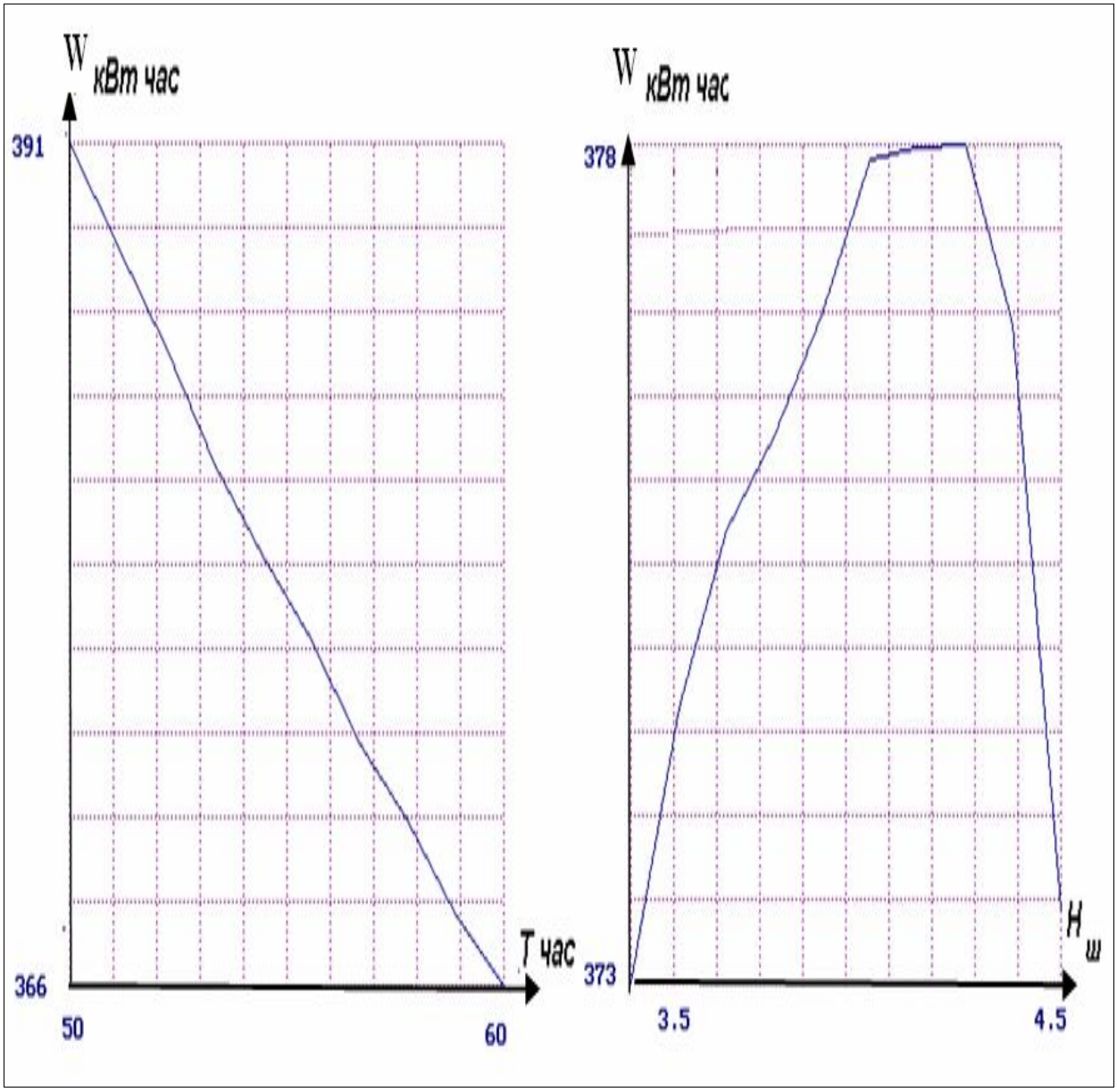
Благодаря разработанному критерию идентификации модели и возможности выполнять эту идентификацию при любом изменении режимов работы производства автоматически, полученная модель приобрела свойства адаптивности.

Результаты, полученные на статической модели. Ввиду того, что в последнее время при исследованиях широко применяется компьютерная графика, пакет программ, реализующий модель производство [107,122–124] содержит графический интерфейс, позволяющий получать графики зависимостей всех выходных величин модели при изменении значений любого из входных параметров, что позволяет проследить влияние различных параметров – как внешних, то есть параметров внешней среды, так и контролируемых параметров производства.

При экспериментах, проводимых на модели [107], учитывались возможные пределы изменений значений исследуемых параметров, так как модель имеет ограниченную область устойчивых решений. Это касается в первую очередь параметров, входящих в расчет блока IV. Тем не менее, при варьировании исследуемых параметров в пределах, соответствующих реальным значениям данного режима, модель имеет устойчивое решение.

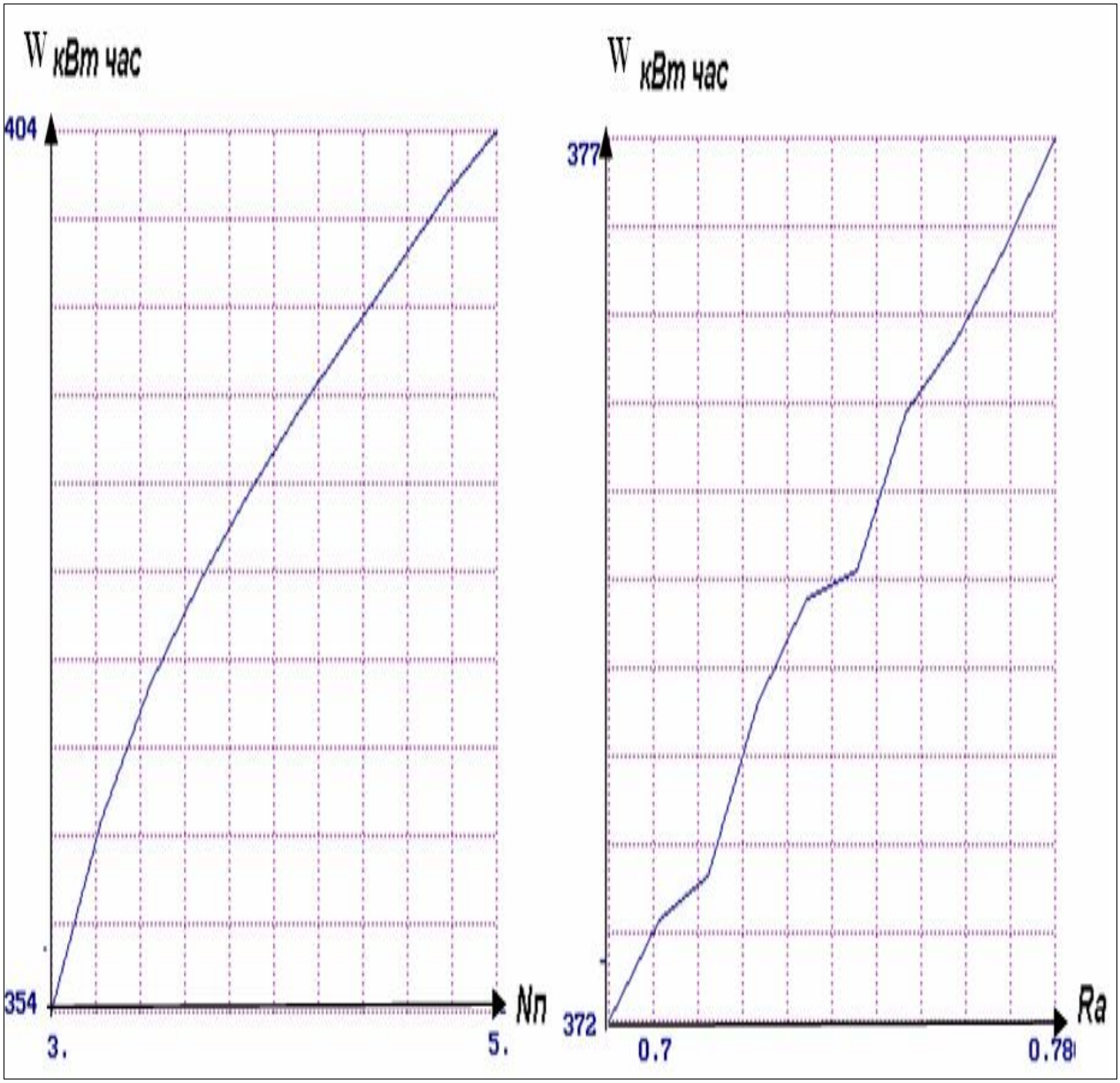
Большинство характеристик (основные зависимости выходных величин **Y** приведены в приложении), полученных при экспериментах на данной статической модели имеют ярко выраженный нелинейный характер, что подтверждается практикой.

В итоге были получены и графические зависимости энергопотребления. Графики изменения энергопотребления от входных параметров производства приведены на рисунках 2.11-2.14. Анализ графиков позволяет сказать, что зависимости имеют также ярко выраженный нелинейный характер. Особенно ярко нелинейность проявляется от M_3, Нш, B_5 и XZ (затравочное отношение на входе блока декомпозиции V, отношение приносимых потоком затравочного гидрата и алюминатного раствора количеств Al_2O_3).



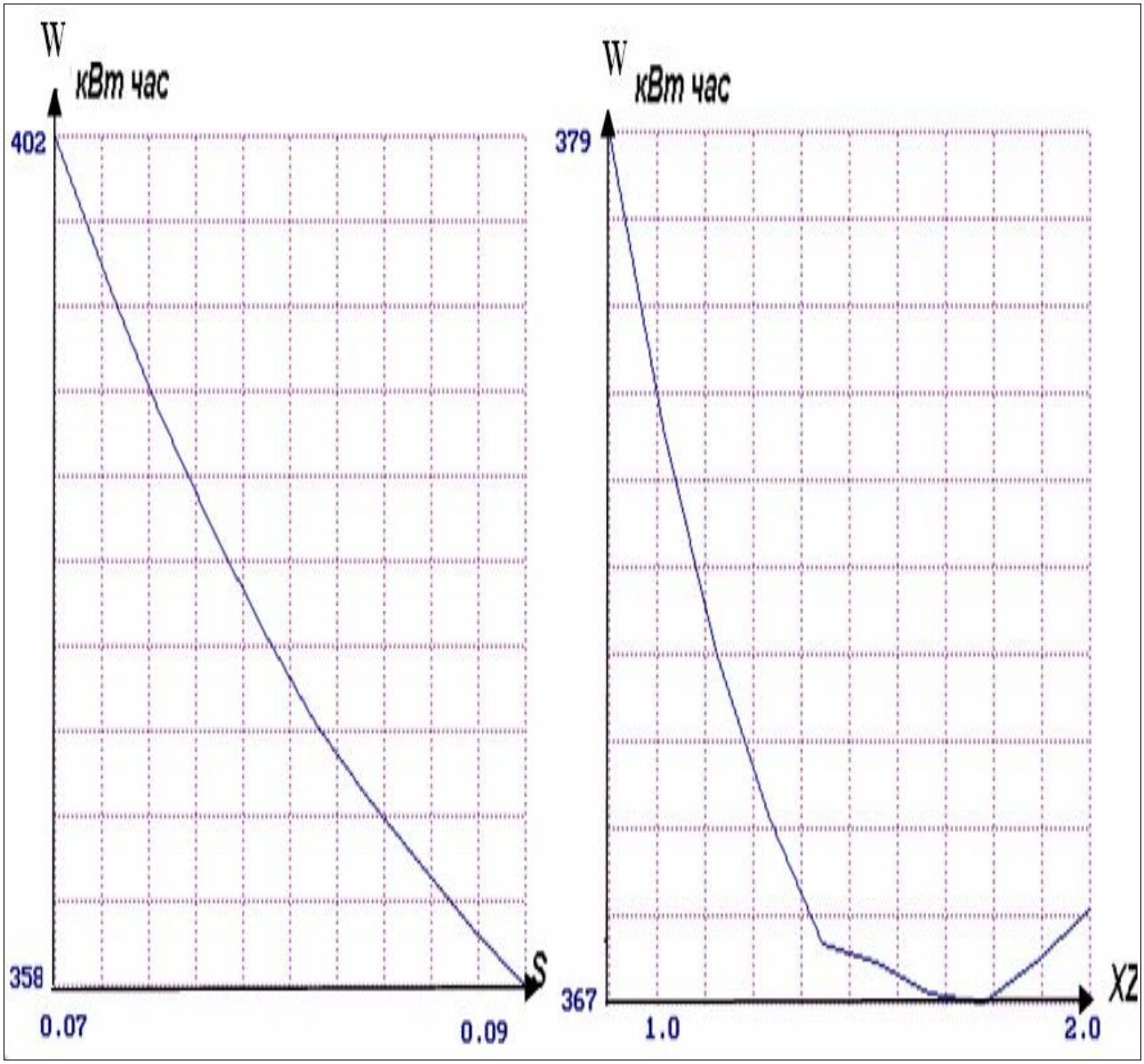
а) б)

Рисунок 2.11 – Зависимость изменения энергопотребления W кВт·час на 1 тонну произведенного глинозема от изменения параметров внешнего воздействия а) – длительности декомпозиции, б) Нш – режима отжатия красного шлама в промывателях



а) б)

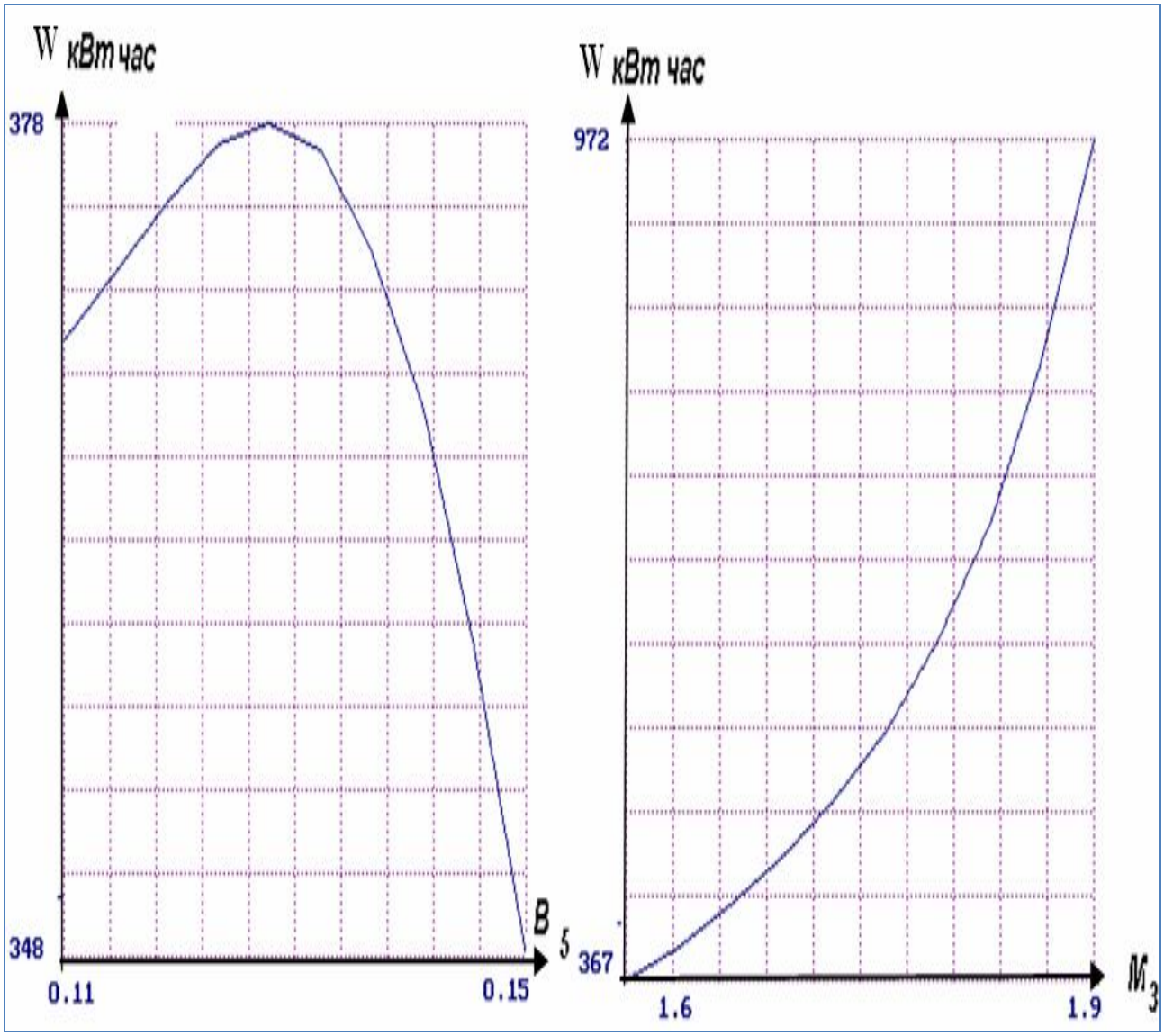
Рисунок 2.12 – Зависимость энергопотребления производства WкВт·час на 1 тонну произведенного глинозема от изменения параметров внешнего воздействия а) количества ступеней промывки Nп, б) характеристика извлечения Al_2O_3 из боксита



а) б)

Рисунок 2.13 – Зависимость энергопотребления производства WкВт·час на 1 тонну произведенного глинозема от изменения управляемых параметров а) площадь затравки S, б) отношение затравочного гидрата Al_2O_3 к растворенному XZ

Наиболее сильное влияние на энергопотребление имеет параметр M_3: при его увеличении на 18% энергопотребление возрастает почти в 3 раза (см. рисунок 2.14б).



а) б)

Рисунок 2.14 – Зависимость энергопотребления производства WкВт·час на 1 тонну произведенного глинозема от изменения управляемых параметров а) B_5, б) M_3

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод: энергопотребление данного производства имеет нелинейную зависимость от большинства технологических параметров. При этом значения последних должны находиться в заданном диапазоне, определенном технологическим режимом. Естественно предположение поиска оптимума по энергозатратам, который

возможен только при наличии инструментария, основанного на моделировании производства.

2.7 Динамическая модель электропотребления электротехнического комплекса

Ввиду нелинейности рассматриваемого типа производства при переходе на другие технологические режимы, связанные с поиском энергоэффективности производства, может произойти резкое изменение объемов потоков веществ и, как следствие, увеличение или уменьшение энергопотребления, поэтому необходимо определение:

- объема превышения (или уменьшения) энергопотребления по сравнению с прежним режимом производства;
- длительности переходного процесса по времени;
- характера изменения энергопотребления во времени.

Решение перечисленных задач позволит определить наилучшее время начала изменения технологического режима производства и характер перехода на новый режим, не ухудшая равномерности (а может даже и улучшая) графика нагрузки данной энергосистемы. Поставленная задача потребовала разработки динамической модели производства. Структура данной модели представлена на рисунке 2.15.

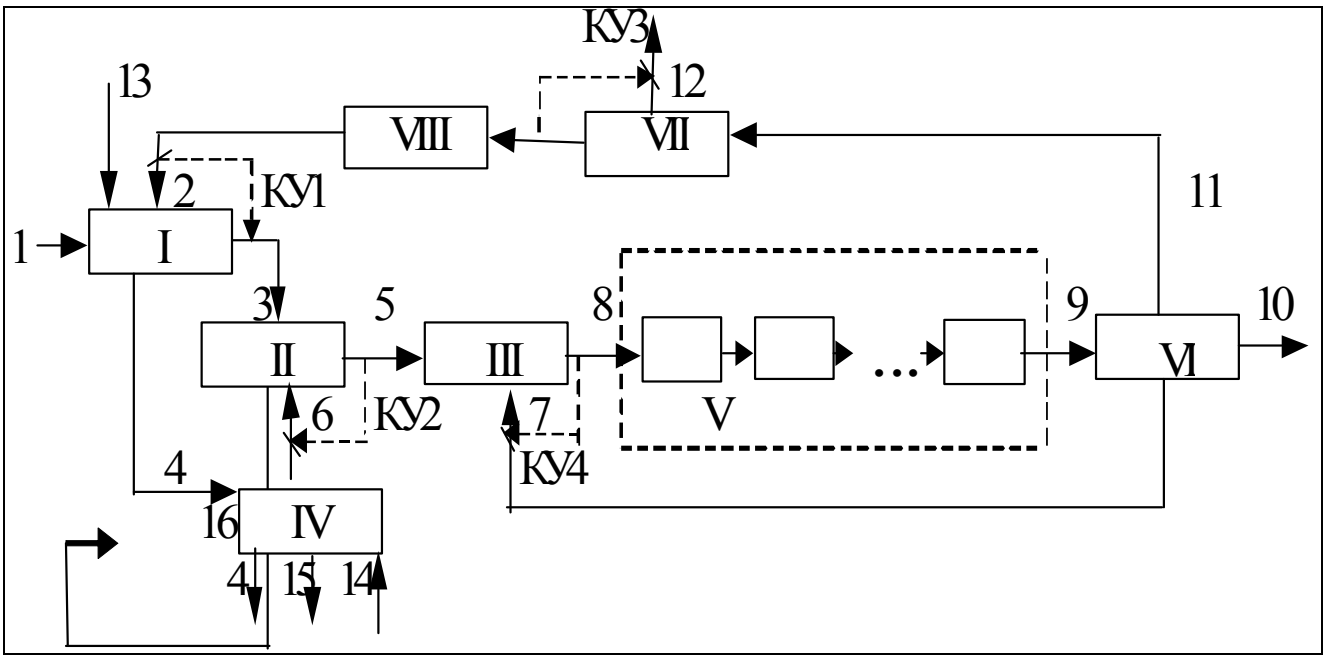


Рисунок 2.15 – Принципиальная структура динамической модели энергопотребления производства

Структура производства, описанная в параграфе 2.3 и изображенная на рисунке 2.4, была изменена следующим образом: блок V был заменен последовательнотью блоков, имитирующих работу аппаратов-декомпозеров. Помимо этого модель производства была дополнена буферной емкостью. На схеме, изображенной на рисунке 2.15, она представлена блоком VIII.

Последовательность из $N_Д$ блоков, имитировала динамику [125–127] разложения раствора в аппаратах-декомпозерах. Динамика моделировалась при допущении об идеальности процесса перемешивания гидратной пульпы в аппарате. Известно, что при таком способе описания макродинамики перемешивания величина Nд в разгонной характеристике адекватна транспортному запаздыванию, а V – постоянной фильтрации [125,126].

Объем $V_Д$ каждого n-ого идеального аппарата и их количество $N_Д$ в цепи стали параметрами идентификации динамической модели для достижения одинаковой длительности и формы переходных процессов, получаемых с помощью модели и наблюдаемых экспертами на практике в сумме на выходе нескольких параллельных ниток последовательно работающих декомпозеров. Экспертный анализ этих вариаций переходных характеристик участка V позволил

идентифицировать неформальными методами параметры V и Nд: V=7000 м3, Nд=10. Существующие в практике закономерности изменения температуры вдоль ниток аппаратов были аппроксимированы [115,116] квадратичными зависимостями. В результате модель каждого n-ого аппарата выглядит так:

$$
\begin{aligned}
&F_{n-1} = F_n + 0.53 V_Д V_n G_n^* \qquad G_n^* = 1 - \frac{G_n}{2.43} \\
&V_Д \frac{d}{dt} G_n = F_{n-1} G_{n-1} - F_n G_n + 1.53 V_Д V_n G_n^* \\
&V_Д \frac{d}{dt} G_n^* A_n = F_{n-1} G_{n-1}^* A_{n-1} - F_n G_n^* A_n - V_Д V_n G_n^* \\
&V_Д \frac{d}{dt} G_n^* B_n = F_{n-1} G_{n-1}^* B_{n-1} - F_n G_n^* B_n \\
&V_n = -U_D K_d(B_n, T_n, S_{30}) \frac{(A_n - A_E(B_n, T_n))^2}{A_E(B_n, T_n)^2},
\end{aligned}
\tag{2.42}
$$

где F_n –расход гидратной пульпы на выходе n–го аппарата;

G_n – содержание в ней гидрата;

A_n – содержание в жидкой фазе Al_2O_3;

B_n – содержание в жидкой фазе Na_2O_k;

V_n – скорость разложения раствора в аппарате;

T_n – температура;

Sзо – площадь поверхности частиц затравочного гидрата;

A_r – равновесная концентрация Al_2O_3;

здесь A_r рассчитывается по следующим соотношениям:

$$A_r = 1.1 e^{2.3 p1},$$

где $p1 = 0.92 - 1.76 \cdot 10^{-2} Td + 29 \cdot 10^{-4} B_{n-1}{}^2 - 1.68 B_{n-1} Td \cdot 10^{-6} + 4.09 \cdot 10^{-4} Td.$

K_d – коэффициент, определяющий скорость реакции при текущей температуре T_n, концентрации щелочи B_n и площади поверхности катализатора Sзо в n-том аппарате-декомпозере. Его величина рассчитывается с применением теории нечеткой логики. Процедура получения величины K_d описана в параграфе 2.4.

Блок VIII описывает работу обобщенной буферной емкости [128]. В глиноземном производстве самую большую удерживающую способность имеет буферная емкость оборотного раствора, потому в качестве обобщенной моделировалась именно она

$$\frac{dV_8(t)}{dt} = F_{11}(t) - F_2(t). \qquad (2.43)$$

Модель была идентифицирована под реальный процесс с помощью критерия (2.41). Так как полученная модель содержит системы нелинейных алгебраических уравнений и системы дифференциальных уравнений (доказательство сходимости выбранных численных методов приведено в разделе 2.5), которые решались с помощью численных методов, то была произведена оценка ошибки моделирования. При моделировании на отрезке времени в 100 часов глобальная погрешность решения составила 3%, что вполне удовлетворяет цели разработки модели. Полученная на модели длительность переходного процесса (примерно 5 суток) по времени совпадает с наблюдаемой в производстве [108, 109, 122].

После идентификации модели на ней было выполнено исследование динамических характеристик. На рисунках 2.17 – 2.20 проиллюстрировано динамическое воздействие на электропотребление производства при скачкообразном изменении ряда технологических параметров производства. Характер изменения режимных параметров иллюстрируется рисунком 2.16. В реальности такого характера изменений не происходит, что объясняется инерционностью протекающих в производстве технологических процессов.

Рассматриваемый тип производства относится к энергоемким, поэтому даже небольшие по величине изменения ряда управляемых технологических параметров могут приводить к серьезным изменениям электропотребления производства в целом. При учете того, что средний по производительности завод потребляет 200 МВт мощности электрической энергии, то отклонение от определенного уровня вызывает серьезные проблемы для энергосетей.

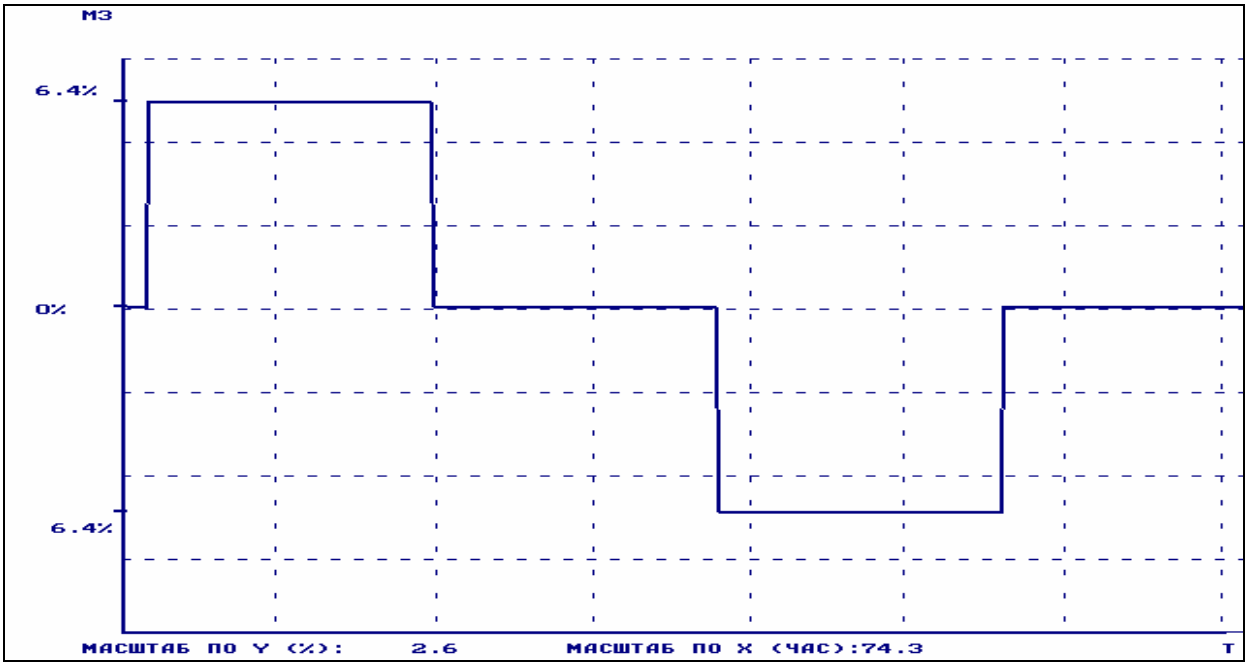


Рисунок 2.16 – График скачкообразного изменения во времени технологического параметра M_3 (отношения концентраций Al_2O_3 к Na_2O_k в потоке F_3)

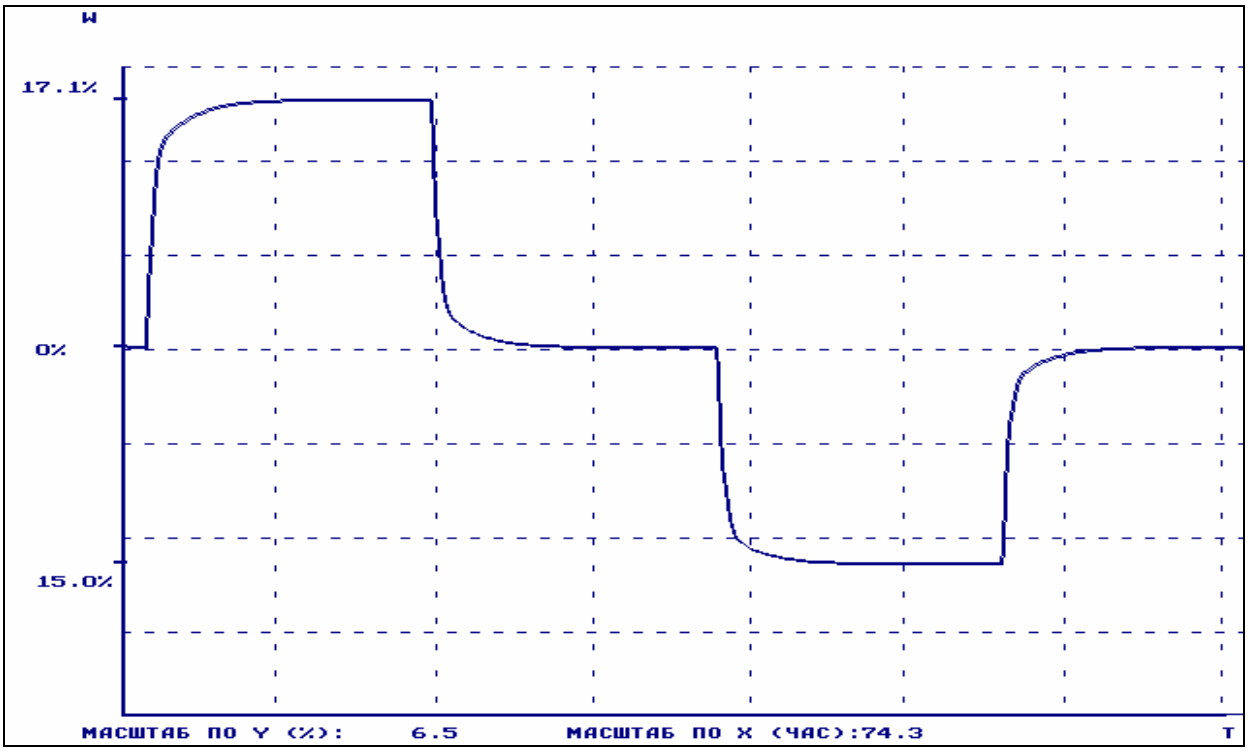


Рисунок 2.17 – График изменения энергопотребления производства при скачкообразном изменении M_3 на +6% затем на -6%

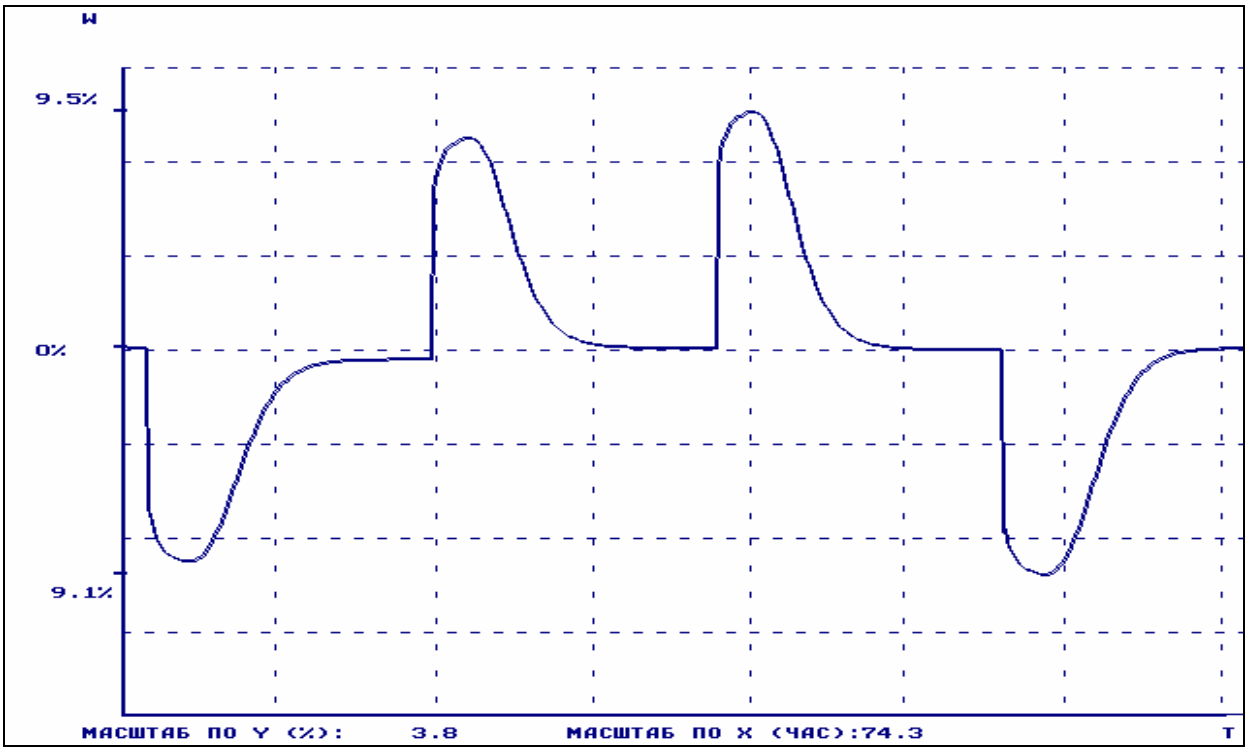


Рисунок 2.18 – График изменения электропотребления ЭТК производства при скачкообразном увеличении концентрации щелочи (B_5) в потоке F_5, а затем уменьшении на 4%

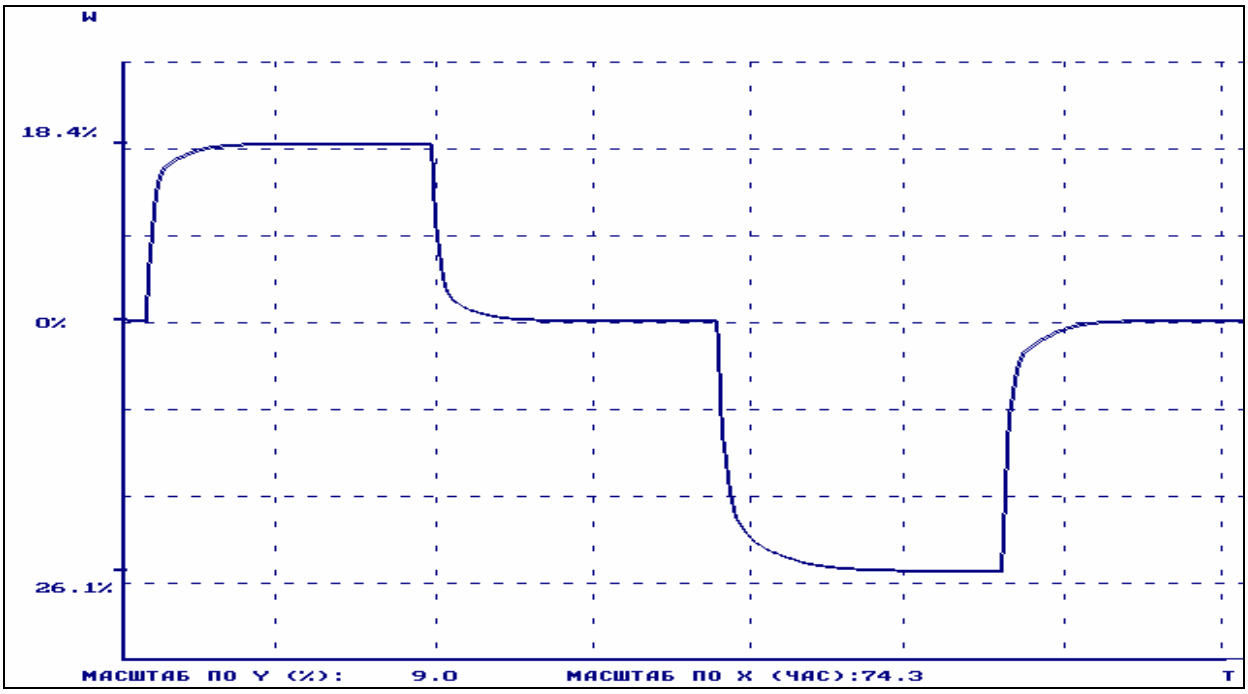


Рисунок 2.19 – График изменения электропотребления производства при скачкообразном изменении извлечения Al_2O_3 из боксита на +10%, затем на -10%

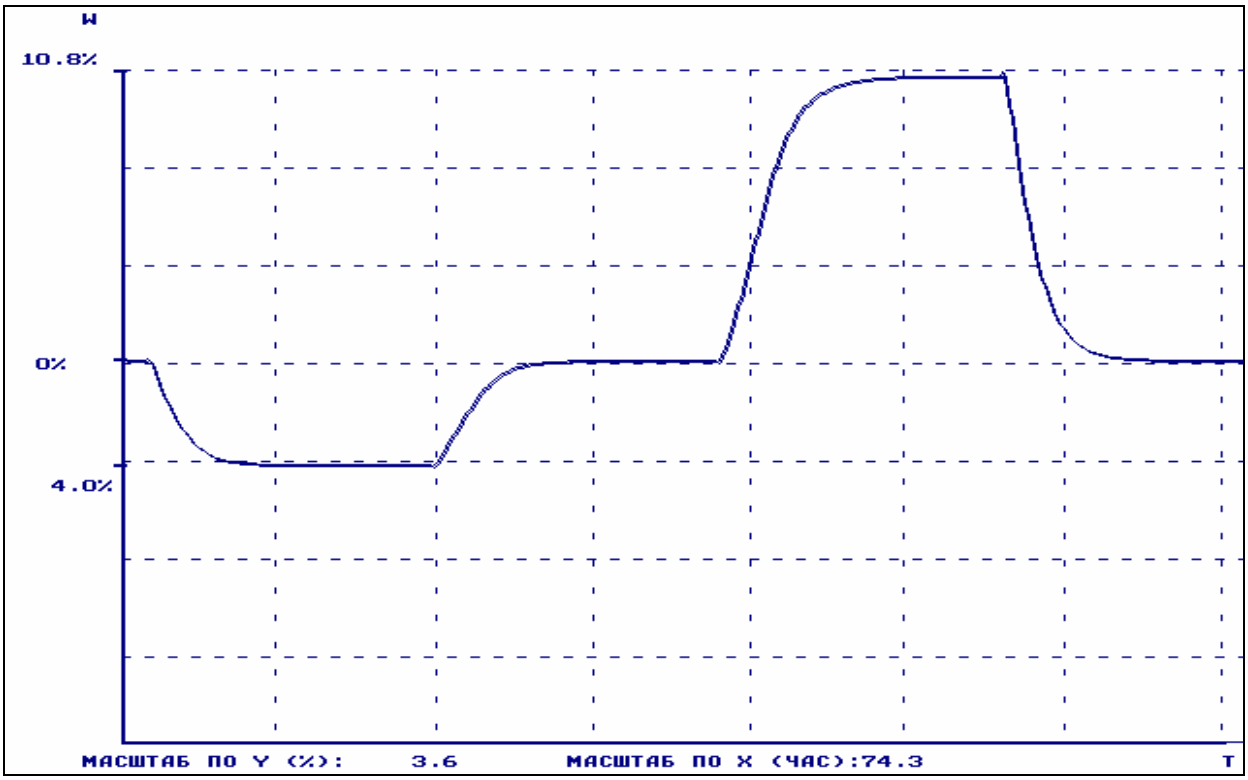


Рисунок 2.20 – График изменения электропотребления производства при скачкообразном изменении площади поверхности катализатора S на 10%, затем на -10%

Проблема уменьшения неравномерности графиков электрической нагрузки стоит перед всеми энергосистемами мира. Одним из основных путей ее решения является привлечение потребителей к выравниванию графика нагрузки энергосистемы [129,130]. Последнее предполагает в отношение к потребителям, как правило, административные (ограничивающие) и экономические (стимулирующие) меры [8-12]. Поэтому выбор режима потребления нагрузки, способствующего наибольшему выравниванию электрической нагрузки данной энергосистемы, будет стимулироваться экономически.

Полученные результаты моделирования динамики изменения энергопотребления [108-110] позволяют определить, изменение каких режимных параметров может приводить к уменьшению (увеличению) нагрузки и определять время начала перехода на этот режим. Так, например, увеличение концентрации щелочи в потоке F5 или содержания затравочного гидрата нужно производить в часы пиковых нагрузок энергосистемы (рисунки 2.18 и 2.20), ибо в этом случае

происходит спад энергопотребления производством. А переход на режим работы с увеличенным процентом извлечения A_2O_3 из боксита или каустического модуля M_3 необходимо выполнять в периоды спада нагрузки [129, 130], например, с пятницы в вечерние часы и в выходные дни.

2.8 Прогнозирование техногенных катастроф для данного типа производств

Характер переходных процессов в технологическом кольце Байера [128,132–134] с достаточной степенью точности не может быть предсказан даже опытным технологом: известны случаи во времена повальной приватизации заводов, когда «улучшение работы» отдельных переделов гидрохимического производства приводило к необъяснимым «порывам» оборотного щелочного раствора, спустя несколько суток после изменения установившегося режима. «Порывами» называют перелив раствора из буферных емкостей или его острая недостача на следующих технологических участках.

Созданная и идентифицированная под реальные режимы динамическая модель производственного процесса позволила получить объяснение причин этих аварий на основе динамических характеристик кольца гидрохимических участков производства.

Динамические характеристики [108, 109, 128] получались при скачкообразном изменении следующих параметров:

– внешней среды;

– воздействия на концентрационные режимы производства;

– расход основного сырья (боксита) как рычаг влияния на производительность кольца Байера.

Характер изменения во времени технологических параметров при исследовании поведения потоков веществ в производстве показан на рисунке 2.16. Ниже приводятся графики (см. рисунки 2.21 -2.26) изменения объема основного потока раствора с изменением режимного параметра.

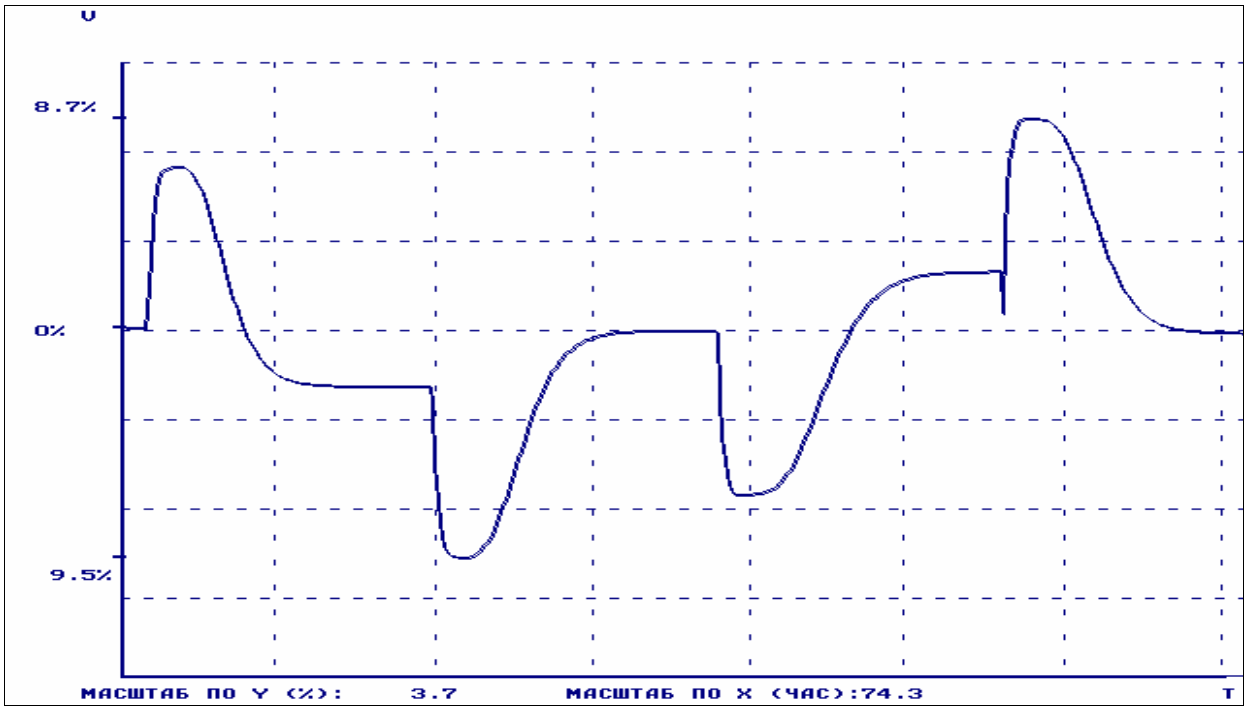


Рисунок 2.21 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении объема боксита на +15%, затем на -15%

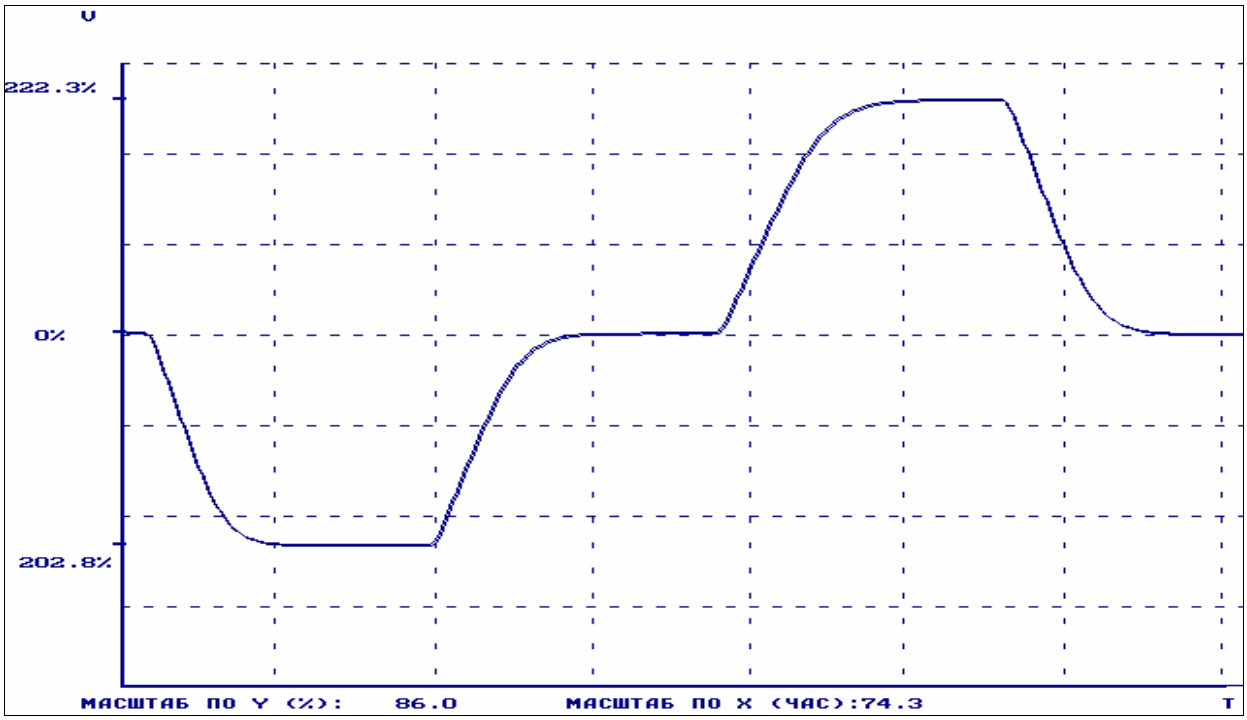


Рисунок 2.22 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении M_3 на +6%, затем на -6%

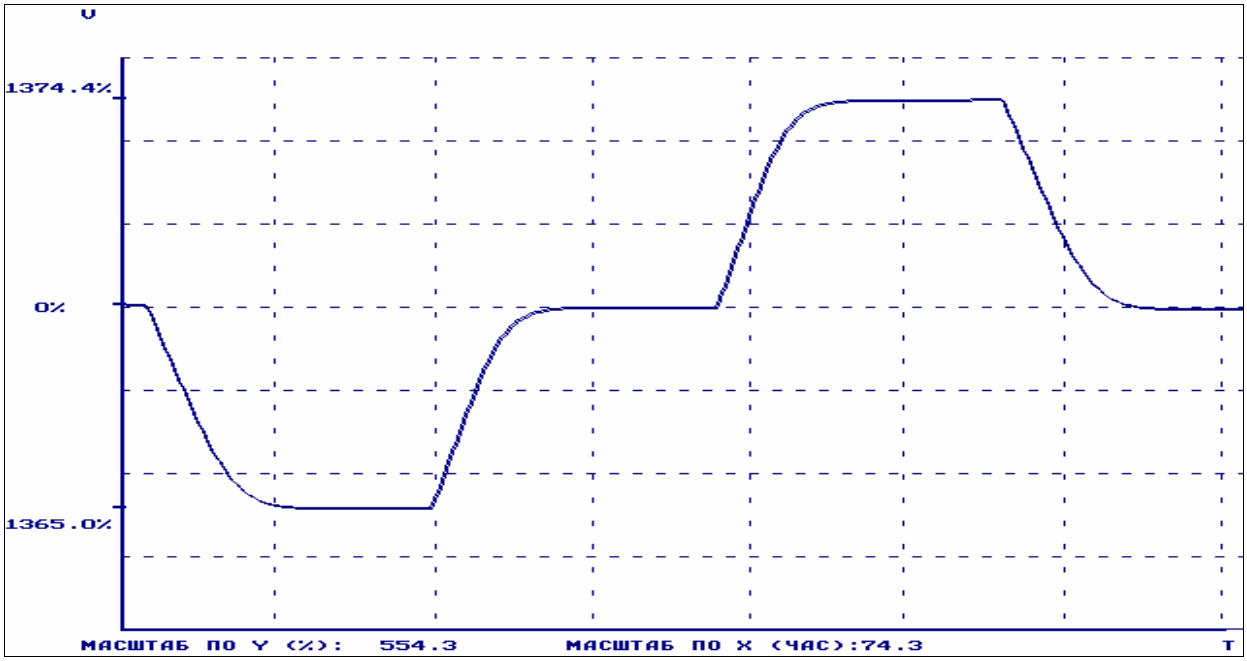


Рисунок 2.23 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении B_5 на +8%, затем на -8%

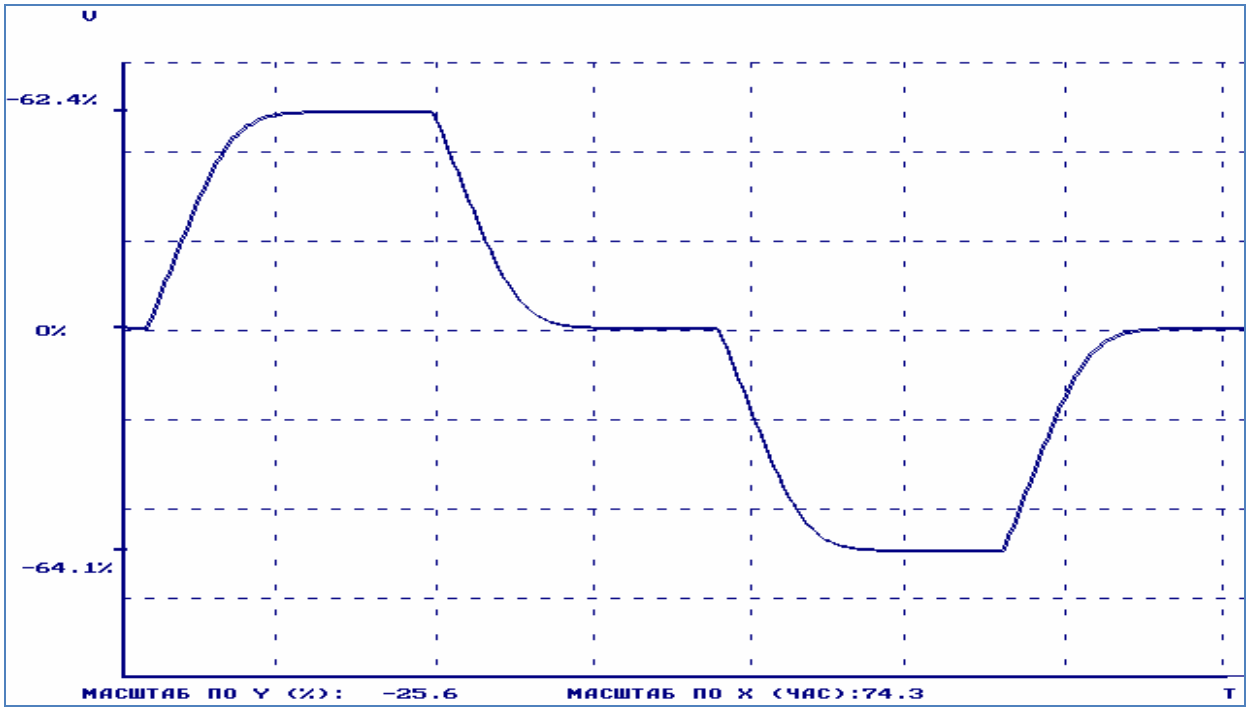


Рисунок 2.24 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении XZ на +9%, затем на -9%

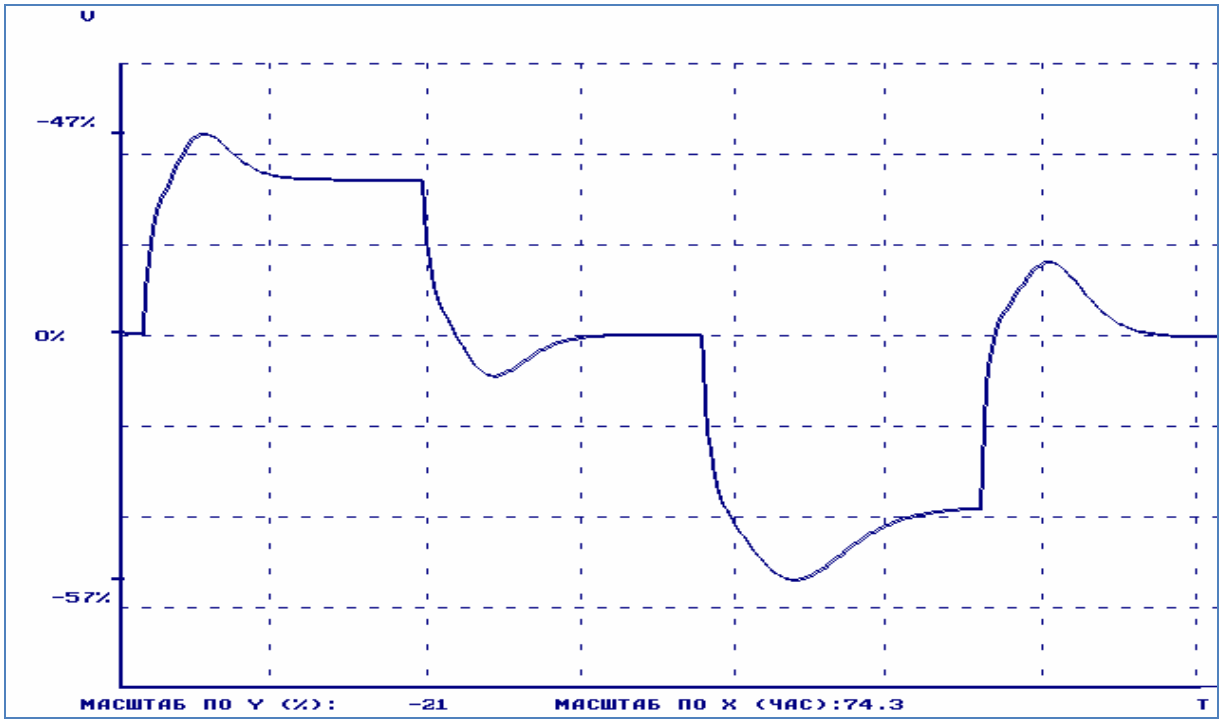


Рисунок 2.25 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении Ra на +10%, затем на -10%

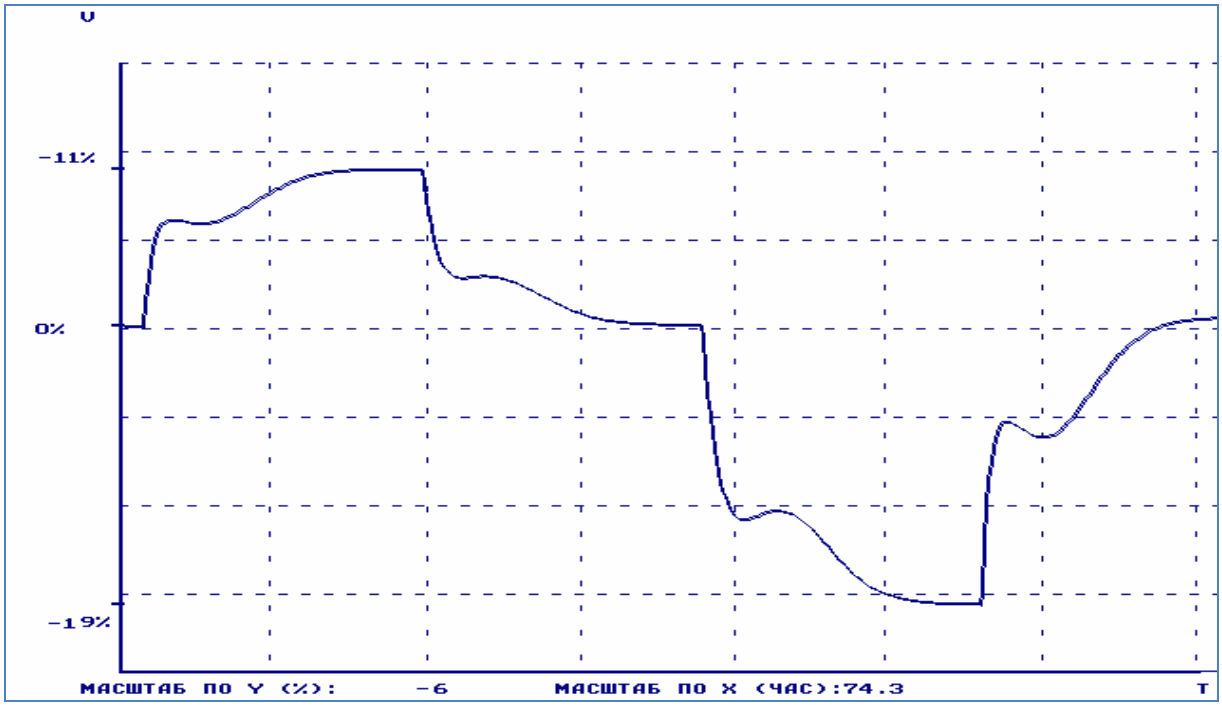


Рисунок 2.26 – График изменения объёма потока раствора в основном технологическом кольце при скачкообразном изменении Sзатр на +6%, затем на -6%

В реальности таких резких скачков изменения параметров в производстве может не наблюдаться, что объясняется инерцией АСУ, реализующей технологический процесс. Тем не менее, при отсутствии учета взаимосвязанности всех параметров производства, его замкнутости и инерционности, из-за резкой смены ряда технологических параметров наблюдались аварии по переливу горячего щелочного раствора из передельных емкостей или остановка непрерывного производства из-за отсутствия материала для переработки на ряде технологических участков. Это иллюстрируется приведенными выше графиками (рисунки 2.21–2.26).

Так изменение параметра M_3 на +6% влечет за собой увеличение объема потока раствора на 200% (рисунок 2.22), а изменение параметра B_5 всего на 8% приводит к возрастанию объемов раствора более чем на 1300% (рисунок 2.23). Учитывая, что данное производство имеет малые буферные емкости, подобные отклонения и приводят к аварийным ситуациям.

Исследования на данной модели доказали недопустимость подобных управляющих воздействий и показали, что переход на иные режимы должен производиться более плавными, последовательными шагами, причем значения новых режимных параметров должны быть первоначально проанализированы с помощью данной модели.

Помимо этого, с помощью этой модели впервые была определена длительность переходного процесса, составляющая около 5-и суток, и объяснена причина возникновения аварий спустя 2-е суток после изменения режимного параметра (см. рисунки 2.21-2.26).

2.9 Выводы

1. Интеллектуальные информационные технологии способны решать задачи, характеризующиеся следующими особенностями: неявностью информации, нечеткостью целей и границ, множественностью взаимовлияющих друг на друга факторов, слабой формализуемостью. Применение одного из

направлений искусственного интеллекта: нечеткой логики позволило упростить задачу определения коэффициента дифференциального уравнения, описывающего один из основных производственных процессов при его моделировании.

2. Созданная и идентифицированная под реальные производственные режимы статическая модель электропотребления ЭТК непрерывного энергоемкого производства имитационного характера позволила выполнить построение графиков зависимости объемов энергопотребления от изменения всех режимных параметров производства. Анализ графиков позволяет сказать, что эти зависимости имеют ярко выраженный нелинейный характер.

3. Определен критерий идентификации модели прогнозирования электропотребления ЭТК, позволивший производить ее подстройку к реальным режимным параметрам производства автоматически. Исследованы методы: градиентный и случайного поиска на применимость в решении задачи идентификации. Благодаря возможности автоматической идентификации под реальные режимы, статическая и динамическая модели электропотребления приобрели характер адаптивных.

4. Эксперименты, проведенные на статической модели электропотребления ЭТК, позволили определить режимные параметры, при изменении которых нелинейность проявляется особенно ярко.

5. Динамическая модель прогнозирования электропотребления ЭТК рассматриваемого типа производства позволила впервые получить переходные характеристики всех выходных параметров при скачкообразном изменении параметров внешнего воздействия и регулируемых параметров.

6. С помощью динамической модели электропотребления определены режимные параметры, изменение которых приводит к весьма значительному увеличению или уменьшению энергопотребления ЭТК (до 18%).

7. Анализ полученных переходных характеристик позволил сделать следующие выводы:

а) в целом полученные результаты соответствуют данным, полученным опытным путем;

б) средняя длительность переходного процесса в технологическом кольце – 5 суток;

в) разные по форме и мощности колебания величин очевидным образом демонстрируют нелинейность динамической модели производства.

8. Очевидно, что для непрерывных инерционных производств задача выравнивания нагрузки энергосистемы может решаться только для случая перехода на иной технологический режим. Учитывая характер графиков суточной и недельной нагрузки [129, 130] (для типичного суточного графика характерны ночные провалы, а для недельного – постепенное возрастание базового и пикового потребления электроэнергии в энергосистеме к четвергу, затем некоторое снижение в пятницу и резкое падение в выходные дни), рекомендуется переход к режиму, требующему возрастания нагрузки. Т.е. производить в пятницу во время ночного провала, с тем расчетом, чтобы заполнить падение графика в выходные дни.

9. Переход на технологические режимы, влекущие за собой сокращение нагрузки, рекомендуется выполнять в середине недели, тем самым, уменьшая неравномерность недельного графика нагрузки. Более точные рекомендации по выравниванию нагрузки могут быть получены с помощью предложенной модели при определении реальных значений технологических параметров.

10. Предлагаемая динамическая модель позволяет прогнозировать почасовое электропотребление при переходе на иные технологические режимы производства, а также предупреждать техногенные катастрофы при изменении параметров производства.

11. Разработанная динамическая модель позволила определить причину техногенных катастроф на рассматриваемом типе производств при неосмотрительной попытке «улучшения» работы отдельных технологических участков производства.

3 Энергоэффективное управление производством рассматриваемого типа

3.1 Постановка задачи

Управление производством рассматриваемого типа иерархически подразделяется на два уровня. Верхний уровень управления – технико-экономический, оптимизирующий разные аспекты технико-экономической деятельности предприятия. Критерии качества управления – в основном экономические, а результат решения задачи управления – значения технологических параметров самого производства и параметров работы приводов.

При решении задачи энергоэффективного управления на высшем уровне выполняется поиск режима производства, обеспечивающего минимальное потребление энергоресурсов и сырья. Поиск должен выполняться на основе следующего положения: построение критерия оптимального управления производством на основе упрощенной статической модели производства, базирующейся на уравнениях материального баланса технологических переделов последнего, с учетом изменяющихся во времени цен **C** на энергоресурсы и сырье в диапазонах изменения технологических параметров производства **X**.

Для многих реальных оптимизационных задач подчас сложно, а порой и вовсе нереализуемо определить функциональную зависимость выходных параметров от величин входных параметров, а для задач, которые ставятся для сложных комплексов, таких как ЭТК рассматриваемого производства, не представляется возможным привести аналитическое описание искомой зависимости.

Это обстоятельство значительно представляет серьезную трудность при применении классических методов оптимизации, ввиду того, что большинство из них использует априорную информацию о характере поведения целевой функции. В связи с этим встает задача подбора такого оптимизационного метода, который

был бы лишен выше означенного недостатка и был бы способен отыскивать решения практически при полном отсутствии знаний о характере исследуемой целевой функции. В последнее время для решения подобных задач стали применяться методы искусственного интеллекта: нечеткая логика, искусственные нейронные сети, эволюционные методы и другие.

Искусственные нейронные сети используются для решения задач прогнозирования, распознавания образов, диагностики оборудования, оптимальном управлении. Математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики используется при решении задач с недостаточными или неточными данными, например, когда необходимо использовать знания эксперта или при решении задачи управления объектом и недостаточностью знаний о нем, например, в сложных нелинейных системах, идентификация которых весьма затруднена. Для решения практических оптимизационных задач, имеющих многие неопределенности, как в постановке ограничений, так и в отсутствии математического представления целевой функции применяются методы эволюционного поиска [135 –143]. Стохастические методы оптимизации, ввиду их гибкости и универсальности, находят широкое применение во многих областях человеческой деятельности, в том числе и в электроэнергетике, где существует множество задач, имеющих неопределенность значений параметров, многокритериальность при решении оптимизационных задач, размытость границ ограничений и так далее.

В связи с этим, в данной главе должны быть решены следующие вопросы:

1. Анализ существующих методов искусственного интеллекта, применяющихся для решения оптимизационных задач. Выбор метода для решения оптимизационной задачи, в которой невозможно аналитически представить целевую функцию.

2. Построение многокритериальной целевой функции для решения оптимизационной задачи поиска энергоэффективного режима функционирования рассматриваемого типа производства.

3. Сведение многокритериальной целевой функции к однокритериальной.

4. Построение оптимизационной модели управления рассматриваемым производством, повышающей его энергоэффективность, на основе прекрасно зарекомендовавших себя в последнее время методов искусственного интеллекта.

5. Решение поставленной оптимизационной задачи с помощью выбранного метода искусственного интеллекта.

3.2. Анализ методов искусственного интеллекта

3.2.1 Искусственные нейронные сети

Нейронная сеть [48,49,97 – 99] является математической моделью, а также ее программой или аппаратным воплощением. Сети Neuronic явились результатом исследований в области искусственного интеллекта, а именно стремления посредством моделирования низкоуровневой структуры мозга воспроизвести возможность биологических нервных систем обучаться, управлять и исправлять ошибки и т.д.

Мозг структурно состоит из очень большого количества (приблизительно 10000000000) специальных клеток, так называемых нейронов, соединенных мостом с многочисленными коммуникациями. У нейрона есть разветвленная структура ввода информации (см. рисунок 3.1), названной дендритом, ядром и переходящим выходом, именуемым «аксон». Аксон клетки нейрона соединяется с дендритами других клеток посредством синапсов. При активации нейрон формирует и отправляет электрохимический сигнал на аксон. Посредством синапсов этот сигнал достигает других нейронов, которые, в свою очередь, поочередно также могут активизироваться.

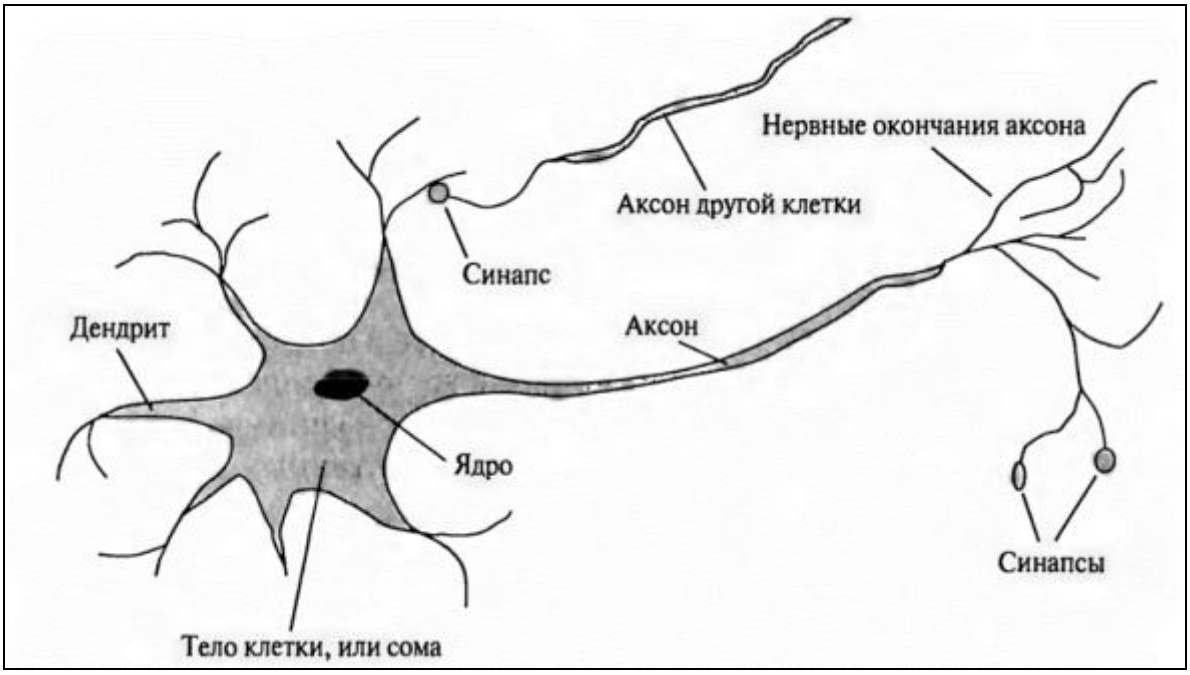


Рисунок 3.1 – Структура нейрона

Нейрон активирован, когда общий уровень сигналов, которые прибыли в его ядро от дендритов, превышает определенный пороговый уровень (так называемый «порог активации»). Таким образом, созданный из огромного количества простых элементов, мозг нацелен на решение чрезвычайно сложных вопросов.

Искусственные «Neuron» (лат.) сети, [97,98] созданные на основе модели, которая не является намного более трудной, чем описанные выше, способны достигнуть замечательных результатов. Основание искусственной нейронной сети сделано из довольно простых элементов, подражающих работе нейронов мозга (далее по тексту, «нейрон» (рисунок 3.2) следует понимать как «искусственный нейрон»).

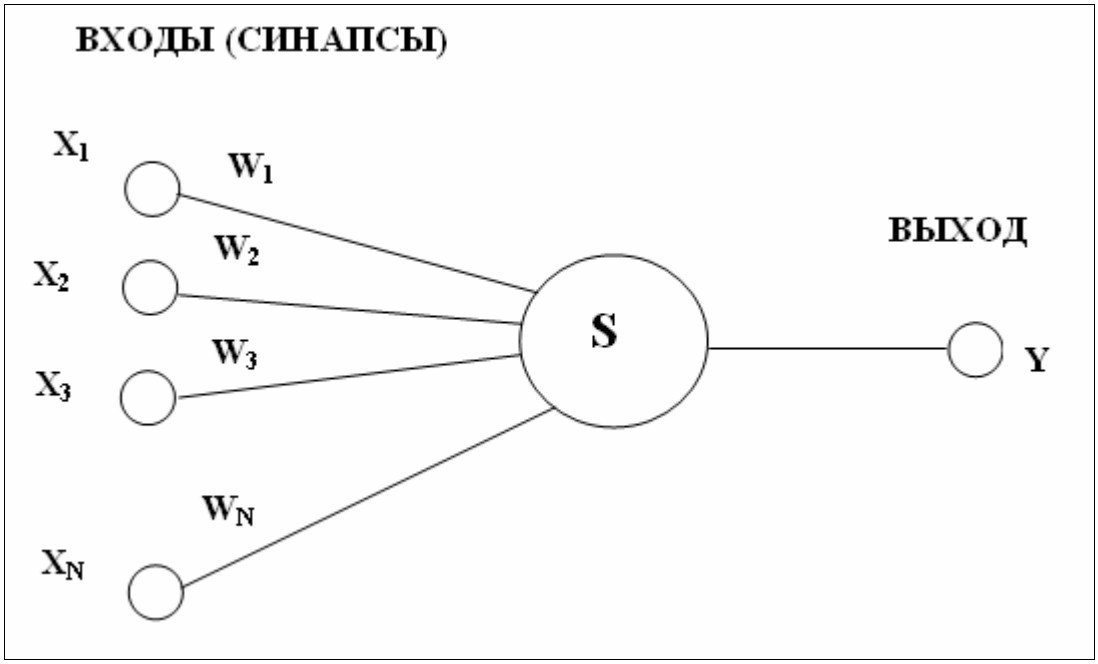


Рисунок 3.2 – Искусственный нейрон

Любой нейрон должен обладать группой синапсов, которые представляют собой однонаправленные входные связи, которые в обязательном порядке соединяются с окончаниями-выходами других нейронов. Синапсы имеют своеобразную характеристику: размер синоптической связи, чаще называемой ее весом Wi. У каждого нейрона в каждый момент времени существует текущее состояние, определяемое посредством взвешенной суммы его входов: $S = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i$.

У нейрона есть аксон – выходная коммуникация этого нейрона, посредством которого поступивший сигнал (волнение или торможение) рассматривается на синапсах следующих нейронов. Выходом любого нейрона является функция его состояния: $Y = f(S)$.

Функция f является вызванной функцией активации. У функции активации может быть различный вид: порог (рисунок 3.3а), кусочно-линейный (рисунок 3.3 б), нелинейный, сигмоид (рисунки 3.3в и 3.3г).

Набор всех нейронов в любой искусственной нейронной сети разделяется на уровни. Взаимодействие нейронов происходит между соседними уровнями: уровень с уровнем. Уровень искусственной нейронной сети – ряд нейронов, на

которых сигналы от других нейронов этой сети параллельно прибывают в каждый шаг времени.

Решаемая задача определяет архитектуру искусственной нейронной сети [48,49,97]. Для некоторого ряда задач уже существуют оптимальные конфигурации. Если задача не может быть уменьшена до одного из известных классов, разработчик должен решить проблему построения новой архитектуры сети. В большинстве случаев оптимальный вариант искусственной нейронной сети формируется на практике.

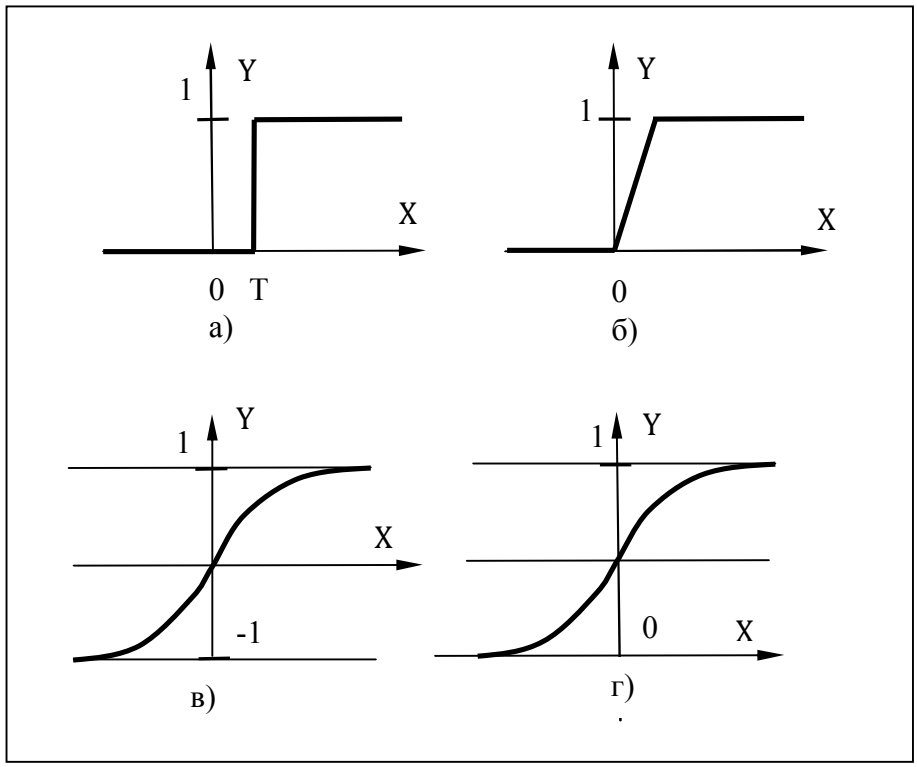


Рисунок 3.3 – Функции активации искусственных нейронов

Имеется несколько видов стандартной архитектуры нейронных сетей: полно-когерентные и многослойные сети. В полно-когерентных нейронных сетях передача сигналов идет следующим образом: каждый нейрон передает выходной сигнал к другим нейронам, при этом и сам нейрон также получает этот сигнал. Все сигналы входа передаются всем нейронам. Выходными сигналами нейронной сети могут быть все или только некоторые выходные сигналы нейронов после нескольких шагов функционирования сети.

В многослойных нейронных сетях перцептронах (perceptrons) нейроны объединяются в уровнях. Уровень содержит набор нейронов с универсальными сигналами входа. Количество нейронов в уровне может быть любым и не зависит от суммы нейронов в других уровнях. Обычно сеть состоит из нескольких уровней. Внешние сигналы поступают на вход внешнего уровня и, проходя по всем уровням, формируют управляющие сигналы на последнем уровне. Кроме входа и выходных уровней в перцептронах могут существовать один или несколько так называемых скрытых уровней

Среди многоуровневых сетей можно выделить:

– сети без существования обратных связей;

– сети с наличием обратных связей.

В сетях без обратных связей, называемых часто «сети прямого распространения», нейроны входного уровня получают сигналы, преобразуют их и передадут нейронам первого уровня, те в свою очередь – нейронам второго уровня и т.д. до выходного, который дает сигналы для интерпретатора и пользователя. Если не оговорен другой алгоритм, то каждый выходной сигнал n-го уровня передастся на вход всех нейронов (n+1)-го уровня; однако возможен вариант соединения n-го уровня с произвольным (n+p)-уровнем. Примеры многоуровневых нейронных сетей представлены на рисунке 3.4. Здесь на рисунке 3.4а изображен одноуровневый, а на рисунке 3.4б, – многоуровневый перцептрон прямого распространения (без обратных связей).

В сетях с обратными связями сигналы передаются с последующих уровней на предыдущие. Сети с обратными связями изображены на рисунках 3.4в и 3.4г. После введения обратных связей сеть превращается в динамическую систему и уже не просто может осуществлять отображение множества входных векторов состояния на множество выходных. В этом случае неизбежно возникает вопрос об устойчивости проектируемой сети.

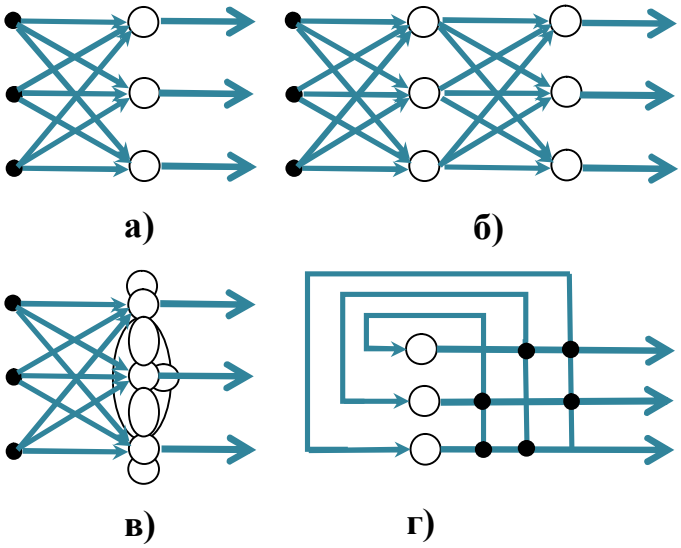


Рисунок 3.4 – Функции активации искусственных нейронов

Число уровней и число нейронов в каждом уровне может быть произвольным, однако на самом деле оно ограничено ресурсами компьютерных или специализированных микросхем, на базе которых строятся нейросети. Чем сложнее сеть, тем особенно сложные проблемы она может решать.

Сбор данных для нейронной сети. При решении задачи с помощью нейронной сети необходимо первоначально решить задачу сбора данных для ее обучения [48,49,95–97]. Обучающий набор данных представляет собой набор наблюдений. При этом, должны быть указаны значения входных и выходных переменных. На этом этапе определяется, какие переменные, сколько и какие наблюдения должны быть использованы.

Выбор переменных осуществляется интуитивно на основе знаний экспертов в конкретной предметной области. Нейронные сети работают с числовыми данными, лежащими в строго ограниченном диапазоне.

Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение нейронной сети представляет собой процесс определения «коэффициентов связей» между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть должна быть способна выявлять сложные зависимости между входными сигналами-данными и выходными, и

помимо этого, выполнять обобщение. Таким образом, если верно построен алгоритм обучения, то сеть сможет сформировать верный результат даже в случае отсутствия данных в обучающей выборке, а также неполных или частично искаженных данных.

Определение количества необходимых наблюдений для обучения сети, часто оказывается непростым. Строка эвристических правил, координирующих количество необходимых наблюдений к сетевым размерам, известна (самое простое из них утверждает, что количество наблюдений должно быть в десять раз больше, чем количество коммуникаций в сети). На самом деле это число зависит от заранее неизвестной сложности того процесса, который должна воспроизвести нейронная сеть. С ростом количества переменных количество растет и количество требуемых наблюдений, причем, растет нелинейно, так при сравнительно небольшом числе (например, 50) переменных может потребоваться огромное число наблюдений.

Для большого количества реальных задач нескольких сотен или тысяч наблюдений бывает достаточно. Для особо сложных задач зачастую может потребоваться в сотни раз большее количество наблюдений, при этом, следует отметить, что даже тривиальная задача требует не менее сотни наблюдений.

Обучение. Для ИНС процесс обучения [48,49,97,98] может быть рассмотрен как управление архитектурой сети, то есть ее настройка, а именно, уточнение весов связей и масштабов коммуникаций для эффективного выполнения конкретной задачи. В процессе обучения, как правило, нейронная сеть должна скорректировать веса коммуникаций по предоставленной обучающей выборке. В процессе итеративной настройки значений весовых коэффициентов, функционирование сети улучшается. Свойство сети «обучаться на примерах», то есть изменяться в процессе функционирования, делает эти модели более привлекательными по сравнению с системами, которые следуют определенной системе правил функционирования, заложенной в их основу экспертами.

Для разработки процесса обучения, в первую очередь, необходимо иметь модель внешней среды, в которой должна функционировать нейронная сеть –

знать информацию доступную для сети. Эта модель определяет учебную парадигму. Во-вторых, необходимо понять, по какому алгоритму нужно модифицировать весовые параметры сети и какие законы обучения управляют процессом настройки. Алгоритм обучения означает механизм, в котором настройка весов происходит с использованием правил для обучения.

Есть три типа обучения ИНС: «с учителем», «без учителя» (самообучение) и смешанный тип. В первом случае у нейронной сети имеются корректные ответы (выходы сети) к каждому примеру входа. Веса должны быть скорректированы так, чтобы сеть выдавала ответы как можно более ближе к уже известным правильным значениям. Усиленный вариант обучения «с учителем» предполагает, что известна только критическая оценка правильности выхода нейронной сети, а сами правильные значения выхода не задаются. При этом сеть должна иметь общий алгоритм получения ответа.

Обучение «без учителя» не предполагает настройки на правильные ответы для каждого примера обучающей выборки. Этот принцип обучения предполагает занесения внутренней структуры данных или корреляции между заложенными образцами в системе данных. Данная информация позволяет распределить образцы по категориям и решать сети поставленную задачу. Смешанное обучение предполагает алгоритмы первых двух видов, то есть часть весов определяется посредством обучения «с учителем», в то время как остальная находится с помощью «самообучения».

В теории обучения искусственных нейронных сетей рассматривается три их фундаментальных свойства, имеющих связь с обучением: емкость, сложность образцов, а так же вычислительная сложность. Под емкостью принято понимать количество образцов, которое в состоянии запомнить сеть, а также, какие функции и границы принятия решений она может сформировать. Число обучающих примеров, которые необходимы для формирования способности сети к обобщению, определяет сложность образцов для обучения. Слишком малое число образцов может привести к состоянию сети, называемому «переобученность сети». В этом случае сеть хорошо функционирует на примерах

обучающей выборки, но не справляется с задачами тестовых примеров, имеющих тот же закон статистического распределения. Имеются четыре вида правил обучения [97]: «коррекция по ошибке», «машина Больцмана», «правило Хебба» и «метод соревнования».

Правило коррекции по ошибке. При обучении с учителем для каждого входного примера должно быть задано желаемое значение на выходе, например, **d**. Реальное значение на выходе сети **y** может не совпадать с желаемым. Поэтому «принцип коррекции по ошибке» обучении предполагает использование сигнала (**d-y**) для модификации весов, который будет обеспечивать постепенное уменьшение ошибки. Процесс обучения включается только в случае, когда перцептрон «ошибается». Существуют различные алгоритмы такого типа обучения.

Обучение Больцмана основывается на правилах, которые вытекают из информационных теоретических и термодинамических принципов. В процессе обучения «по Больцману» подбирается такая настройка весовых коэффициентов, при которой состояния последнего уровня нейронов удовлетворяют желаемому распределению вероятностей. Обучение «Больцмана» представляет собой специальный, особый, случай коррекции по ошибке. В данном случае под ошибкой следует понимать расхождение корреляций состояний в двух режимах.

Правило Хебба. Одним из первых правил, которое применялось при «обучении сети», было правило-постулат обучения Хебба. Хебб в своем постулате опирался на имеющиеся нейрофизиологические наблюдения: в случае, когда нейроны с обеих сторон синапса активизируются одновременно и этот процесс происходит регулярно, то сила данной синаптической связи возрастает. То есть в природе происходит закрепление рефлекса на сигнал. Особенность этого правила следующая: изменение синаптического веса происходит только при изменении активности нейронов, связанных с данным конкретным синапсом.

Обучение методом соревнования. В отличие от обучения «по Хеббу», в котором нейроны последнего, выходного уровня могут возбуждаться одновременно, при соревновательном обучении используется другой закон, при

котором нейроны выходного уровня «соревнуются» между собой за возможность быть активированным. Это правило получило название «победитель берет все». Подобный вид обучения встречается в биологических нейронных сетях. Соревновательное обучение позволяет кластеризовать, то есть выделять в отдельные группы входные данные. Иными словами, подобные примеры группируются сетью по уровню корреляции и представляются в итоге в виде одного элемента.

В процессе обучения требуется модификация веса только «победившего» нейрона. При данном правиле обучения эффект достигается за счет такого изменения значения образца, сохраненного в сети (который является вектором весов связей победившего нейрона), при котором он больше отражает особенности входного примера.

Выводы

Подводя итог сказанному, можно сделать следующий вывод: машинное обучение нейронной сети определенным образом настраивает сеть на решение разного рода задач, например, распознавания образов, дискриминантного анализа, адаптивного управления в робототехнике. Иными словами, объект, который будет управляьбся с помощью нейронной сети должен иметь на каждое определенное внешнее воздействие определенную реакцию. Это должно ложиться в основу настройки нейронной сети. Если же получение такой информации не представляется возможным при формировании нейронной сети для управления рассматриваемым объектом, то данная задача не может решаться на основе этого бионического метода. Для рассматриваемого случая, где в качестве объекта имеется энергоемкое непрерывное нелинейное замкнутое производство, в котором не представляется возможным получить пары значений «Вход» – «Выход», искусственные нейронные сети не могут быть применены.

3.2.2 Методы эволюционного программирования

Эволюционный поиск с информационной точки зрения представляет собой поэтапное (или последовательное) преобразование одного нечеткого множества решений в другое, в результате которого получается искомое множество. Само преобразование и представляет собой алгоритм поиска. Таким образом, для данной постановки задачи дифференцируемость, непрерывность и другие условия, накладываемые на целевую функцию в классических математических методах, не являются необходимым условием решаемой задачи. Помимо этого, целевая функция может быть не определена вне области допустимых решений, а внутри этой области может иметь, помимо локальных, не один глобальный экстремум.

Термин «эволюционные вычисления» относится к нескольким методам оптимизации и синтеза систем, которые объединены понятием эволюции объектов образующих рассматриваемую систему. Такое понятие предполагает биологическую трактовку, имеющую место в эволюции живых организмов [97,135 – 139].

Теория систем рассматривает эволюцию как процесс адаптации системы путем изменения ее параметров под влиянием внешних факторов. В связи с этим эволюционные вычисления можно представить как эволюцию (развитие) методов теории адаптивных систем.

Сущность эволюционного подхода следующая:

1. Выделяется некоторое множество **X** объектов, с определенными параметрами и имеющими некоторую связь друг с другом внутри рассматриваемой задачи (структуры). Среди этого множества объектов выбираются наилучшие исходя их выбранного критерия. Этот критерий (критерий оптимальности) должен формироваться на основе свойств объектов рассматриваемой задачи (структуры) и может не иметь аналитического выражения. Необходимо отметить, что каждому объекту из множества **X** сопоставляется значение этого критерия F(**X**).

2. Природа множества объектов, исследуемого в решаемой задаче, может быть различной, следовательно, требуется создать **S-**представление исходного множества в другом, конечном множестве. Представление $\varphi(\mathbf{X}) \to \mathbf{S}$ является описанием связи между исследуемыми объектами. В данном контексте «объекты» рассматриваются как потенциальные решения оптимизационной задачи, и поисковый алгоритм занимается управлением и манипулированием этих объектов с целью поиска экстремума. Имеется обратное представление описания связей: $\varphi^{-1}(\mathbf{S}) \to \mathbf{X}$, которое можно пояснить как: каждому созданному в процессе эволюции элементу представления $s \subset \mathbf{S}$ соответствует элемент в множестве $x \subset \mathbf{X}$.

3. Процесс оптимизации представляет собой последовательное построение множества объектов-решений $x^* \subset \mathbf{X}^*$, для которых выполнено следующее условие:

$$x^* = \operatorname{argmax} \mathbf{F}\,[\boldsymbol{\varphi}^{-1}(s)], \text{ где } s \subset \mathbf{S}.$$

Процесс оптимизации характеризуется изменением, развитием (или эволюцией) исходного множества **X** к некоторому состоянию, являющемуся оптимальным с точки зрения определенного критерия. При этом изменяется состав и параметры входящих во множество **X** объектов.

Эволюционный алгоритм определяет способ построения множества объектов-решений $x^* \subset \mathbf{X}^*$. Иными словами, определяет, как идет реализация процесса оптимизации.

Эволюционные вычисления представляют собой отдельный класс методов, пригодных для решения оптимизационных задач. Особо эффективны они для слабо формализованных задач оптимизации и задач, где оптимизируемые объекты не имеют числового выражения.

Известные на нынешний момент методы искусственного интеллекта: **генетические алгоритмы, эволюционное программирование, роевые алгоритмы** относятся методам эволюционных вычислений. Несмотря на то, что

эти методы близки по своей сути, однако каждый из них имеет свои особенности, в частности, реализация эволюционного алгоритма в каждом методе отличается коренным образом. А именно, различен выбор способа представления индивидуума, механизм отбора объектов для дальнейшей обработки, измерения функции пригодности и так далее. Проведем анализ перечисленных выше методов.

3.2.3 Генетический алгоритм

Основоположником алгоритмов, получивших название «генетических», считается Д. Холланд, опубликовавший книгу «Adaptation in Natural and Artificial Systems» [136]. Этой книгой был заложен теоретический фундамент, позаимствованных у природных аналогов эволюционных методов. Впервые генетические алгоритмы были применены к таким научным проблемам, как распознавание образов и оптимизация. Генетический алгоритм [97,135-139]. представляет собой адаптивный поисковый метод, основанный на методах случайного поиска и селекционного отбора лучших с точки зрения приспособленности к жизни элементов в популяции, подобно тому, как это представлено эволюционной теорией Чарльза Дарвина.

Генетические алгоритмы отлично себя зарекомендовали на разнообразных задачах, например таких, как задачи на графах: коммивояжера, раскраска и т.д., задачи составления расписаний, задачи компоновки, игровых стратегиях, настройки и обучения искусственной нейронной сети и т.д. На рисунке 3.5 [135] приведен графический анализ эффективности различных методов оптимизации, из которого видно, что генетический алгоритм уступает только специализированным методам в случае унимодальной целевой функции.

Генетические алгоритмы отличаются от других оптимизационных методов следующими особенностями:

- основная работа алгоритмов происходит с закодированным множеством параметров, а не с самими параметрами задачи;

• поисковая процедура использует сразу нескольких альтернатив на заданном множестве решений, а не выполняет улучшение одного решения;

• для оценки качества принятия решений применяется целевая функция (функция приспособленности), а не ее различные приращения;

• применяются вероятностные правила анализа оптимизационных задач.

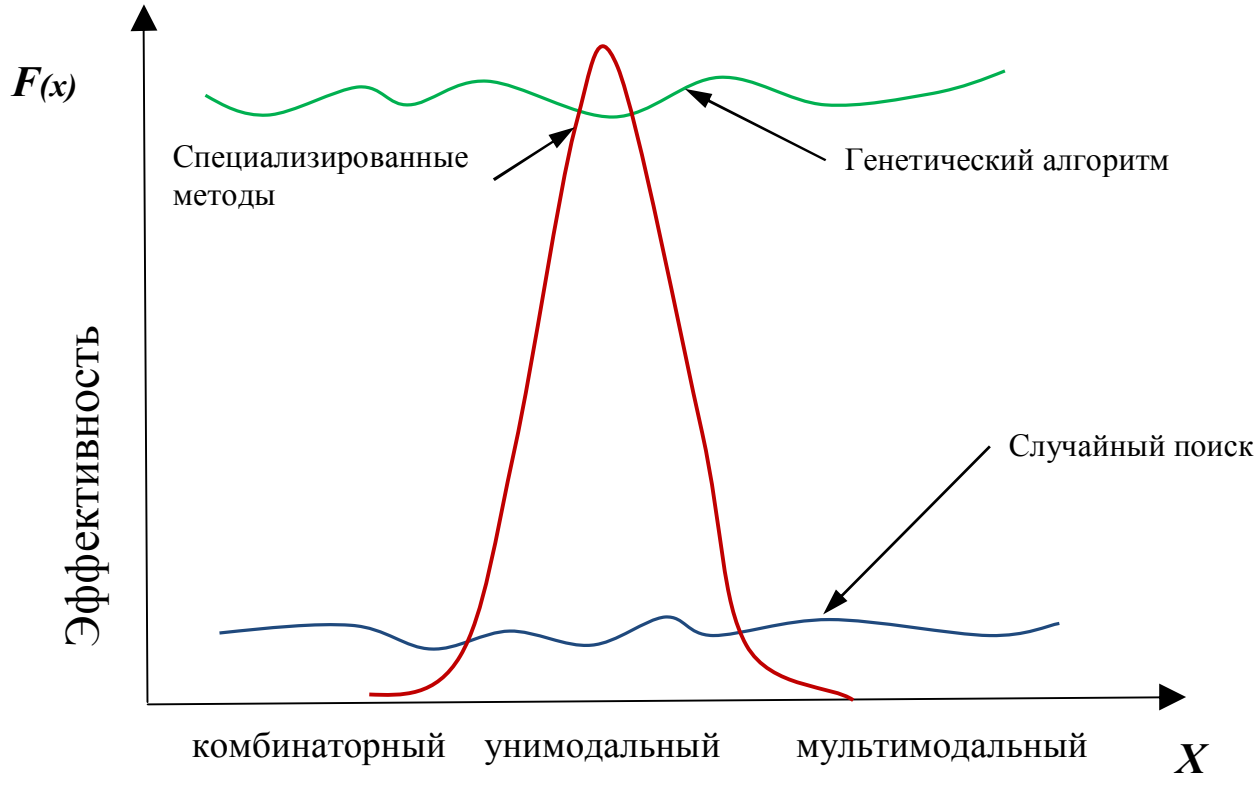


Рисунок 3.5 – Сравнительная эффективность алгоритмов решения оптимизационных задач

Классический генетический алгоритм [97,105,135,138] выглядит следующим образом:

1. Создание начальной популяции так называемых «генов» на основе кодирования исходных параметров.

2. Оценивание приспособленности каждого гена (особи) в текущей популяции с помощью функции «приспособленности».

3. Выбор особей с высоким значением «приспособленности» для скрещивания.

4. Скрещивание выбранных генов для и получения следующего поколения.

5. Случайное изменение кодов генов (мутация).

6. Формирование нового поколения популяции.

7. Проверка, если популяция не «сошлась», то переход к пункту 2, иначе – конец поиска.

Понятия генетического алгоритма. В биологии существует понятие фенотипа и генотипа. Любой живой организм определяется своим фенотипом, то есть тем, чем является объект в реальном мире, а также и генотипом. Генотип содержит всю информацию об организме на уровне хромосомного набора. При этом каждый ген, то есть отдельный элемент информации из генотипа организма, имеет свое отражение в фенотипе. Опираясь на этот факт, для решения оптимизационной задачи требуется представить каждый параметр в закодированной форме, которая может быть использована в генетическом алгоритме. Все дальнейшие действия, связанные с поиском оптимального решения задачи, производятся на уровне генотипа. Очевидно, что в данном случае информация о внутренней структуре объекта, для которого должна быть решена оптимизационная задача, уже не нужна. Это обстоятельство и обуславливает широкое применение генетических алгоритмов в самых различных задачах.

Наиболее часто в разных видах генетического алгоритма для кодирования генотипов объекта применяют двоичные коды. При этом каждому значению атрибута объекта в фенотипе, аналогично биологическому закону, должен быть сопоставлен ген в генотипе рассматриваемого объекта. **Ген** представляет собой битовую строку фиксированной длины, которая отражает собой значение конкретного признака. Гены объединяются в **хромосомы**.

Хромосомы, в свою очередь, образуют **популяцию** $P^t=\{P_1,P_2,P_3,\ldots,P_N\}$, представляющую множество элементов Pi, где t – номер генерации популяций в генетическом алгоритме, t=0,1,2,…,N – размер популяции. Каждый элемент

популяции Pi представляет собой, как правило, одну **хромосому** или **особь,** являющуюся конкретным экземпляром из множества альтернативных закодированных решений. Элементы популяции Pi в генетических алгоритмах часто называют **родителями**.

Выбор хромосом для начальной популяции не имеет значения для сходимости итерационного поискового процесса. Чаще всего, в генетических алгоритмах индивидуумы начальной популяции распределяют случайным образом равномерно по всей области допустимых решений.

Для каждой особи популяции (индивидуумом, хромосомой) вычисляется **функция приспособленности**. Эта функция должна иметь численное значение. Относительно аналитических и иных свойств функции приспособленности нет никаких ограничений, единственно, она должна значительно отличаться для разных особей, что является условием для отбора наилучших из них в новое потомство.

Процесс получения потомства от родителей (хромосом) включает операции, называемые **кроссовер (кроссинговер, рекомбинация)** и **мутация**. Эти операции изменяют **генетический код** особей-родителей и в результате получают хромосомы-потомки. В простейшем случае в качестве генетического кода может применяться обычный двоичный позиционный код.

При этом, операция **кроссовер (кроссинговер, рекомбинация)** представляет собой обмен генами – фрагментами кода случайной или фиксированной длины для получения новой комбинации-потомка. Мутация – это процесс случайного изменения (инверсия) одного или нескольких позиций кода на противоположное значение. В результате этих операций (кроссовера и мутаций) одни особи образуют другие. Последние формируют потомство с новыми значениями функции приспособленности.

Популяция таким образом эволюционирует от состояния к состоянию, когда функция приспособленности принимает экстремальное значение и уже не меняется от поколения к поколению. Это и есть признак «останова» генетического алгоритма, про который говорят, что «популяция сошлась».

Классический генетический алгоритм явился основой для множества его модификаций, которые были получены путем изменения его параметров и генетических операторов: селекции, кроссовера, мутации.

Кодирование элементов популяции генетического алгоритма. Важнейшим этапом генетического алгоритма представление значений параметров решаемой задачи в виде кодов, то есть элементов-хромосом, образующих популяцию. Чаще всего кодирование выполняют на основе бинарного алфавита Ab = {0,1}. Хромосома в закодированном виде представляет l-местный кортеж, элементами которого являются гены, состоящие из символов принятого алфавита, стоящие на i-м месте в хромосоме.

Практически для кодирования применяется единственный алфавит, хотя теоретически возможно применение нескольких алфавитов Aj для кодирования популяции. В таблице 3.1 приведен пример кодирования целых чисел от 0 до 15 [138] в двоичном коде и коде Грея.

Таблица 3.1 – Пример кодирования целых чисел от 0 до 15 с помощью двоичного кода и кода Грея:

Число	Двоичный код числа	Код Грея для этого числа
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

При двоичном кодировании, имеющем позиционный характер, биты строки-кода имеют различный вес, вследствие чего изменение в старших разрядах приводит к большим скачкам в пространстве поиска по сравнению с изменением в младших разрядах. Эта особенность может в ряде случаев негативно влиять на качество работы алгоритма, для таких задач применяется непозиционный двоичный код Грэя. Этот вид кодирования реализует получение следующего кода как суммы по модулю два для двух соседних с текущим битом позиций. В коде Грея изменение одного бита в любой позиции приводит к изменению значения всего элемента на единицу.

Для некоторых задач двоичное представление значений параметров является естественным, для других может быть полезным выбрать иной способ кодирования. Необходимо заметить, что выбор способа представления параметров задачи в виде кодов, то есть хромосомы, влияет на эффективность ее решения.

Создание начальной популяции. Эффективность генетического алгоритма зависит от структуры и состава начальной популяции. При создании начального множества решений формируется популяция на основе следующих принципов:

– «одеяло», – формируется полная популяция, включающая все возможные решения в заданной области;

– «дробовик» – происходит случайный выбор из всей области решений рассматриваемой задачи;

– «фокусировка» – реализует случайный выбор допустимых значений из заданной области решений задачи;

– «комбинирование» – состоит из комбинаций первых трех принципов.

Алгоритм стартует, при этом формируется первоначальное множество потенциальных решений (гипотез) P_0, которое образует начальную популяцию. Чаще всего, начальная популяция формируется случайно. Однако, в ряде случаев, в начальную популяцию для увеличения скорости сходимости алгоритма, могут быть включены решения, полученные ранее с помощью других оптимизационных методов.

Размер начальной популяции является параметром алгоритма. Он, как правило, определяется экспериментально и может изменяться при изменении ряда условий задачи.

Функция приспособленности. При решении оптимизационной задачи с помощью генетического алгоритма требуется определить величину приспособленности, то есть меру качества каждой хромосомы (особи) в пространстве поиска. Для этой цели предназначена «фитнес-функция» $F(x_i)$ (fitness function).

Условия, накладываемые генетическим алгоритмом на функцию приспособленности следующее: она должна принимать неотрицательные значения на всей области решения задачи. При этом не ставится условие ее непрерывности и дифференцируемости. Эта функция должна определять, насколько хорошо конкретная хромосома подходит для решения поставленной задачи.

При решении задач, где требуется максимизация целевой функции, эта функция может быть взята в качестве основы для функции приспособленности. При решении задач, требующих минимизировать целевую функцию, необходимо выполнить преобразование задачи таким образом, чтобы она была сведена к поиску максимума. Существование ограничений в решаемой задаче требует включения в функцию приспособленности штрафы за невыполнение ограничений, уменьшающие ее значение.

Имеется ряд подходов к вычислению функции приспособленности.

Нормализованная приспособленность каждой i-ой хромосомы представляет собой отношение [95]:

$$p_s(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^{N} F(x_i)}. \qquad (3.1)$$

Ввиду того, что нормализованная приспособленность всегда принимает значения из интервала [0,1], то ее можно представить в качестве вероятности и,

следовательно, можно использовать для отбора хромосом непосредственно. Однако следует иметь в виду, что такую интерпретацию можно использовать только при применении конкретной процедуры отбора – «отбора с замещением».

В генетических алгоритмах имеет место также понятие функции «**относительной приспособленности»**, которая может рассматриваться как «**приспособленность особи»**, нормализованная относительно средней «приспособленности популяции» [95,135]:

$$p_s(x_i) = \frac{F(x_i)}{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N} F(x_i)}{N}\right]}. \qquad (3.2)$$

Относительная приспособленность представляет собой характеристику: насколько лучше или хуже приспособленность рассматриваемой хромосомы в текущей популяции по сравнению со средним значением пригодности хромосом в этой популяции.

Отбор. На каждом шаге эволюции осуществляется селекционный отбор хромосом (особей) с помощью вероятностного оператора для их скрещивания. В процессе отбора выделяются хромосомы пропорционально их значению приспособленности. Выбранные особи участвуют в воспроизводстве потомков. Отбор такого вида называется **пропорциональным**. Способ отбора формируется природой решаемой оптимизационной задачи. Кроме пропорционального вида отбора, применяемого в классическом генетическом алгоритме, существуют и другие виды случайного отбора.

Универсальный случайный отбор. Данный вид отбора характеризуется назначением каждой хромосоме вероятности $P_s(x_i)$, равной отношению значения ее функции приспособленности к суммарной приспособленности всей популяции (2.9). Следующим этапом идет отбор «с замещением» всех участвовавших N особей для дальнейшей генетической обработки, согласно величине $P_s(x_i)$.

Простейший вид пропорционального отбора – отбор по принципу «рулетка». В нем происходит отбор N хромосом с помощью N «запусков» рулетки. Колесо рулетки должно содержать сектора, каждый из которых соответствует определенному члену популяции. Размер i-ого сектора должен быть пропорционален соответствующей величине $P_s(x_i)$. При таком виде отбора хромосомы с более высоким значением $P_s(x_i)$, то есть, с большей вероятностью, будут чаще выбираться, чем другие хромосомы.

Турнирный отбор. Реализация этого вида отбора выполняется следующим образом: из текущей популяции хромосом случайным образом выбирается некоторое количество t особей. Затем лучшая особь из этой группы заносится в промежуточную популяцию. Эта процедура повторяется N раз. Выбранные случайным образом из полученной промежуточной популяции хромосомы используются для скрещивания. Количество особей в группе, которых отбирают для турнира, чаще всего равен 2. Такой турнирный отбор называют парным или двоичным. В общем случае возможно создание для отбора группу из произвольного количества хромосом-кандидатов.

Отбор усечением. Данная стратегия отбора для дальнейшего скрещивания особей использует популяцию, отсортированную по убыванию соответствующих значений функции приспособленности. Количество особей для дальнейшего скрещивания выбирается в соответствии с назначаемым значением порога T[0;1]. Порог определяет, какая часть хромосом, начиная с первой, то есть с самой приспособленной, будет выделена для участия в отборе. Если величину порога принять равной 1, то все хромосомы текущей популяции будут допущены к отбору.

Элитный отбор. Элитный алгоритм отбора гарантирует выживаемость лучших членов популяции. Этот алгоритм содержит процедуру обязательного перенесения в группу хромосом для скрещивания одной лучшей особи, если она не прошла через процесс отбора.

Алгоритм «элитизма» может быть применен практически при любой реализации стандартных методов отбора. Использование «элитизма» позволяет

сохранить хорошее промежуточное решение, однако необходимо иметь в виду, что такой прием может «зациклить» процесс поиска в локальном экстремуме.

Генетические операторы. Процесс селекции создает новую популяцию (родительскую популяцию), которая будет создавать потомков. Эту популяцию часто называют «родительским пулом» с численностью N (равной размеру текущей популяции). Для обеспечения возможности развития и качественного улучшения популяций хромосом между этапами отбора необходимо введение некоторого разнообразия в популяцию. Из теории эволюции известно, какую важную роль играет механизм передачи признаков родителей потомкам.

В генетических алгоритмах передачу родительских признаков потомкам реализует специальный оператор, называемый **скрещивание** (**кроссовер** или **кроссинговер**). Этот оператор определяет, каким образом будут передаваться родительские признаки потомству. Оператор работает по вероятностному принципу: выбираются две родительские особи, и к ним применяется вероятностная операция скрещивания (кроссовер, иногда называемый рекомбинацией). В результате на основе родительских особей строятся новые (1 или 2) особи-потомка. Отобранные особи подвергаются операции кроссовера с заданной, достаточно большой вероятностью P_c (чаще всего $0.5 \leq P_c \leq 1$). Оставшиеся пары особей, к которым не применялась операция кроссовера, в неизмененном виде переходят на следующую стадию, называемую **мутацией**.

Существует множество видов оператора скрещивания [97,105,137],. Самый простой из них: одноточечный кроссовер, изображенный на рисунке 3.6.

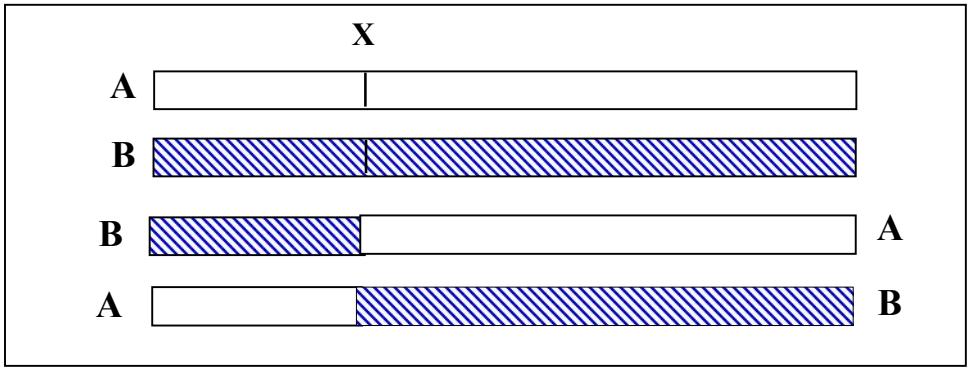


Рисунок 3.6 – Схема, иллюстрирующая реализацию одноточечного кроссовера (здесь X – точка разрыва)

Этот вид кроссовера работает следующим образом: случайно выбирается одна из возможных точек будущего разрыва кода хромосомы. (Точкой разрыва является участок между соседними битами в кодовой последовательности). Обе родительские хромосомы разрываются в этой точке на два сегмента.

Следующим действием соответствующие сегменты различных родителей совмещаются, то есть «склеиваются», в результате чего получаются два новых генотипа-потомка. Помимо простейшего, одноточечного метода скрещивания, существует скрещивание с двумя и более точками разрыва.

Многоточечный кроссовер. Алгоритм работы многоточечного кроссовера (см. рисунок 3.7): в кодовой строке выбираются случайным образом p точек разрыва. Эти точки делят родительскую строку-код на p+1 части. Затем первый потомок пары наследует от первой хромосомы-родителя все части кодой последовательности с нечетными номерами, а от второго хромосомы-родителя – части с четными номерами. Второй потомок, соответственно, наследует части с четными номерами.

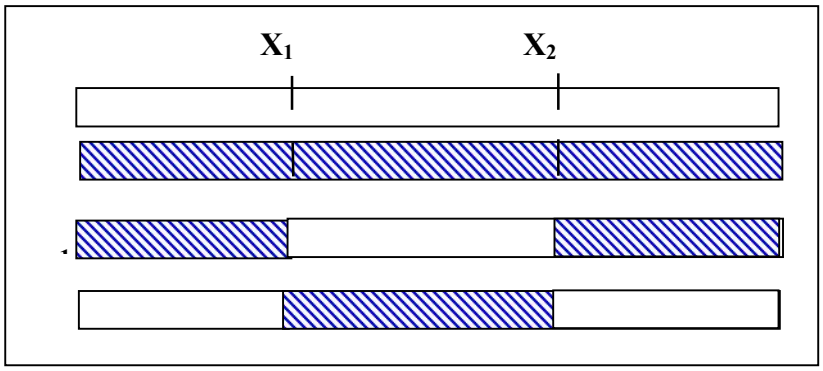


Рисунок 3.7 – Схема реализации двухточечного кроссовера

Однородный кроссовер. Реализация однородного кроссовера выполняется посредством независимого обмена каждого бита между родителями-хромосомами. При этом номера битов для обмена определяются случайно, с заданной вероятностью.

Кроссовер по маске. Данный тип скрещивания представляет собой обобщение однородного и многоточечного кроссовера. «Маска» – это битовая

строка, состоящая из нулей и единиц и имеющая длину на единицу меньше длины хромосомы. Номера позиций строки маски, где стоят единицы, и есть точки кроссовера. К примеру, маска «00100100» определяет двухточечный кроссовер. Точки разрыва в этом кроссовере находятся после третьего и шестого генов хромосомы.

Мутация. Данный генетический оператор, имеет функцию поддержания разнообразия особей-хромосом в популяции**.** После завершения операции скрещивания (кроссовера), хромосомы-потомки могут быть подвержены случайным изменениям. Вероятность мутации в природе весьма мала, и в генетических алгоритмах ее устанавливают обычно в пределах:

$$0 \leq P_c \leq 0{,}1.$$

В процессе мутации случайно выбранный ген подвергается изменению. Точка мутации бывает, как правило, одна в хромосоме. Мутация выполняется с заданной $0 \leq P_c \leq 0{,}1$ вероятностью. На схеме ниже представлена мутация хромосомы, имеющей бинарное кодирование.

В простейшем варианте реализации мутации в каждой хромосоме, участвующей в этом процессе, каждый бит изменяется на противоположный с вероятностью P_m. Такая мутация получила название «одноточечной мутации».

Особь до мутации: 1 0 0 1 0 1 **1** 0 0 1 1 1

Особь после мутации: 1 0 0 1 0 1 **0** 0 0 1 1 1

Существуют и более сложные разновидности мутации. Эти виды получили название операторов «инверсии» и «транслокации». В процессе инверсии происходит перестановка генов в обратном порядке внутри случайным образом выбранного участка хромосомы.

Особь до инверсии: 1 0 0 1 **1 1 1 0 0** 1 1 1

Особь после инверсии: 1 0 0 1 **0 0 1 1 1** 1 1 1

В процессе транслокации случайно выбранный участок хромосомы переносится в другой сегмент этой же хромосомы, начало которого тоже определяется случайно.

Особь до транслокации: 1 **0 0 1 1 1 1 0** 0 1 1 1

Особь после транслокации: 1 **1 1 0 0 0 1 1** 0 1 1 1

Все вышеперечисленные генетические операторы имеют аналоги в биологии.

Основное назначение оператора мутации в том, чтобы обеспечить возможность поисковому алгоритму выйти из той области, в которой в текущий момент формируется решение. Таким образом, выполняется своеобразный «прыжок» в поисковом пространстве. Этот механизм позволяет алгоритму выходить из областей с локальными экстремумами и «перепрыгнуть» в область с глобальным экстремумом. Если рассмотреть пример поиска экстремума функции с двоичным позиционным кодированием параметров, то величина этого «прыжка» в процессе мутации определяется номером позиции мутирующего гена в хромосоме. Очевидно, что чем старше разряд в коде подвергается изменению, тем больше величина «прыжка».

Реализация операции мутации очень проста, но играет весьма важную роль в генетическом алгоритме. Эволюция рассматриваемой в оптимизационной задаче популяции может быть произведена с помощью только лишь мутации и отбора, более того, для ряда задач такая стратегия генетического алгоритма бывает очень эффективна. Например, первоначально эволюционные стратегии разрабатывались на основании алгоритмов, которые использовали только мутацию и отбор.

Формирование нового поколения. После завершения процессов скрещивания и мутации рассматриваемого набора хромосом идет процесс формирования нового поколения. Из всего имеющегося набора особей в этом процессе определяется, какие хромосомы войдут в следующее поколение. Существует два наиболее часто встречающихся способа.

1. Полученные потомки («Новые особи») замещают своих родителей. Затем осуществляется переход к следующему этапу, а в нем эти потомки так же

оцениваются посредством фитнес-функции, затем отбираются для формирования родительских пар, дают потомство и конце-концов уступают место своим потомкам («детям»).

2. Данный способ предполагает включение в следующую популяцию как «родителей», так и их «детей». В этом случае необходимо определение, какие из особей-родителей и особей-потомков должны сформировать новую популяцию. В простейшем случае, после каждого скрещивания выбираются две лучшие (относительно функции приспособленности) хромосомы из четверки родителей и их детей. Имеется еще один механизм вытеснения, применяемый для ряда задач. Реализация этого механизма происходит путем удаления «похожих» хромосом из популяции.

Критерии останова. Определение критериев останова представляет собой важный момент при функционировании генетического алгоритма, ввиду того, что эволюционный процесс может быть бесконечным. Чаще всего в качестве критерия останова принимают предельно максимальное число эпох эволюции, или стабилизации величины приспособленности популяции. Стабилизация этого параметра определяется при сравнивании ее величины на нескольких эпохах.

Состояние популяции, при котором все хромосомы популяции практически одинаковы и находятся в области некоторого экстремума, называется схождением (рисунок 3.8 [138]).

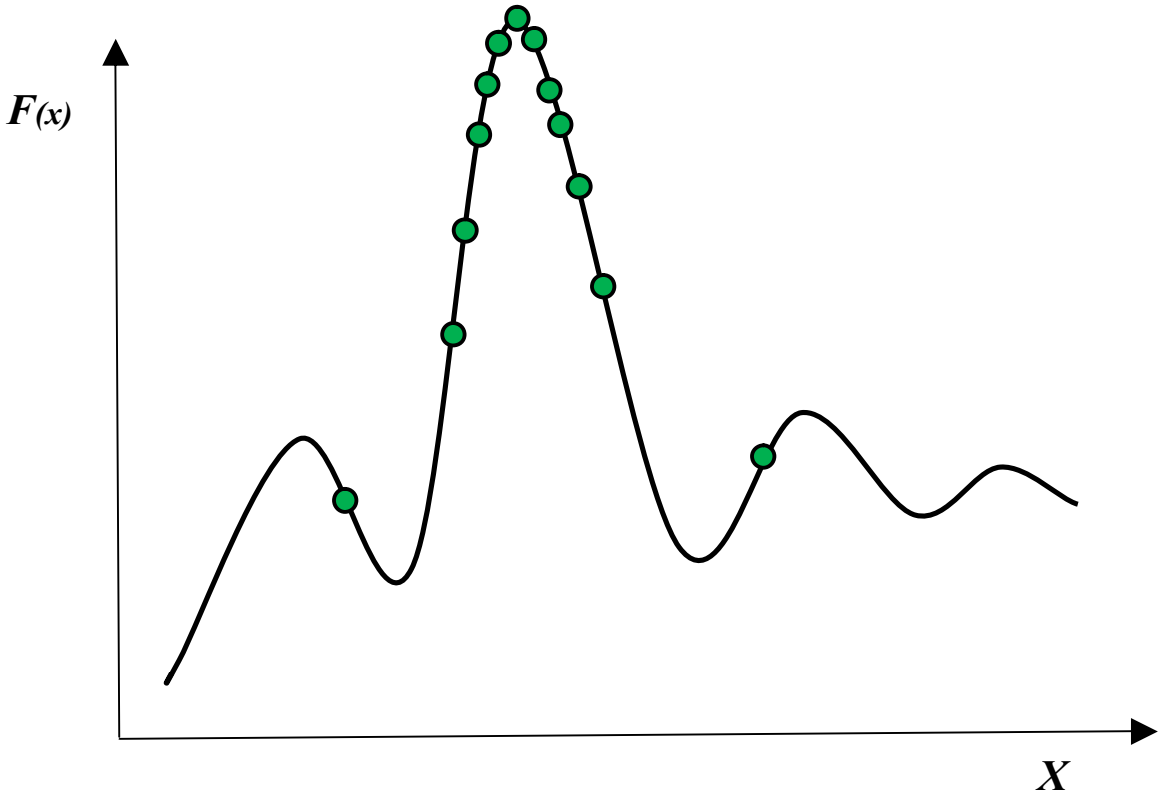


Рисунок 3.8 – Иллюстрация «схождения» генетического алгоритма

Очевидно, что в этой ситуации операция кроссовер никак не может изменить популяции. Хромосомы же, полученные в процессе мутации, обречены на вымирание, так как, скорее всего, имеют меньшее значение функции приспособленности. Этот факт является очевидным, если найденный экстремум является глобальным. Подводя итог сказанному, можно сказать: схождение популяции означает получение лучшего или близкого к лучшему решения.

Виды генетических алгоритмов. Существуют несколько различных видов генетического алгоритма, а именно: классический генетический, простой генетический, гибридный генетический, CHC-генетический и другие виды. Эти алгоритмы отличаются стратегиями отбора хромосом для скрещивания, процессом формирования нового поколения, самими алгоритмическими операторами, видом кодирования ген в хромосомах и так далее.

Канонический генетический алгоритм. Данный алгоритм является классическим. Он был разработан Джоном Холландом и опубликован в его

работе [136]. Согласно этому алгоритму, исходная популяция состоит из N хромосом, каждая из которых представляет собой цепочку генов фиксированной разрядности. Из данной популяции формируется промежуточная популяция посредством пропорционального отбора, а уже из нее случайным образом выбираются две хромосомы-родители. Далее с этими хромосомами производится одноточечный кроссовер, затем созданные два потомка с определенной заданной вероятностью подвергаются мутации (одноточечный вид). Затем полученные хромосомы-потомки занимают места своих родителей в родительском пуле. Процесс продолжается до достижения критерия останова алгоритма.

CHC-генетический алгоритм. CHC (Cross generational elitist selection, Heterogenous recombination, Cataclysmic mutation) впервые предложен Эсхелманом [138]. Особенности этого алгоритма следующие:

1. После получения нового поколения особей выбираются лучшие особи среди родителей и их детей. Если были созданы особи-близнецы, то в следующее поколение попадает одна из них.

2. Скрещиванию подвергается случайно выбранная пара, однако требуется, чтобы между родителями-хромосомами «Хэммингово» расстояние (расстояние между крайними различающимися битами) не было мало.

3. Скрещивание происходит с помощью разновидности однородного кроссовера HUX (Half Uniform Crossover), а именно, потомку переходит ровно половина кодовой последовательности хромосомы-родителя.

4. Ограничение на размер популяции: примерно 50 особей. Этим объясняется возможность применения однородного кроссовера.

CHC-алгоритм ввиду малого размера популяции хромосом быстро приводит ее к состоянию практически однородному, то есть когда в популяции существуют более или менее одинаковые хромосомы. При возникновении такой ситуации в CHC-алгоритме применяется «cataclysmic mutation»: все хромосомы, кроме самой «приспособленной», подвергаются серьезному изменению-мутации. В них изменяется около трети битов, составляющих код хромосомы. С помощь такой

операции, алгоритм как бы перезапускается и при дальнейших операциях применяет только кроссовер.

Генитор. Прародителем создания этого алгоритма считается Д. Уитли. Алгоритмы этого вида [138] отличаются от канонического генетического алгоритма следующим:

1. На каждом шаге генитор-алгоритма только одна пара случайно выбранных хромосом-родителей создает только одного потомка.

2. Хромосома-потомок замещает в текущей популяции не своего родителя, а одну из худших хромосом популяции. В лучшем случае, это может быть самая худшая с точки зрения приспособленности хромосома.

3. Выбор хромосомы для ее замены на полученную хромосому-потомка производится по ее рейтингу.

Генитор-алгоритм обладает более быстрой сходимостью, чем канонический генетический алгоритм.

Гибридные алгоритмы. Суть гибридных алгоритмов состоит в композиции канонического генетического алгоритма с иными оптимизационными методами поиска, которые подходят решению конкретной рассматриваемой задачи. Для каждого поколения полученное решение, которое соответствует потомку-хромосоме, оптимизируется выбранным для данной задачи методом, затем осуществляется переход к операторам обычным для генетического алгоритма.

Получаемый вид развития популяции хромосом был назван «Ламарковой эволюцией». В этом виде эволюции особь-хромосома как бы получает знания извне, а затем записывает их в собственный генотип, который в дальнейшем может передавать своим потомкам. Практика показывает, что подобные гибридные алгоритмы бывают очень эффективны при решении ряда задач. Это обстоятельство связано с тем, существует высокая вероятность того, что одна из особей-хромосом попадет в область нахождения экстремума, а после применения одного из оптимизационных методов окажется искомым решением задачи.

Выводы.

Для решения практических оптимизационных задач, имеющих многие неопределенности, как в постановке ограничений, так и в отсутствии математического представления целевой функции, применяется методы эволюционного программирования, одним из которых является генетический алгоритм. В основе этого метода оптимизации положено использование сразу нескольких альтернатив на заданном множестве решений, которые оцениваются с помощью «фитнес-функций», что позволяет отказаться от математического исследования целевой функции.

Алгоритм данного метода очень привлекателен для решения задачи оптимизации, в силу своей простоты. А если целевая функция не имеет локальных минимумов овражного характера, то возможно применение и классического генетического алгоритма, который довольно легко программируется и быстро приводит к искомому оптимуму. Преобразование полученных генов к искомым параметрам задачи не представляет особой трудности.

3.2.4. Алгоритмы роевого интеллекта

Решение задач оптимизации все чаще основывается на новых методах, примыкающих к эволюционным вычислениям по своей идеологии и основанных на моделировании социального поведения живых организмов [140 -143]. Первоначально в роевых алгоритмах была предпринята попытка моделировать поведение стаи птиц, которая обладает способностью порой внезапно и синхронно перегруппироваться и изменять направление полета при выполнении некоторой задачи.

Роевые алгоритмы, также как и эволюционные, используют популяцию особей, представляющих собой потенциальные решения задачи, и метод стохастической оптимизации, который моделирует поведение птиц или рыб в стае или насекомых в рое. В этих алгоритмах также начальная популяция

потенциальных решений генерируется случайным образом и далее идет поиск оптимального решения проблемы в процессе своего развития.

Алгоритмы роевого интеллекта имеют отличия от эволюционных, так как не создают на каждом шаге новых популяций с помощью отбора и кроссовера. В данных алгоритмах используется коллективное перемещение особей-агентов одной популяции, без уничтожения старых особей и порождения новых. Алгоритм роевого интеллекта использует правила косвенного обмена информацией между особями-агентами.

Единая схема обобщенного описания алгоритмов роевого интеллекта может быть представлена в следующем виде [140]:

$$SI=\{S,M,A,P\}, \tag{3.3}$$

здесь S – множество особей-агентов; M – объект-вещество для обмена инфомацией-опытом между особями-агентами *S*; A – правила функционирования роевого алгоритма; P – параметры, определяющие правила A.

Все алгоритмы роевого интеллекта имеют следующие этапы, которые определяются правилами A:

Первый этап – выполняется инициализация начальных состояний особей-агентов S;

Второй этап – вычисление специальной функции, так называемой «фитнес-функции» каждой особи-агента;

Третий этап – перемещение особей-агентов S по законам правил A, с учетом параметров P, обмена информацией-опытом M между особями-агентами.

Решается оптимизационная задача:

$$f^{опт} = f(X^{опт}) = \max_{X \in D} f(X), \tag{3.4}$$

где f(**X**) – скалярная целевая функция, называемая «фитнес-функцией», **X** – вектор варьируемых параметров. Для этой функции требуется отыскать экстремальное значение.

Муравьиный алгоритм. Данный алгоритм (Ant Colony Optimization) основан на модели, имитирующей процесс поиска муравьями наикратчайшего пути от места обитания, муравейника, до источника пищи. Алгоритм предложен М. Дориго в 90-е годы [141]. В природе муравьи решают задачу поиска посредством химической регуляции – выделения вещества, называемого феромоном. Муравьи оставляют за собой «дорожку», помеченную феромоном. Путь, по которому прошло много особей, более привлекателен для других муравьев. Если муравьи нашли самый короткий путь к пище, то они затрачивают меньше времени на путь «туда и обратно», вследствие этого данная «дорожка» быстро становится самой привлекательной. В результате, процесс поиска наикратчайшего пути завершается. Основные принципы взаимодействия особей в данном алгоритме, это: стохастичность, множественность повторений и обратная связь положительного характера.

Муравьиный алгоритм отличается своей простотой и, фактически, представляет собой многократный обход некоторого графа, причем, дуги этого графа имеют помимо веса особую динамически меняющуюся характеристику, которую принято называть «количеством феромона» или просто «феромоном».

С помощью муравьиного алгоритма в его классической формулировке решаются задачи комбинаторного характера, среди которых характерна «задача коммивояжера». Последовательность узлов в графе в данном алгоритме представляет собой вектор варьируемых параметров, а алгоритм направлен на поиск оптимального способ обхода узлов этого графа. Данный алгоритм решает задачу минимизации (муравьями ищется наикратчайший путь).

Сам алгоритм можно представить следующим образом: множество особей, участвующих в процессе поиска – $S=\left(s_1,s_2,..s_{|S|}\right)$, $|S|$ – здесь их количество. На итерации j особь i имеет состояние, описываемое как $s_{ij}=\left\{X_{ij},T_{ij}\right\}$. $X_{ij}=\left\{x1_{ij},x2_{ij},..xk_{ij}\right\}$– вектор изменяемых параметров, в данном случае, это последовательность узлов рассматриваемого графа, $T_{ij}=\left\{t1_{ij},t2_{ij},..tk_{ij}\right\}$ – вектор,

содержащий булевы переменные, определяющие, посещал ли i-й муравей (особь) k-й узел на j-й итерации.

Задается граф $M = \{F, R\}$. Дуги графа имеют два вида веса: F-количество феромона, который меняется в ходе решения задачи, и R постоянный, являющийся характеристикой задачи (в задаче коммивояжера R – расстояние между городами). При реализации алгоритма граф M обычно представляют в виде двух графов одинаковой структуры, но имеющими разные веса дуг: F и R.

Алгоритм, обозначенный в (3.3) литерой «А», для колонии муравьев следующий:

1. Первоначальная генерация положений особей. Это могут быть узлы, заданные случайным образом или заданные по условию задачи. Соответствующей дуге графа присваивается некоторое значение $t_{ij} = t_{min}$ («количество феромона»).

2. Вычисление целевой функции $\varphi(X_{ij})$ для каждой особи (для первой итерации это действие опускается).

3 Выполнение сравнения $\varphi(X_{ij})$ с $\varphi(X_j^{best})$.

4. Определение веса (феромона) для дуг, включенных в маршрут X_{ij} для каждой i-й особи (муравья).

5. Пересчет весов всех дуг с учетом ограничений и «испарения».

6. Выполнение перемещения особей. Для k-ой особи выбирается какой-либо «не посещенный» узел. Вероятность перехода в узел m зависит пропорционально от количества «феромона».

7. Если не выполнено условие останова на j-ой итерации, то переход к итерации 2, иначе – останов, и значение X_j^{best} выдается в качестве решения.

Алгоритм пчелиной колонии. Данный алгоритм разработан в 2005 году несколькими авторами [142]. Он нацелен на нахождения экстремума в заданном пространстве решений. В основу этого метода положен алгоритм поведения пчел при поиске нектара: пчелы направляют «разведчиков» для поиска нектара. По возвращении, разведчики с помощью «танца» сообщают, где были найдены нектаросодержащие цветы, и остальные пчелы вылетают на указанные участки.

Чем более медоносный участок найден, тем больше пчел будет к нему лететь. По возвращении пчел в улей, между ними происходит обмен информацией, и снова отправляются разведчики и рабочие пчелы.

Каждый шаг алгоритма характеризуется выбором n_b лучших пчел-агентов (по значению целевой функции, определяемой количеством «нектара»). Из оставшихся пчел происходит выбор еще n_g лучших («перспективных»). Определенные на данном шаге алгоритма N_b лучших и N_g перспективных участков запоминаются. Затем в окрестность каждого из лучших участков направляется c_b пчел, а каждого выбранного – c_g пчел соответственно. Пчела выбирает случайно точку участка. Пчелы-разведчики также случайно рассылаются по всему поисковому пространству.

Алгоритм завершается при одном из следующих условий: 1) достижения заданного числа итераций; 2) нахождения приемлемого решения; 3) истечения определенного времени.

Последовательность шагов алгоритма:

1. Посылка n_s разведчиков в случайным образом сгенерированные точки пространства и вычисление значения целевой функции в этих точках.
2. Отбор из полученных участков N_b «лучших» и N_g «выбранных».
3. Посылка в окрестность «лучших» участков c_b пчел, а в окрестность «выбранных» – c_g пчел, определяя целевую функцию.
4. Посылка n_s пчел-разведчиков.
5. Проверка условия окончания алгоритма, если «НЕТ», то переход на шаг 2.

Результат работы алгоритма – лучшее решение из всех полученных на всех итерациях.

Выводы.

Алгоритмы роевого интеллекта имеют отличия от эволюционных (в частности, генетического), так как не создают на каждом шаге новых популяций с помощью отбора и кроссовера. В данных алгоритмах используется коллективное перемещение особей-агентов одной популяции, без уничтожения старых особей и порождения новых.

Алгоритмы роевого интеллекта использует правила косвенного обмена информацией между особями-агентами, что прекрасно подходит для решения

оптимизационных задач определения кратчайшего пути, лингвистичеких задач, для решения так называемых задач коммивояжора.

Для решения задачи поиска энергоэффективного режима работы рассматриваемого типа предприятия данные алгоритмы представляют ряд трудностей при их реализации, а именно: кодирование начальных значений параметров производства в виде точек окрестности, где находятся особи, а также формирование функции обмена информацией между особями, определение «лучших» участков и «выбранных». Алгоритмы перемещения особей и обмена информацией между ними плохо трансформаируются в алгоритмы поиска режимов работы предприятия.

Ввиду этого алгоритмы роевого интеллекта не представляют интереса для решения задачи поиска энергоэффективного режима предприятия рассматриваемого типа.

3.3 Построение многокритериальной многопараметрической оптимизационной модели

Исходя из постановки задачи, выполненной в параграфе 1.2, для решения оптимизационной задачи необходимо выполнить построение критерия, обеспечивающего достижение поставленной цели. В качестве основы была положена статическая модель, описанная во второй главе, так как она учитывала весь технологический процесс производства и имела аналогично реальным 4 контура управления. То есть поиск энергоэффективного режима работы производства необходимо было построить по 4-м параметрам аналогично реальному управлению. В качестве ограничений при решении оптимизационной задачи здесь выступают граничные значения основных контролируемых технологических параметров $\mathbf{X}=\{B_2, B_5, XZ, M_3\}$, определяемые технологией производства, а так же цены на сырье и энергоносители.

Значения B_2 и B_5 – концентрация щелочи в материальных потоках 2 и 5 соответственно, M_3 – величина, вычисляемая как $1.65 \cdot B_3/A_3$, XZ – затравочное отношение, определяемое как отношение объема материального потока катализатора F_7 к прямому потоку F_5, содержащему растворенный Al_2O_3.

С помощью статической модели были построены зависимости расхода электроэнергии, пара и сырья на одну тонну готовой продукции от управляемых параметров **X**={B_2, B_5, XZ, M_3}, представленных на рисунках 3.9 – 3.12.

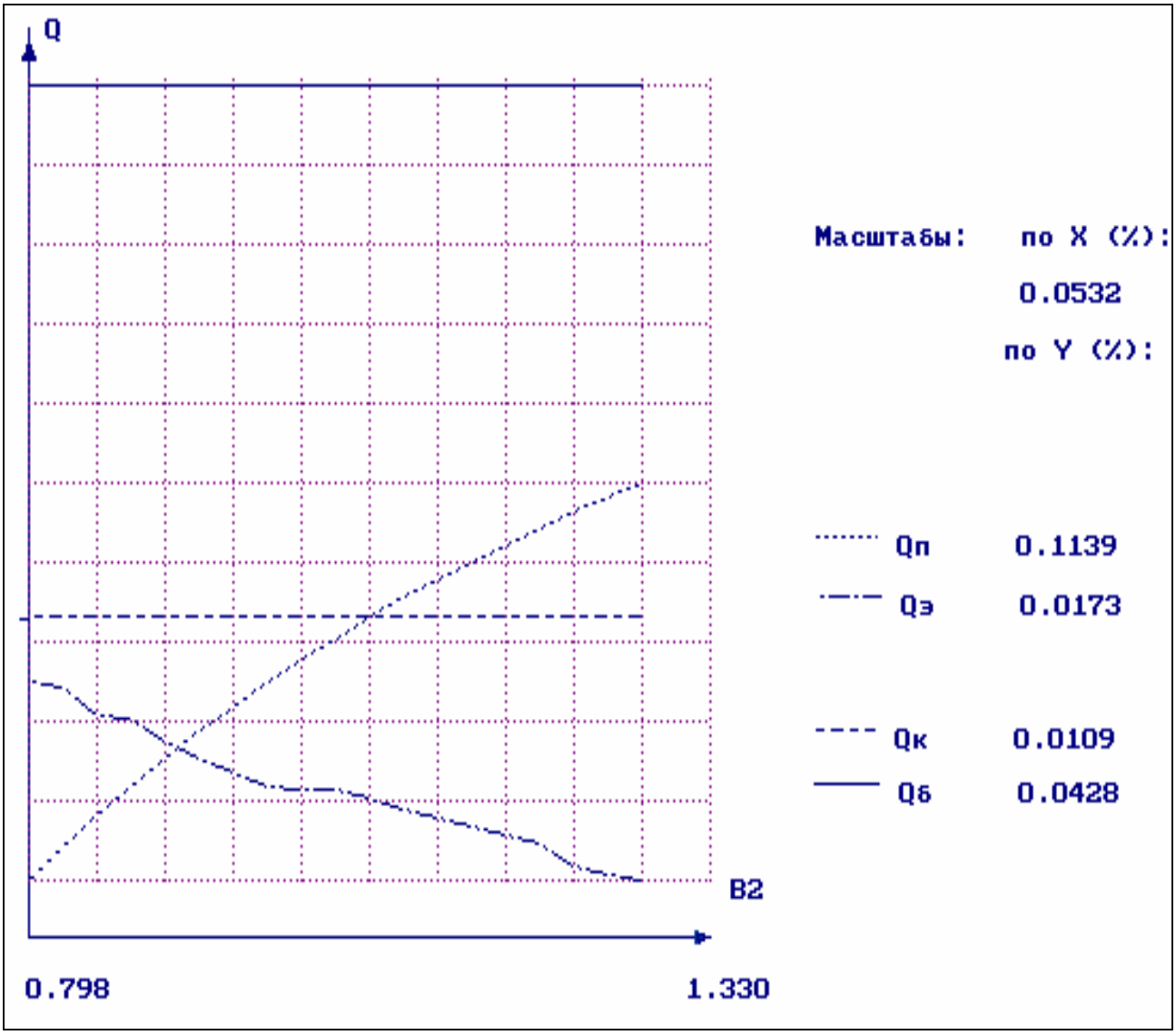


Рисунок 3.9 – Изменение расходных коэффициентов по электроэнергии($Q_Э$), пару ($Q_П$), и сырью ($Q_К$, $Q_Б$) с изменением управляемого параметра B_2 в диапазоне 0.18 – 0.3

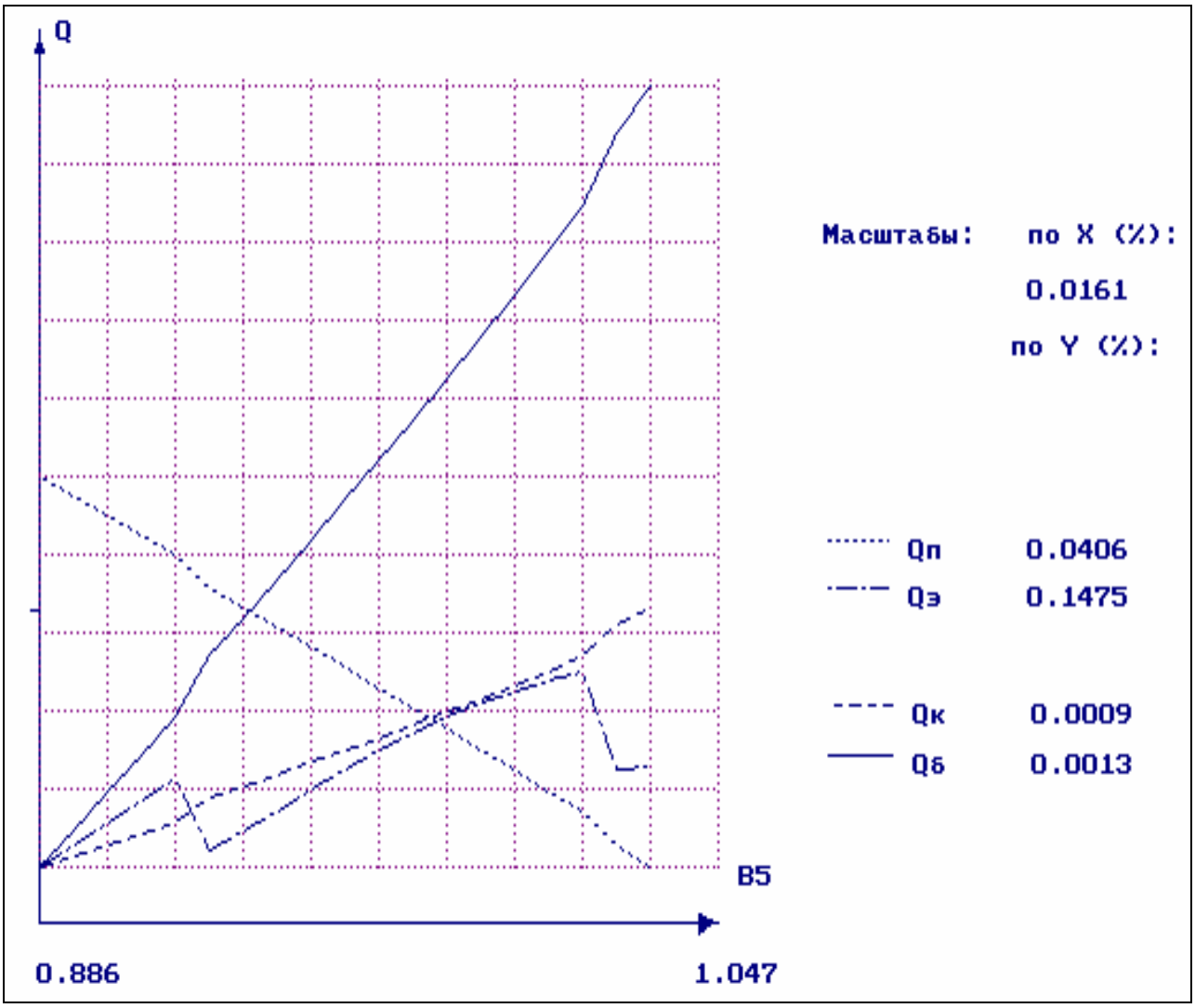


Рисунок 3.10 – Изменение расходных коэффициентов по электроэнергии($Q_Э$), пару ($Q_П$), и сырью ($Q_К$, $Q_Б$) с изменением управляемого параметра B_5 в диапазоне 0.11 – 0.13

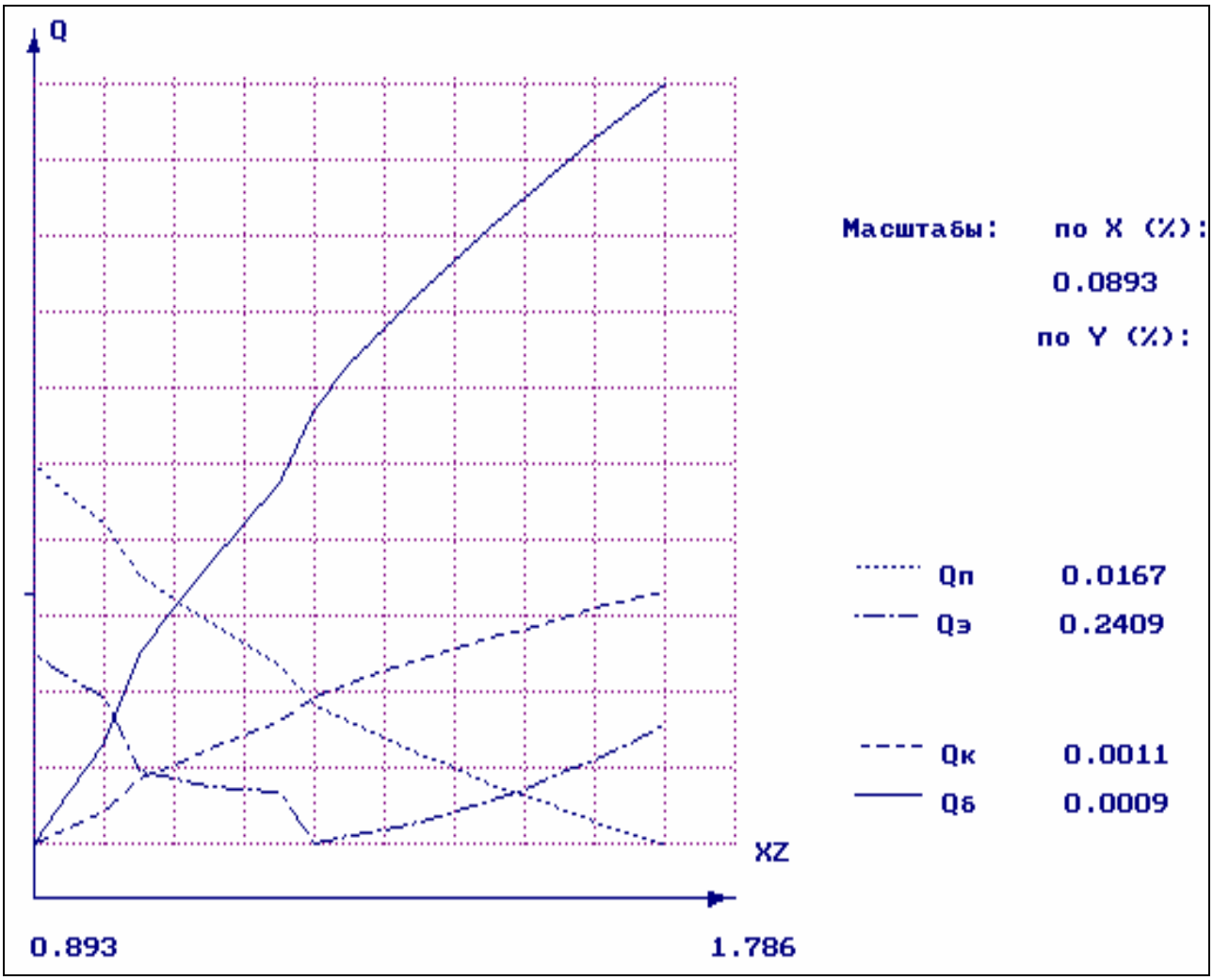


Рисунок 3.11– Изменение расходных коэффициентов по электроэнергии($Q_Э$), пару ($Q_П$), и сырью ($Q_К$, $Q_Б$) с изменением управляемого параметра XZ в диапазоне 1–2

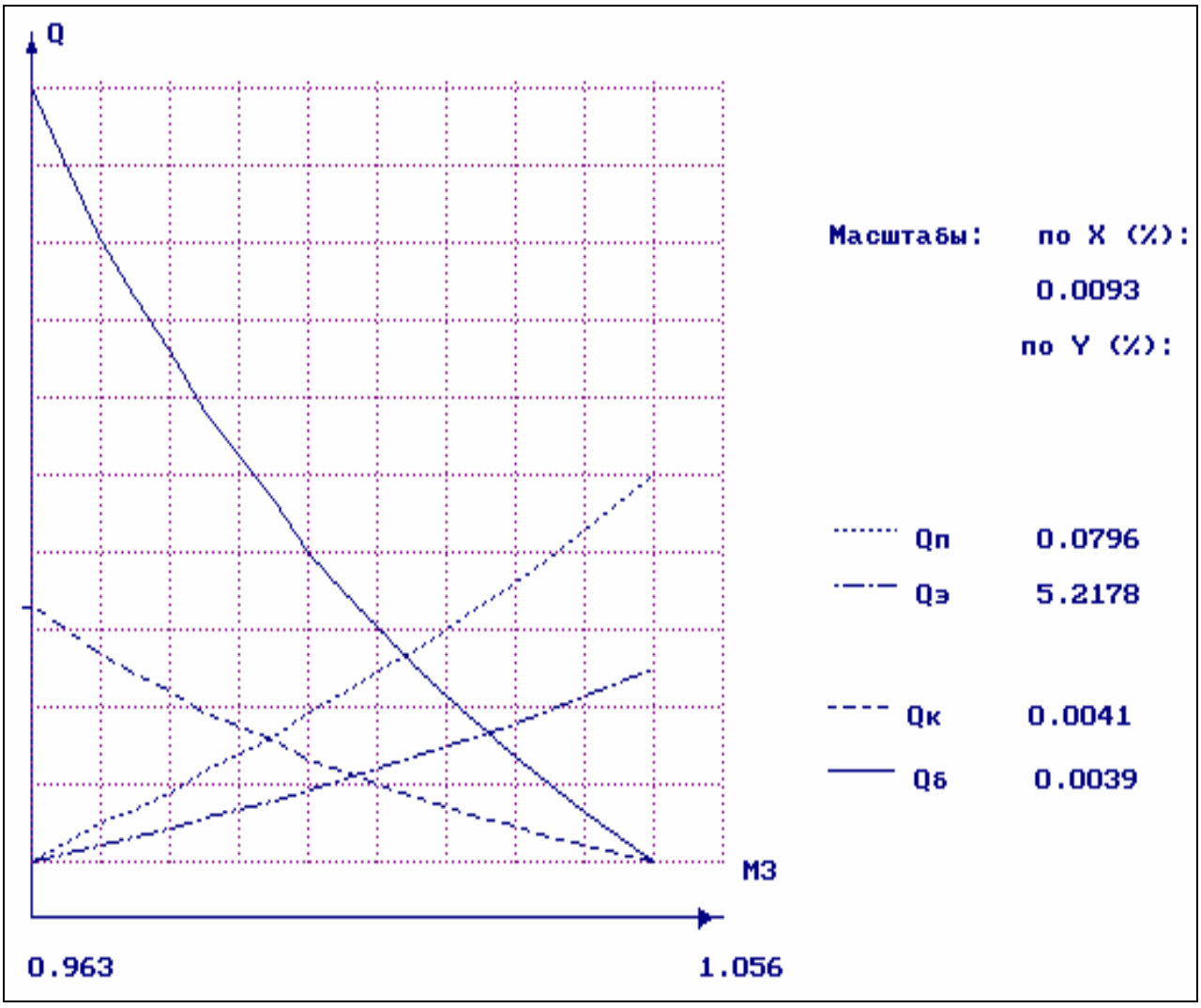


Рисунок 3.12 – Изменение расходных коэффициентов по электроэнергии ($Q_Э$), пару ($Q_П$), и сырью ($Q_К$, $Q_Б$) с изменением управляемого параметра M_3 в диапазоне 1.55 – 1.7

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- в целом, все зависимости носят нелинейный характер;
- по параметрам B_5 и XZ в диапазоне их изменения наблюдается глобальный минимум, но присутствуют и локальные минимумы (рисунки 3.10, 3.11);
- по параметру B_2 снижение затрат по электроэнергии приводит к увеличению расхода пара (рисунок 3.9);
- по параметру M_3 снижение затрат по электроэнергии и пару приводит к увеличению расхода сырья (рисунок 3.12).

При построении критерия оптимальности для упрощения задачи решено было перейти к задаче однокритериального характера, сведя все критерии к единому, на основе себестоимости единицы готовой продукции. Этот критерий должен был минимизировать затраты на производство одной тонны готовой продукции при минимизации расхода электроэнергии, пара и сырья. При этом необходимо учитывать и существующий на момент решения оптимизационной задачи уровень цен, чтобы была возможность выбора между противоречивыми тенденциями, например, при поиске оптимума по параметру B_2 (рисунок 3.9.), когда минимизация расхода электроэнергии влечет за собой увеличение расхода пара. Аналогичные противоречия только уже по расходу сырья можно наблюдать при анализе зависимостей, изображенных на рисунках 3.10 – 3.12.

Для решения этой задачи сначала был проанализирован рынок цен на используемые энергоресурсы и сырье (электроэнергия, пар, боксит и каустическая сода). В таблице 3.2 приведен диапазон возможных изменений цен. Далее анализом производственной деятельности предприятия определён возможный диапазон варьирования параметров **X**, таким образом, определены ограничения оптимизационной задачи. Значения $\mathbf{X_{min}}$ и $\mathbf{X_{max}}$ даны в таблице 3.3, равно как и их средние значения.

Таблица 3.2 – Диапазоны возможных изменений цен на сырье и электроэнергию

Боксит	Пар	Каустическая сода	Электр. энергия
100-800 $/Т	80-100 $/Т	550-1000 $/Т	0.04-0.1 $/ кВт·ч

Таблица 3.3 – Возможные диапазоны варьирования управляемых параметров

Режимный параметр	Xmin	Xmax	Xcp
X1(B2)	0.18	0.24	0.20
X2(M3)	1.45	1.75	1.6
X3(B5)	0.11	0.14	0.125
X4(XZ)	1.1	3.7	2.4

При формировании единого критерия учитывалось:

1) электропотребление: $$W = K_э \cdot \sum_{i=1}^{16} K_{iэ} \cdot F_i \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

где Кіэ – удельные затраты электроэнергии на преобразование-перемещение і-го материального в производстве (кВт.ч/ед.изм.F), Кэ поправочный коэффициент, отражающий долю не учтенных затрат электроэнергии;

2) расход пара: $$Q_n = K_{вып} F_{12} \rightarrow \min, \quad (3.6)$$

где Квып – коэффициент расхода пара на 1м3 упаренной воды (Гкал/м3).

Многокритериальная оптимизационная задача сведена к однокритериальной посредством выражения себестоимости одной тонны готового продукта:

$$S = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Q}(\mathbf{X}) / F_{10} \rightarrow \min, \quad (3.7)$$

где $\mathbf{C}$ – вектор-строка цен на электроэнергию, пар и сырье, которые в современных условиях характеризуются нестабильностью, $\mathbf{Q}(\mathbf{X})$ – вектор-столбец, элементы которого содержат расходы электроэнергии, пара и сырья:

$$Q(\mathbf{X}) = (K1 \cdot W(\mathbf{X}),\ K2 \cdot F_{12}(\mathbf{X}),\ K3 \cdot F_{1}(\mathbf{X}),\ K4 \cdot F_{13}(\mathbf{X})), \qquad (3.8)$$

(F1 и F13 – расход сырья) при значении режимных параметров, определяемых вектором $\mathbf{X}$, F_{10} – объем готового продукта, К1, К2, К3 и К4 – коэффициенты, определяющие долю неучтенных затрат.

Таким образом, полученный критерий описывается одним аналитическим выражением, учитывает требуемые расходы и цены на энергию и сырье, следовательно, может быть использован в качестве единого критерия в данной многокритериальной задаче.

3.4 Применение генетического алгоритма для решения многопараметрической оптимизационной задачи поиска энергоэффективного режима производства

Очевидно, что для рассматриваемой 4-х параметрической оптимизационной задачи (3.7) невозможно привести аналитическое описание целевой функции и определить ее свойства, так как **Q(X)** определяются с помощью статической модели всего производства при значении режимных параметров, определяемых вектором $\mathbf{X}$. 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 выполнен анализ методов искусственного интеллекта, нацеленных на решение оптимизационных задач.

Построение искусственной нейронной сети для решения поставленной оптимизационной задачи было признано нецелесообразным ввиду невозможности

накопления необходимой статистики [64] для обучения создаваемого искусственного интеллекта. Из методов эволюционного характера был выбран классический генетический алгоритм ввиду его простоты. Этот алгоритм прекрасно зарекомендовал себя при решении подобных задач.

Так как генетический алгоритм работает не с параметрами задачи, а с закодированным множеством параметров, то первоначально при его применении должна быть решена задача кодирования всех параметров задачи, то есть отображения области решений на генетический код. Кодирование элементов популяции выполнялось в двоичном коде для всей области допустимых значений по 4-м управляемым параметрам. Каждый параметр кодировался 5 двоичными символами в пределах значений от «00000» до «11111». При этом на этот код отражались значения параметров, составляющие область допустимых значений:

- B_5 от 0.111 до 0.1265 с шагом 0.0005;
- M_3 от 1.60 до 1.755 с шагом 0.005;
- B_2 от 0.18 до 0.242 с шагом 0.002;
- XZ от 1.1 до 2.182 с шагом 0.035.

Создание 4-х начальных популяций «родительских» хромосом было выполнено с помощью случайного выбора (способом, называемым «дробовик») из всей области решений рассматриваемой задачи. На рисунке 3.13 крайней левой колонкой маркеров в виде красных квадратиков для параметра B_5 и синих треугольников для параметра M_3 представлен случайный выбор начальных популяций на области решений 0.111–0.1265 и 1.6 –1.755 соответственно.

В пояснение к рисунку 3.13:

- значению параметра B_5, изображаемому самым нижним квадратиком в левой колонке, равному 0.1115, соответствует хромосома «00001», а равному 0.126 (самый верхний квадратик) – хромосома «11110»;
- значению параметра M_3, изображаемому самым нижним треугольником в левой колонке, равному 1.6, соответствует хромосома «00000», а равному 1.745 (самый верхний треугольник) – хромосома «11101».

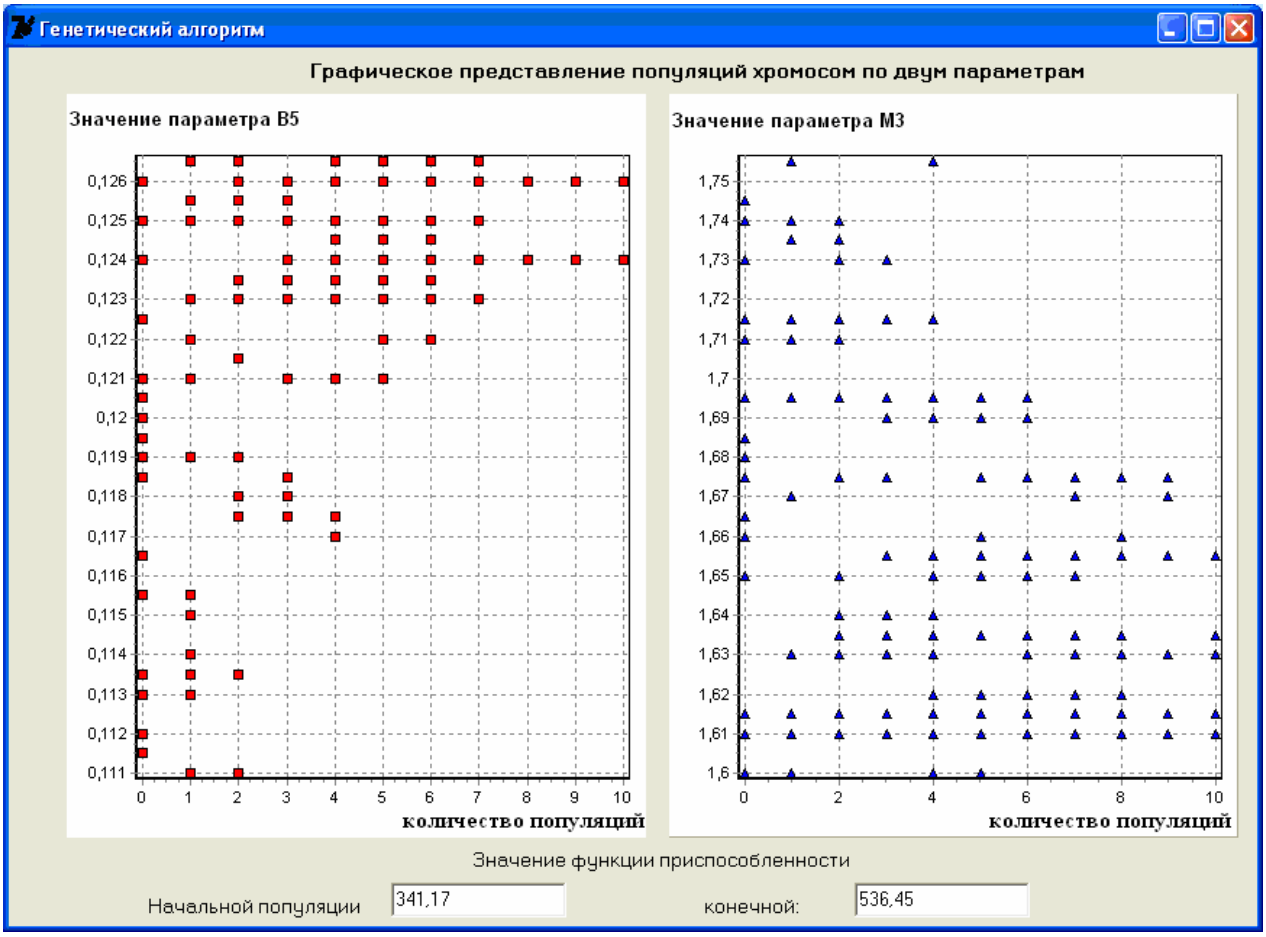


Рисунок 3.13 – Графическое представление изменения популяций хромосом по двум параметрам производства в ходе решения оптимизационной задачи

Следующим шагом генетического алгоритма является оценивание каждой хромосомы популяции с помощью функции приспособленности. Чем больше значение этой функции для выбранной особи, тем выше её качество. Функция приспособленности зависит от решаемой задачи, поэтому она была разработана на основе критерия (3.2).

При этом были учтены основные требования, предъявляемые к функции приспособленности, описанные в литературе [97]:

– функция должна принимать неотрицательные значения;

– функция должна стремиться к максимуму.

Выражение (3.7) всегда принимает неотрицательные значения. Таким образом, условие пункта 1 выполнено автоматически при разработке критерия S.

Преобразование данной функции сведением задачи минимизации к задаче максимизации (пункт 2) не вызвало особых трудностей, и незначительно измененный критерий S был взят в качестве функции приспособленности, но оказалось, что эта функция не обеспечивает селекционный отбор хромосом, формирующих оптимальное решение задачи.

В ходе анализа примеров решений задач, описанных в литературе, и многочисленных вариаций формы функции приспособленности сформулировано еще одно условие, третье, а именно: функция приспособленности должна принимать значения, значительно отличающиеся относительно значений для соседних хромосом (ch – обозначение хромосомы), чтобы обеспечить возможность выбора. В результате эта функция для решаемой оптимизационной задачи приобрела вид:

$$G(ch) = MAX(S) - \mathbf{C} \cdot \mathbf{Q}(\mathbf{X}) / F_{10} \rightarrow \max , \qquad (3.9)$$

где MAX(S) – максимально возможное для данной задачи значение выражения (3.7). На рисунке 3.13 среднее значение функции приспособленности для начальной популяции хромосом равно 341.17, а для 10-ой популяции – 536.45, то есть значение выросло, значит, в 10-й популяции содержатся более приспособленные особи.

Следующим этапом генетического алгоритма является селекция хромосом для следующей популяции. Селекция производится аналогично принципу естественного отбора, по которому наибольшие шансы на создание потомков имеют особи с наивысшей приспособленностью. В работе каждой особи вычислялась вероятность $Ps(ch_i)$, равная отношению ее функции приспособленности к суммарной приспособленности всей популяции [97,98]:

$$P_s(ch_i) = \frac{G(ch_i)}{\sum_{i=1}^{N} G(ch_i)}. \qquad (3.10)$$

Затем выполнялся отбор 20 особей (с замещением) для дальнейшей генетической обработки, согласно величине $Ps(ch_i)$ на основе простейшего пропорционального отбора – «рулетка». На рисунке 3.14 представлена схема пропорционального отбора из 8-ми хромосом. При таком отборе каждой особе сопоставляется сектор круга (по аналогии колеса рулетки), величина которого устанавливается пропорционально значению функции приспособленности данной хромосомы. Весь круг соответствует сумме значений $Ps(ch_i)$ всех хромосом популяции. При переходе к процентному представлению – от 0 до 100%.

Чем выше значение функции приспособленности данной хромосомы, тем больший по величине сектор круга будет ей принадлежать, и тем вероятнее, что данная особь будет выбрана для формирования следующей популяции. Так, например, 4-ой хромосоме(ch_4) соответствует сектор равный 19,51%, а 7-ой хромосоме (ch_7) – сектор равный 2.1% (рисунок 3.14).

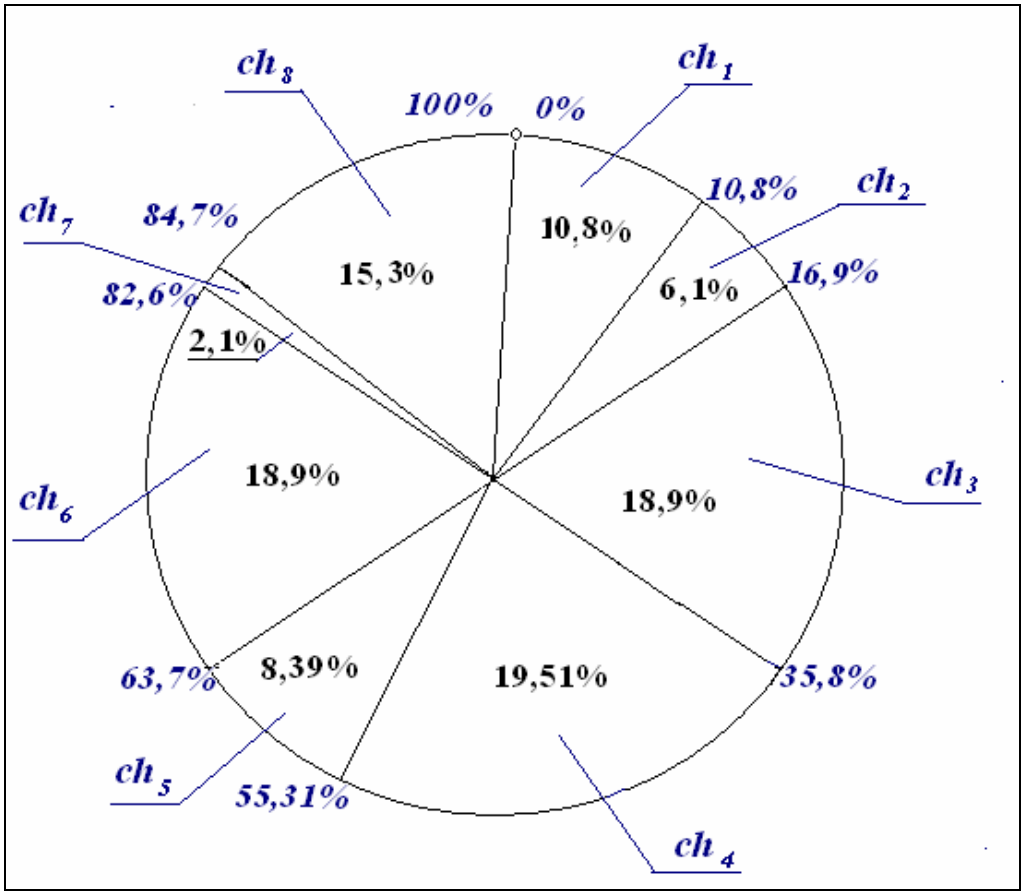


Рисунок 3.14 – Графическое представление метода пропорционального отбора, «рулетки» для восьми хромосом

Выбор происходит на основании получения случайного числа в диапазоне от 0 до 100, которое и определяет, к какому сектору оно относится. Так, например, если выпало число 53, то будет выбрана 4-ая хромосома, так как 35.8% <53%< 55.31% (рисунок 3.14). В результате случайного выбора N хромосом согласно пропорциональному отбору создается родительская популяция, называемая еще родительским пулом.

Для формирования популяции потомков в генетическом алгоритме применяются два оператора: «скрещивание» и «мутация». Основным оператором является оператор, который называется «скрещивание» (кроссовер), так как он отвечает за передачу признаков родителей потомкам. Оператор «мутация» играет второстепенную роль и выполняется во много раз реже, чем «скрещивание».

При решении данной оптимизационной задачи операция скрещивания выполнялась для всех особей каждой популяции. Пары для скрещивания выбирались случайно. Для каждой пары особей-родителей был реализован одноточечный кроссовер, причем, точки скрещивания также определялись случайно. Схема применяемого вида скрещивания изображена на рисунке 3.6.

В результате образовывалась пара особей-потомков. После скрещивания в полученной популяции потомков с вероятностью 0.01 выполнялась операция мутации. В случайно выбранной хромосоме, которая должна была подвергаться мутации, один из случайно выбранных битов изменялся на противоположный по значению.

В результате применения генетических операторов формируется популяция потомков, которая в данном случае заменяет популяцию родительских хромосом. Для полученных хромосом вычисляется функция приспособленности и происходит проверка условия останова генетического алгоритма.

В качестве условия останова использовалось сравнение среднего значения функции приспособленности родительской популяции и популяции потомков. Если абсолютная величина этой разности становилась меньше заданного значения или количество популяций превысило заранее заданное число, то происходил выход из генетического цикла с выбором из конечной популяции хромосомы с

наивысшим значением функции приспособленности. На рисунке 3.15 представлено преобразование популяций хромосом по двум параметрам до предельного количества поколений равного 28.

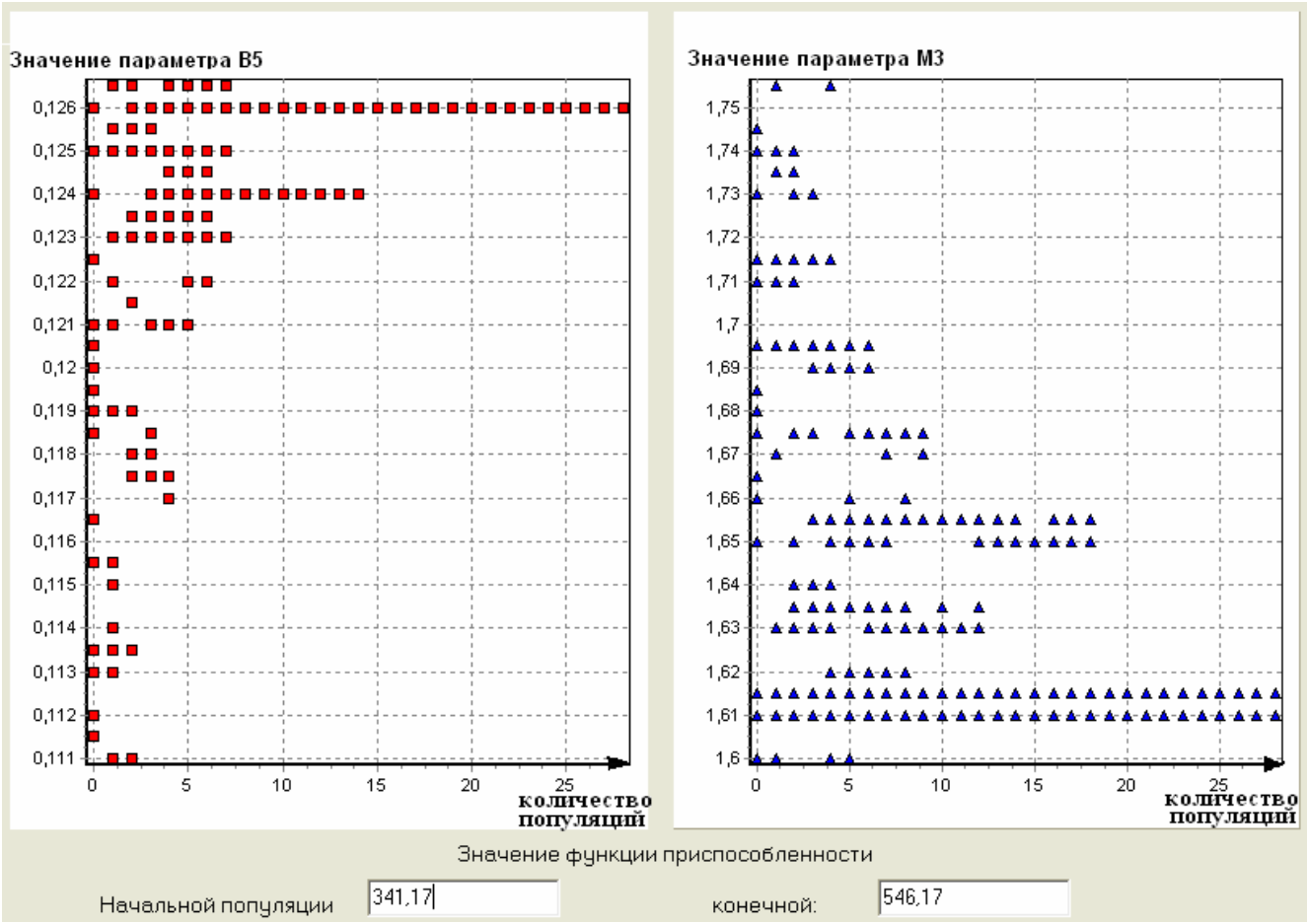


Рисунок 3.15 – Графическое представление поколений хромосом в ходе решения задачи при условии окончания генетического алгоритма с помощью ограничения количества поколений равного 28-ми

На рисунке видно, что хромосомы от поколения к поколению перерождаются к одному коду, и уже после 18-го поколения в популяции остаются хромосомы, имеющие либо один код, как в случае с хромосомой, отвечающей за параметр B_5, либо мало отличающиеся по величине, как в случае с хромосомой, отвечающей за параметр M_3. Иными словами, из первоначально отобранной популяции особей-решений от популяции к популяции выживают особи, приближающиеся к оптимальному решению: B_5=0.126, M_3=1.61. По

окончании процесса среднее значение функции приспособленности популяции выросло с 341.17 до 546.17.

Завершающий этап решения оптимизационной задачи с помощью генетического алгоритма – выполнение обратного отображения двоичного кода полученных хромосом на пространство параметров решаемой задачи и затем, вычисление электропотребления и расхода пара и других выходных параметров производства.

Для реализации данного алгоритма была разработана и отлажена программа, интерфейс вывода результата решения которой представлен на рисунке 3.16.

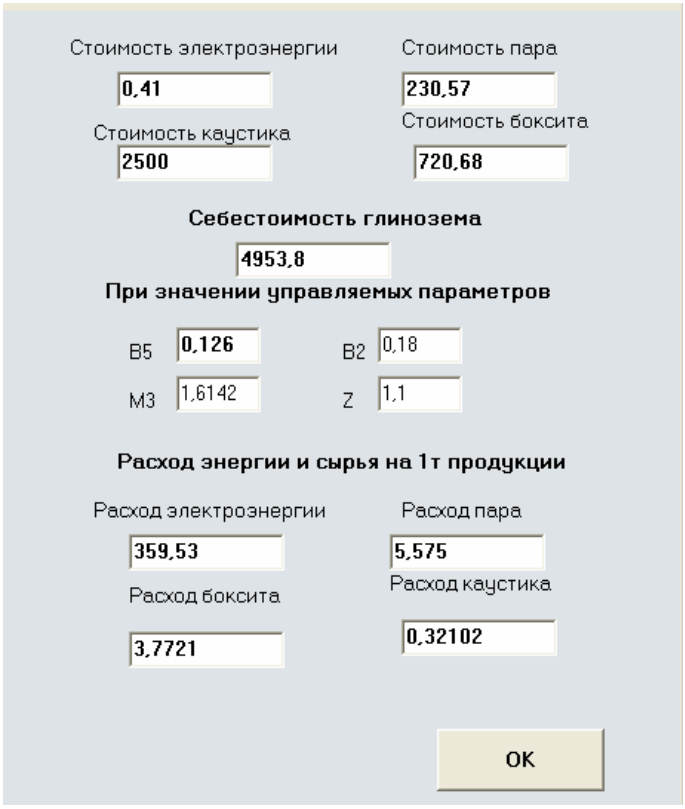


Рисунок 3.16 – Интерфейс вывода результата решения оптимизационной задачи

При сравнении значений расхода электроэнергии и пара на 1т готового продукта при поддержании режимных параметров на среднем допустимом уровне расход электроэнергии составляет 500КВт·час, пара 9.4 т. Следовательно, по электроэнерии экономия – 59.53 КВт·час, а по пару – 3.8т, то есть на 7% и 11% соответственно.

3.5 Структура оптимального энергоэффективного управления рассматриваемым типом производства

В настоящее время в ряд задач оперативного управления любым предприятием [64 – 69] входит в первую очередь задача минимизации себестоимости продукции при выполнении условий повышения энергоэффективности [1 – 3] производства. Для глиноземного производства эта задача решается путем корректировки концентрационных режимов технологических участков. Следовательно, механизм управления данным производством должен базироваться на оперативном поиске таких концентрационных режимов, которые обеспечат достижение выше означенных целей. Для решения этой задачи предлагается модель оптимального оперативного энергоэффективного управления, структура которой представлена на рисунке 3.17.

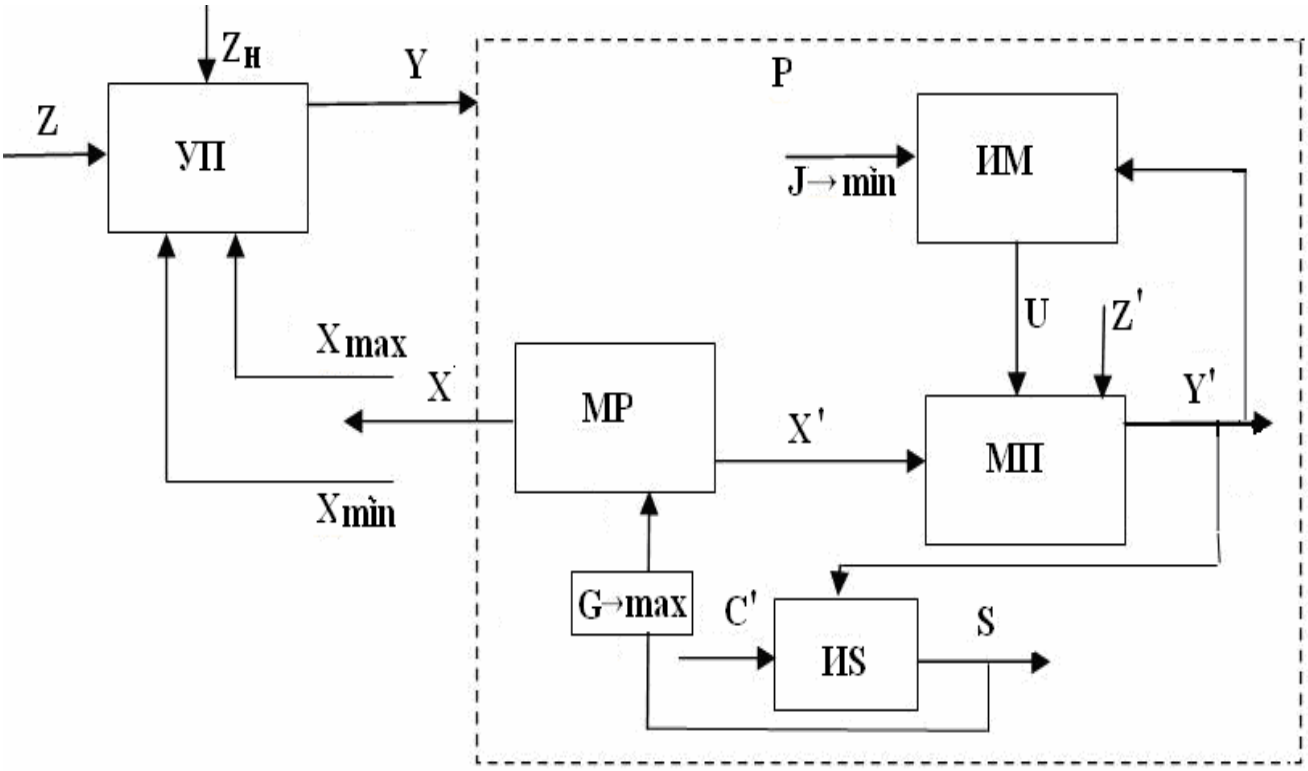


Рисунок 3.17 – Структура модели оперативного оптимального управления производством

На данном рисунке блоком **УП** обозначено собственно управляемое производство, **X** – вектор режимных параметров, **Xmin, Xmax** – допустимый диапазон его изменения, **Z** –контролируемые, $\mathbf{Z_H}$ – неконтролируемые внешние воздействия, **Y** – вектор выходных параметров производства, **Q** – вектор расходных коэффициентов, **P** – регулятор (на рисунке он выделен пунктирной линией), **МП** – модель производства, имитирующая основные технологические преобразования, **X'**, **Z'** – оценочные значения параметров производства и контролируемых внешних воздействий соответственно, **Y'**, **Q'** – вектора выходных параметров и расходных коэффициентов соответственно, вычисляемые с помощью модели, **ИМ** – блок идентификации модели, **J** – критерий идентификации, **U** – вектор идентификационных коэффициентов модели, **ИS** – блок расчета критерия, **C'** – вектор оценочных значений цен, S – значение целевой функции, **МР** – блок поиска оптимальных параметров производства на основе генетического алгоритма, **G→max** – функция приспособленности хромосом, являющихся отображением управляемых параметров **X**.

Регулятор **P** включает в себя четыре блока **МП, ИМ, ИS** и **МР**. **МП** (модель производства) – соотношения, моделирующие стационарные связи между задаваемыми известными значениями оценок **X'** и **Z'** входных величин **X** и **Z** и расчетными значениями **Y'** и **Q'** выходных величин **Y** и **Q**, **U** – идентифицируемые значения параметров модели **МП**. Идентификация модели (блок **ИМ**) выполняется на основе получаемых оценок выходных параметров производства **Y'**, вычисляемых блоком **МП**. Точность идентифицированной модели оценивается квадратичной величиной **J** (**J→min** – критерий решения оптимизационной задачи идентификации модели

Критерий **S** вычисляется в блоке **ИS** с использованием прогноза цен **C**. В блоке **МР** (модель регулятора) путем решения задачи многомерной оптимизации с использованием генетического алгоритма получаются оптимальные значения **Хопт** режимных параметров **X**, соответствующие минимуму энергопотребления и себестоимости готовой продукции.

Принципиальная структура преобразования режимных параметров **X** в себестоимость S с применением математической модели производства (**МП**) показана на рисунке 3.17. На входе блока **МП** – режимные параметры **X** производства и внешние возмущающие факторы **Z**, его выход – расходные коэффициенты **Q**. Последние, проходя через блок **ИS**, преобразуются в себестоимость S с учетом цен **C** на сырье. На рисунке 3.18 векторы **X, Z, Q, C** раскрыты, также введены условные обозначения их составляющих:

$$\mathbf{Q} = \text{М П}(\mathbf{X, Z, U}) \tag{3.11}$$

здесь **U** – идентифицируемые параметры **МП**.

$$S = \text{CS}(\mathbf{Q, C}) \tag{3.12}$$

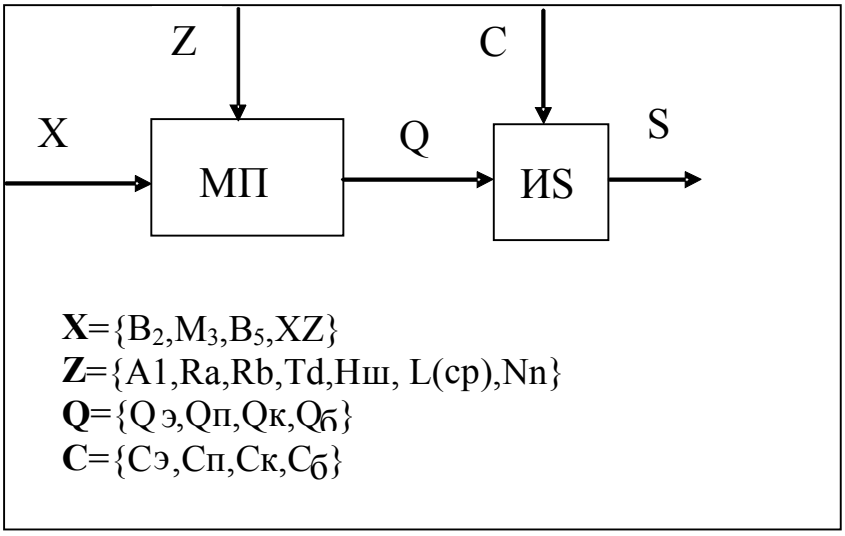


Рисунок 3.18 – Принципиальная структура преобразования режимных параметров **X** в себестоимость S

Исследовались три различных режима предприятия. Для каждого режима были определены оптимальные значения концентраций технологических участков. При этом вычислялось и потребление электроэнергии и пара. Анализ результатов решения оптимизационной задачи показал, что при применении предлагаемого алгоритма, который отыскивает наилучшие, с точки зрения

себестоимости готовой продукции, значения концентрационных режимов производства, уменьшается и его энергопотребление, то есть повышается энергоэффективность.

Для исследуемых реальных режимов при решении оптимизационной задачи были найдены режимные параметры, при которых уменьшены затраты по электроэнергии на 7% и пара на 11% по сравнению с режимом, когда эти параметры поддерживаются на уровне их среднего допустимого значения. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый инструментарий можно отнести к техническим решениям по улучшению энергоэффективности рассматриваемого производства.

Результатом работы этой модели являются оптимальные, с точки зрения энергоэффективности, значения объемов потоков веществ технологических переделов производства, на основании которых формируются управляющие воздействия на электротехнологическое оборудование.

3.6 Выводы

1. В ряд задач оперативного управления рассматриваемым производством в первую очередь входит задача минимизации себестоимости продукции при повышении его энергоэффективности. В настоящее время рынок предлагает большой спектр энергоресурсов и сырья различной стоимости и качественного состава. Следовательно, постоянно возникает проблема выбора и, как следствие, поиска оптимальных концентрационных режимов.

2. Ввиду нелинейности рассматриваемого производства, поиск энергоэффективного режима его функционирования может быть выполнен с помощью решения оптимизационной задачи управления технологическим процессом [144–150] на основе моделирования последнего.

3. Целевая функция для оптимизационной задачи управления производством должна строиться на основе его управляемых технологических

параметров, чтобы в результате решения получить оптимальные значения этих величин.

4. Целевая функция данной задачи оптимизации не имеет аналитического вида, а исследования ее составляющих показывают на наличие локальных экстремумов, что серьезно затрудняет применение классических методов поиска и нацеливает на применение зарекомендовавших себя в последнее время методов искусственного интеллекта.

5. Анализ бионических методов искусственного интеллекта позволил остановить выбор на генетическом алгоритме, который позволяет отказаться от математического исследования целевой функции, а процесс поиска оптимального решения приобретает характер последовательного преобразования информации одного нечеткого множества промежуточных решений в другое посредством функции «приспособленности».

6. Решение поставленной оптимизационной задачи управления рассматриваемым производством позволило найти технологический режим с меньшим энергопотреблением.

7. Предлагаемая модель оптимального управления разработана на основе ситуационного принципа управления с учетом нестабильности цен на сырье и энергоресурсы.

8. Базовые данные, требуемые для ситуационного анализа, рассчитываются на основе реальных цен с помощью математической модели производства, имитирующей основные технологические преобразования.

9. Разработанная модель может служить ядром специализированных программных пакетов, предназначенных для поиска оптимальной стратегии управления рассматриваемым производством в современных рыночных условиях.

4. Экспериментальное построение моделей удельного электрического сопротивления грунта для эффективной и безопасной эксплуатации электротехнических комплексов

4.1 Постановка задачи

Электротехнические комплексы предприятий предполагают использование устройств заземлений, с помощью которых обеспечивается эффективная и безопасная их эксплуатация. Эксплуатация энергоустановок представляет определенную опасность для жизни персонала, работающего с этими электроустановками. Для каждой энергоустановки регламентируется комплекс требований [74], позволяющий минимизировать вероятность поражения электрическим током.

Устройства заземления предназначены для обеспечения принятых режимов работы энергоустановок и защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током с помощью отвода в землю потенциала, который может появиться в случае аварийной работы на корпусе электрооборудования. Основным параметром заземления является его сопротивление. Сопротивление заземления зависит от удельного электрического сопротивления грунта, в котором это заземление организовано. Само удельное электрическое сопротивление – величина, зависящая от множества параметров таких как: 1) вид грунта, 2) его влажность, 3) температура, 4) засоленность, 5) плотность.

Опираясь на приведенные в литературе [80] модели удельного электрического сопротивления от влажности для некоторых грунтов (песок, суглинок, щебень), ρ задается в виде предельных значений для характеристик влажности типа «сильно увлажненный», «влажный», «сухой» и т. п.

В данной работе поставлена цель: разработать методику построения модели для нахождения зависимости ρ от перечисленных выше параметров, пригодную

для любого типа грунта. Эту разработку решено было проводить с применением теории нечетких множеств [95 – 105] и метода Такаги-Сугено [151,152].

1. Поэтому, для более точного определения основного параметра заземления, сопротивления, согласно анализу, выполненному в разделе 1.3, необходимо построить модель удельного электрического сопротивления ρ грунта в зависимости от влажности, температуры, засоленности и плотности.

2. Для построения моделей ρ провести эксперименты по определению удельного электрического сопротивления при различной влажности и температуре для наиболее распространенных видов грунта встречающихся при установке заземляющих устройств (песок, супесь, суглинок, глина).

3. Для проведения экспериментов определения изменения удельного электрического сопротивления ряда грунтов от влажности ν и температуры t построить лабораторную установку и провести эксперименты в пределах значений ν и t, существующих в средних широтах.

4. Для определения зависимости ρ от степени засоленности грунтов провести эксперименты с изменением уровня засоленности влаги в грунтах различного вида.

5. Для определения зависимостей ρ от плотности построить установку и провести эксперименты для наиболее распространенных видов грунта (песок, супесь, суглинок, глина) при различной влажности и уплотненности от состояния разрыхления до плотности естественного залегания.

6. Так как задача определения удельного сопротивления грунта является многопараметрической, довольно сложной в дискретной постановке и относится к классу трудно-формализуемых (а именно: ρ зависит от влажности, температуры, плотности и вида грунта), к ней целесообразно подходить с использованием одного из методов искусственного интеллекта – мягких вычислений, – основанного на теории нечетких множеств и позволяющего решать задачи с нечеткими исходными данными [95 –105].

4.2 Нечеткие линейные модели

Модели Такаги-Сугено [151 –152] имеют еще название квазилинейных моделей и нечетких линейных моделей. От моделей Мамдани модели Такаги-Сугено отличаются формой правил.

Так в случае модели Мамдани, описывающей систему с одним входом и одним выходом, правила имеют вид:

$$\text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A) \text{ ТО } (y \text{ есть } B), \tag{4.1}$$

(где A и B – нечеткие множества типа «расход малый» или «давление высокое», то и случае моделей Такаги-Сугено правила имеют вид:

$$\text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A) \text{ ТО } (y = f(x)). \tag{4.2}$$

Вместо нечеткого множества заключение каждого правила содержит функцию $f(x)$, которая в общем случае может быть нелинейной, хотя обычно используются линейные функции. Таким образом, правила модели Такаги-Сугено имеют вид

$$\text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A) \text{ ТО } (y = ax + b)). \tag{4.3}$$

Если имеется m интервалов значений x, то база правил записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} &R_1 : \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_1) \text{ ТО } (y = f_1(x)) \\ &R_2 : \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_2) \text{ ТО } (y = f_2(x)) \\ &\ldots \\ &R_m : \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_m) \text{ ТО } (y = f_m(x)) \end{aligned}.$$

В этом случае значение на выходе модели вычисляется на основе степеней активизации отдельных заключений $f_i(x), \quad i = 1,...m$ по формуле:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_{A_i}(x) \cdot f_i(x)}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{A_i}(x)} \tag{4.4}$$

отображения для рассматриваемой модели Такаги-Сугено.

Для пояснения можно рассмотреть пример модели с базой правил, имеющей три интервала и функциями принадлежности, представленными на рисунке 3.19 [152].

$$\begin{aligned} &R_1: \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_1) \text{ ТО } (y = -x + 3) \\ &R_2: \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_2) \text{ ТО } (y = (4x - 10)/3) \\ &R_3: \text{ЕСЛИ } (x \text{ есть } A_3) \text{ ТО } (y = (-x + 24)/3) \end{aligned} . \qquad (4.5)$$

Для записи функций принадлежности можно ввести следующие логические переменные:

$$w_1 = \begin{cases} 1 & \text{если } 0 \le x < 2 \\ 0 & \text{при других } x \end{cases} \qquad w_3 = \begin{cases} 1 & \text{если } 4 \le x < 7 \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$$

$$w_2 = \begin{cases} 1 & \text{если } 2 \le x < 4 \\ 0 & \text{при других } x \end{cases} \qquad w_4 = \begin{cases} 1 & \text{если } 7 \le x < 9 \\ 0 & \text{при других } x \end{cases} . \qquad (4.6)$$

$$w_5 = \begin{cases} 1 & \text{если } 9 \le x \le 12 \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$$

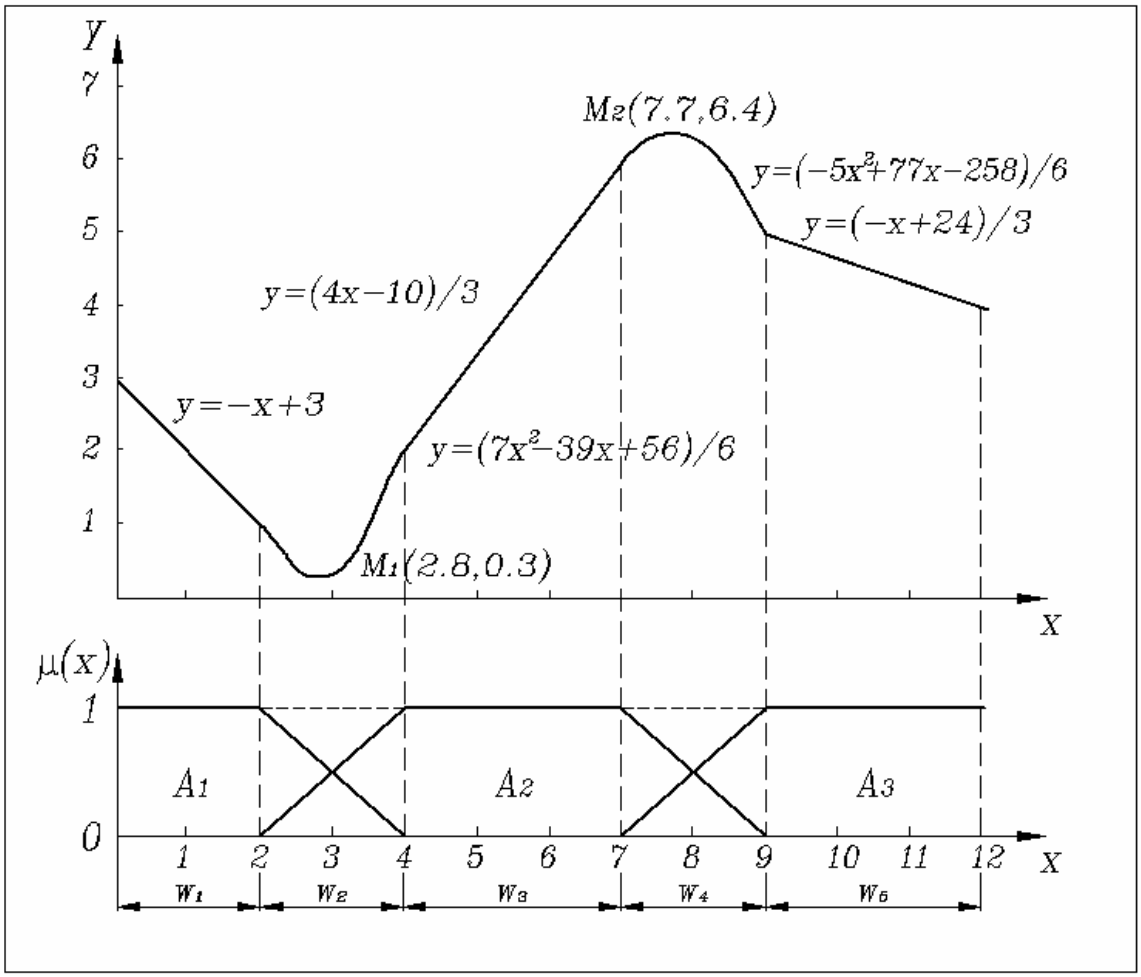


Рисунок 4.1 – Функции принадлежности входных параметров и получаемое с их помощью решение y(x)

В этом случае функции принадлежности можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned}\mu_{A1} &= w_1 - w_2 \cdot \frac{x-4}{2} \\ \mu_{A2} &= w_2 \cdot \frac{x-2}{2} + w_3 - w_4 \cdot \frac{x-9}{2} \\ \mu_{A3} &= w_4 \cdot \frac{x-7}{2} + w_5\end{aligned} \quad (4.7)$$

Данные функции принадлежности удовлетворяют условию:

$$\sum_{i=1}^{3} \mu_{Ai}(x) = 1. \quad (4.8)$$

Тогда значения на выходе модели определяются с помощью формулы:

$$y = \sum_{i=1}^{3} \mu_{Ai}(x) \cdot f_i(x) = w_1(3-x) + w_2 \cdot \frac{7x^2 - 39x + 56}{6} + \\ + w_3 \cdot \frac{4x - 10}{3} + w_4 \cdot \frac{-5x^2 + 77x - 258}{6} + w_5 \cdot \frac{24 - x}{3} \quad (4.9)$$

При анализе данного выражения нетрудно заметить, что поверхность модели в точности соответствует правилам (4.5) только в тех областях входного пространства, где $\mu_{Ai}(x) = 1$. Это области w_1, w_3 и w_5. В областях, где эти степени являются дробными (w_2 и w_4), функция модели переходит из одной линейной формы в другую (см. рисунок 4.1).

В рассматриваемом примере функции перехода имеют квадратичную форму. Следует отметить, что рассматриваемая функция (4.9) непрерывна и не имеет скачков на границах областей, но производная этой функции непрерывной не является. Она изменяется на границах областей скачкообразно, что происходит из-за кусочной линейности типа используемых функций принадлежности. Для обеспечения непрерывности производной поверхности модели и более гладкой результирующей функции можно применять иного вида функции принадлежности, например, гауссовы.

4.3 Построение концептуальной нечеткой модели удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от влажности

Для построения модели ρ была разработаны лабораторные установки (рисунок 4.1) и проведены многочисленные эксперименты при изменении влажности от 0% до состояния насыщения грунта водой первоначально при температуре $20\,^0$C (выбор данного значения объясняется необходимостью подстановки ρ_{20} в известную [80] формулу (1.4) для вычисления удельного электрического сопротивления при любой положительной температуре).

Установка, изображенная на рисунке 4.2а, изготовлена из органического стекла в виде лабиринта. Такое устройство объясняется необходимостью увеличения длины проводящего слоя. Электроды выполнены из медной пластины

размером 44х40 мм, длина проводящего слоя грунта – 1.65м, сечение слоя определяет площадь электродов. Общий объем размещаемого в установке грунта 0.003м^3. Использовались наиболее часто встречающиеся при организации устройств заземления виды грунта: песок, супесь, глина. Грунт с определенной влажностью *v* помещался в установку, которая подключалась к источнику переменного тока с частотой 50 Гц. Температура грунта измерялась тремя термометрами. Ввиду незначительной толщины грунта разность температур в нижнем и верхнем слоях грунта была менее 0.01 градуса. Погрешность измерительных приборов составляла не более ±2,0% по всем шкалам измерения.

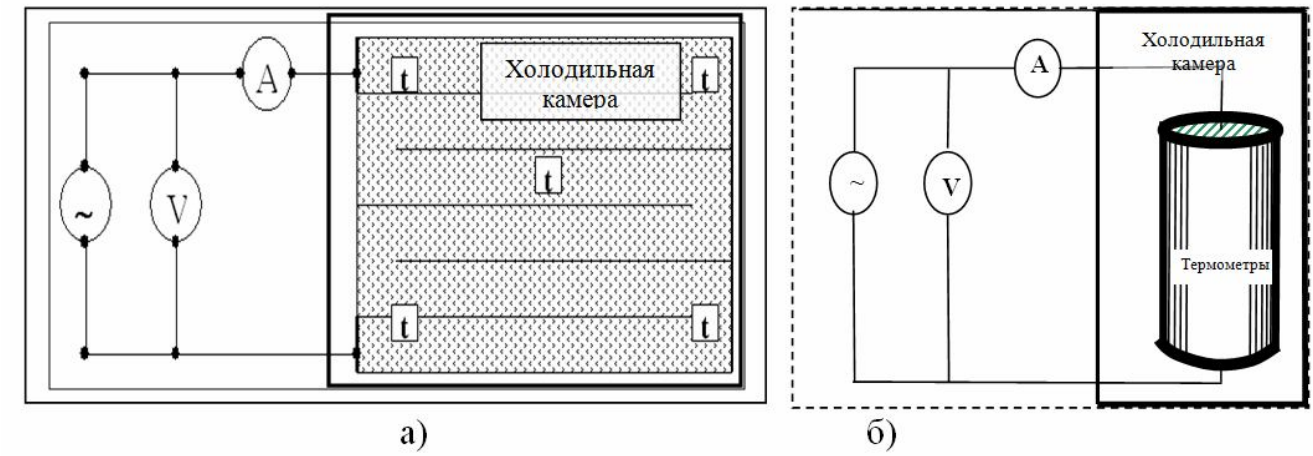


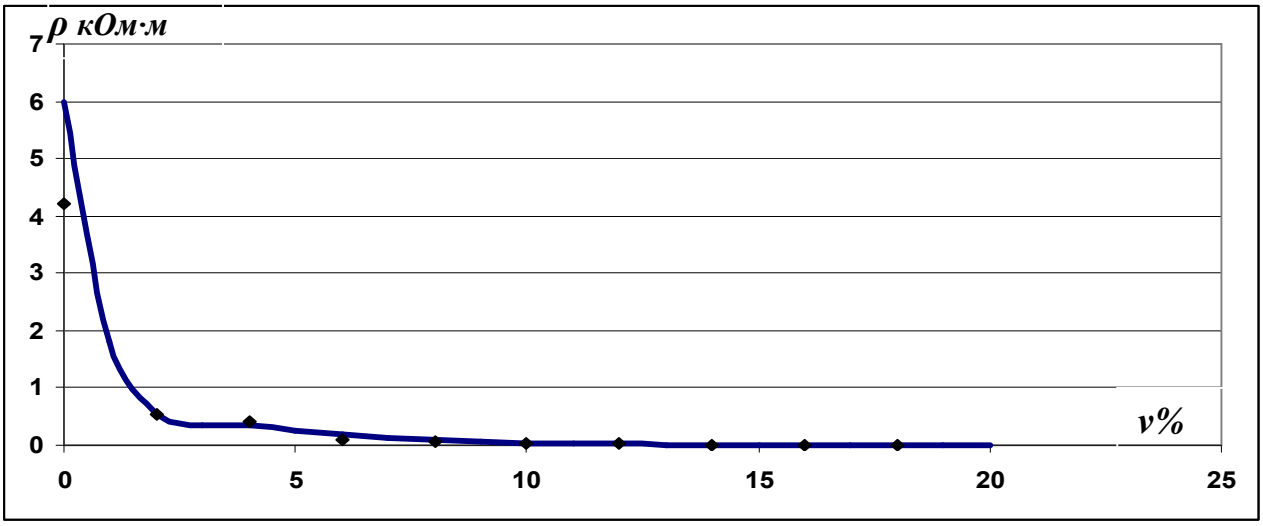
Рисунок 4.2 – Лабораторные установки для определения удельного электрического сопротивления (t – термометр) сыпучих грунтов – (а), грунтов, извлеченных в виде кернов – (б)

Пробы грунта брались в районе поймы реки Иртыш. Минерализация грунтовых вод в данном регионе приблизительно равна минерализации водопроводной воды, так как оба водозабора в Павлодаре установлены на этой реке, поэтому грунт увлажнялся водопроводной водой.

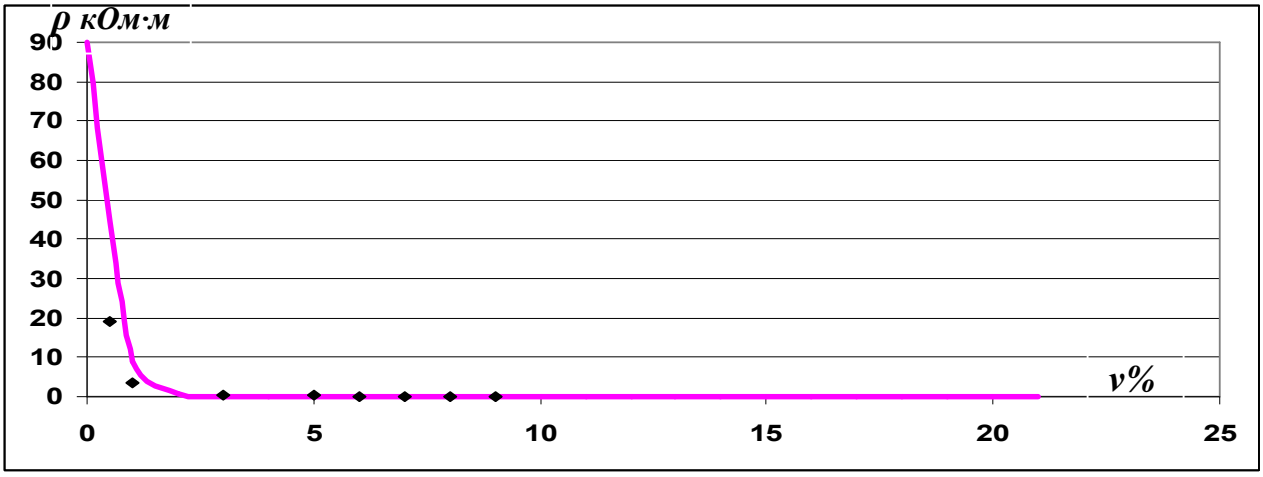
Измерения проводились при трех разных напряжениях U1<U2<U3, результаты которых затем усреднялись. При изготовлении установки и проведении измерений руководствовались методикой определения удельного

сопротивления грунта, изложенной в ГОСТ 9.602.89 «Единой системы защиты от коррозии и старения».

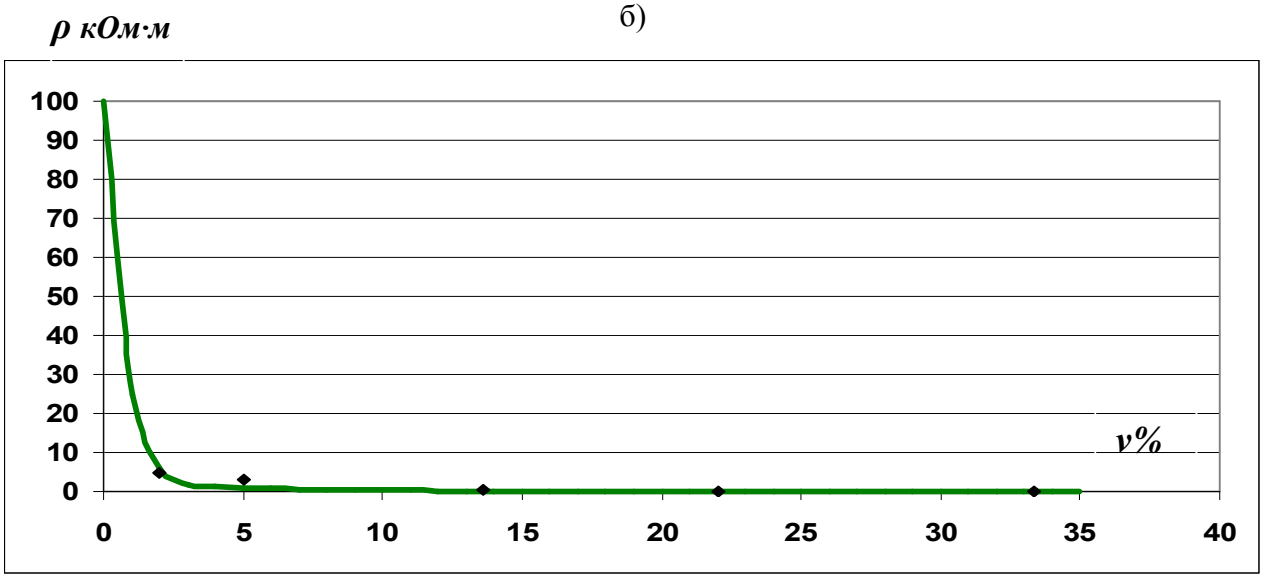
В результате экспериментов с тремя видами грунта было определено, что на интервале влажности от 0 до 2% для вида грунта «песок», от 0 до 5% для вида «супесь» и от 0 и 6% для вида «глина» характер изменения $\rho(\nu)$ резко отличается от характера изменения ρ на интервалах от 2, 5, 6% и до состояния насыщения влагой грунтов «песок», «супесь» и «глина» соответственно (рисунок 4.3).



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Графики изменения удельного электрического сопротивления а) песка, б) супеси, в) глины от влажности

Ввиду этого, построение модели $\rho(\nu)$ с опорой на методику, предложенную Такаги-Сугено [151,152], было решено выполнять на основе регрессионного моделирования для каждого такого интервала в отдельности, получая единую математическую зависимость с помощью инструментов нечеткой логики с использованием системы размытых правил. Для данной задачи нечетко были определены значения влажности, которая характеризовалась такими понятиями, как:

– «сухо» – с содержанием влаги примерно от 0 % до 2%,

– «влажно» – примерно от 6 % до состояния насыщения грунта влагой.

Для определения вида функций принадлежности к тому или иному интервалу влажности использовался «прямой метод», в котором для каждого $\nu \in E$ (ν – влажность грунта) задается значение $\mu_A(\nu)$ (функция принадлежности). Это правомерно, так как поскольку данный метод может быть применен для измеримых понятий, таких как давление, температура и т.д. В данном случае, «влажность», естественно, относится к измеримым понятиям.

Суть моделирования заключается в следующем. Для каждого вида грунта была разработана система «размытых» (нечетких) правил. Она записывалась следующим образом [104]

$$\begin{aligned} &\text{IF } (\nu_1 \in A_{1i}) \& (\nu_2 \in A_{2i}) \& \ldots \& (\nu_k \in A_{ki}) . \\ &\quad \text{THEN } y=\eta_i(\nu),\ i=1,\ldots,N \end{aligned} \qquad (4.10)$$

Здесь A_{ji} – нечеткое подмножество, в данном случае, нечеткий интервал, для переменной x_j, характеризующей влажность грунта, с функцией принадлежности $\mu_{Aji}(x)$, $\boldsymbol{N}$ – число интервалов (в общей постановке это число правил), $y = \eta_i(\nu)$ – функция, определяющая локальное решение модели от значений: $\nu = (\nu_1, \ldots, \nu_k)$.

В одномерном случае (для данной задачи это параметр грунта – влажность) система размытых правил (4.10) приобретает вид

$$\text{IF } (\nu \in A_1) \text{ THEN } y=\eta_i(\nu),\ i=1,\ldots,N. \qquad (4.11)$$

Здесь A_i имеют функцию принадлежности $\mu_{A_i}(\nu)$, имеющие экспоненциальную зависимость:

$$\mu_{A_1}(\nu) = e^{(-c\cdot(\nu-d)^2)} \quad \text{и} \quad \mu_{A_2}(\nu) = 1 - e^{(-c\cdot(\nu-d)^2)} \tag{4.12}$$

Здесь коэффициенты c и d определяют степень нечеткости и положение на оси параметра «влажность». Причем, сумма значений функций принадлежности равна 1 на всем интервале определения параметра

$$\mu_{i+1} = 1 - \mu_i . \tag{4.13}$$

Общее уравнение модели удельного сопротивления имеет следующий вид

$$\rho = \sum_{i=1}^{M} \eta_i(\nu) \cdot \mu_{Ai}(\nu) . \tag{4.14}$$

Построение модели было выполнено с помощью показательной функции, параметры которой определялись с помощью уравнений регрессии:

$$\eta_i(\nu) = b_0 \cdot b_1^{\nu} . \tag{4.15}$$

Вид функций принадлежности полученной модели проиллюстрированы рисунком 4.4, где ν – влажность. Сплошная линия отражает изменение функции принадлежности нечеткому интервалу, характеризующему значение «сухо», а штриховая линия – функции принадлежности нечеткому интервалу «влажно». Пределы значений интервалов влажности ν_1 («сухо») и ν_2 («влажно») определялись приблизительно, первый интервал – $0 \le \nu < 2\%$, второй интервал – $\nu \ge 6\%$, область переключения между интервалами – $2 \le \nu < 6\%$. Рисунок 4.4 иллюстрирует, что для данных функций принадлежности в области, где соседние μ_1 и μ_2 имеют ненулевые значения, всегда выполняется равенство: $\sum_{i=1}^{2} \mu_i = 1$. Выражения (4.16) [153 –156] определяют значения этих функций.

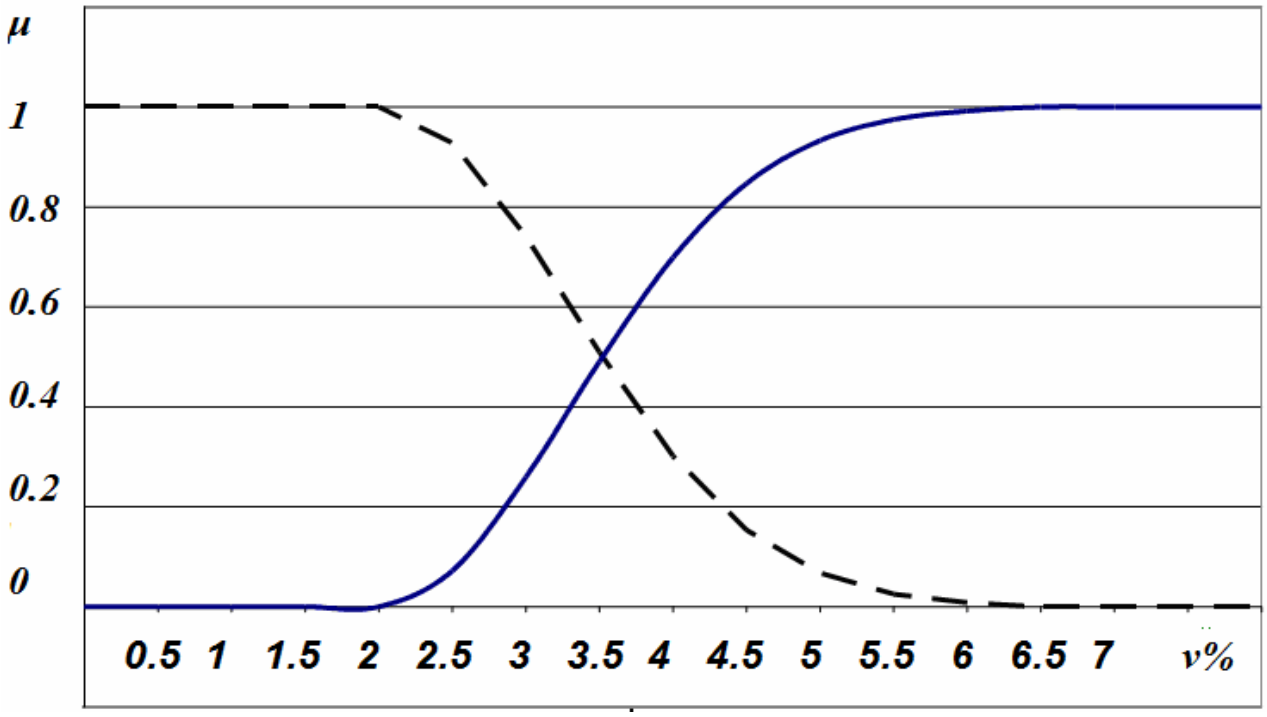


Рисунок 4.4 – Графики функций принадлежности для нечетких интервалов параметра грунта «влажность»

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \le \nu < 2 \\ e^{-0.8\cdot(\nu-2)^2}, & 2 \le \nu \le 6 \\ 0, & \nu > 6 \end{cases}, \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \le \nu < 2 \\ 1 - e^{-0.8\cdot(\nu-2)^2}, & 2 \le \nu \le 6. \\ 1, & \nu > 6 \end{cases} \tag{4.16}$$

В результате модель удельного сопротивления для видов грунта «песок» $\rho_п$, «супесь» $\rho_с$ и «глина» $\rho_{гл}$ может быть представлена следующими формулами [157 – 160]:

$$\begin{aligned} \rho_п &= 6 \cdot 0{,}3^{\nu} \cdot \mu_1(\nu) + 1 \cdot 0{,}7^{\nu} \cdot \mu_2(\nu), \\ \rho_с &= 90 \cdot 0{,}1^{\nu} \cdot \mu_1(\nu) + 0{,}3 \cdot 0{,}8^{\nu} \cdot \mu_2(\nu), \\ \rho_{гл} &= 100 \cdot 0{,}25^{\nu} \cdot \mu_1(\nu) + 3 \cdot 0{,}8^{\nu} \cdot \mu_2(\nu). \end{aligned} \tag{4.17}$$

где ν – влажность грунта в процентах.

Проверка модели удельного электрического сопротивления грунтов в зависимости от влажности с помощью критерия Фишера ($F_{эк\ песка}$=3.28, $F_{эк\ супеси}$=3.31 и $F_{эк\ глины}$=3.18, что выше табличных значений: 3.11, 3.10 и 3.14

соответственно для уровня значимости α=0.05) позволила утверждать, что данная модель хорошо описывает изменение ρ от влажности. Сравнение значений, полученных с помощью модели (4.17), и справочных данных показывает, что модель хорошо описывает зависимость удельного электрического сопротивления от влажности. Например, песок сильно увлажненный грунтовыми водами, имеет удельное сопротивление в пределах 10 – 60 Ом·м [89]. По расчетам с помощью (4.17) для такой же увлажненности удельное сопротивление равно10 Ом·м. Для умерено увлажненного песка – 60 – 130 Ом·м, при эти же значениях расчет по модели – 70 Ом·м, для слегка влажного песка – 400 – 1500 Ом·м, а по модели – 350 Ом·м.

4.4 Учет засоленности грунта

При проведении экспериментов для учета влияния засоленности были взяты грунты различного вида. Известны градации засоленности грунтов: незасоленные (0.25 – 0. 30% содержания солей), слабозасоленные (0. 30 – 0.50%), среднезасоленные (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 были проведены эксперименты с грунтами различного вида. Первоначальная засоленность грунтов определялась по ГОСТ264223-85. Почвы.

Эксперименты проводились следующим образом: образцы при различном содержании соли загружались в установку, изображенную на рисунке 4.2а, и проводились измерения удельного электрического сопротивления. На основании этих экспериментов и был определен нечеткий коэффициент влияния засоленности на удельное электрическое сопротивление грунта.

Для определения величины этого коэффициента введено два нечетких интервала «слабозасоленные» и «засоленные» и определены функции принадлежности

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \le \text{sol} < 0.4 \\ e^{-0.8\cdot(\text{sol}-2)^2}, & 0.4 \le \text{sol} \le 2 \\ 0, & \text{sol} > 2 \end{cases} \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \le \text{sol} < 0.4 \\ 1 - e^{-0.8\cdot(\text{sol}-2)^2}, & 0.4 \le \text{sol} \le 2 \\ 1, & \text{sol} > 3 \end{cases}, \qquad (4.18)$$

где sol – соделжание солей в грунте в долях.

На рисунке 4.5 сплошной линией изображена функция принадлежности к нечеткому интервалу «слабозасоленные», а штриховой линией – функция принадлежности – «засоленные».

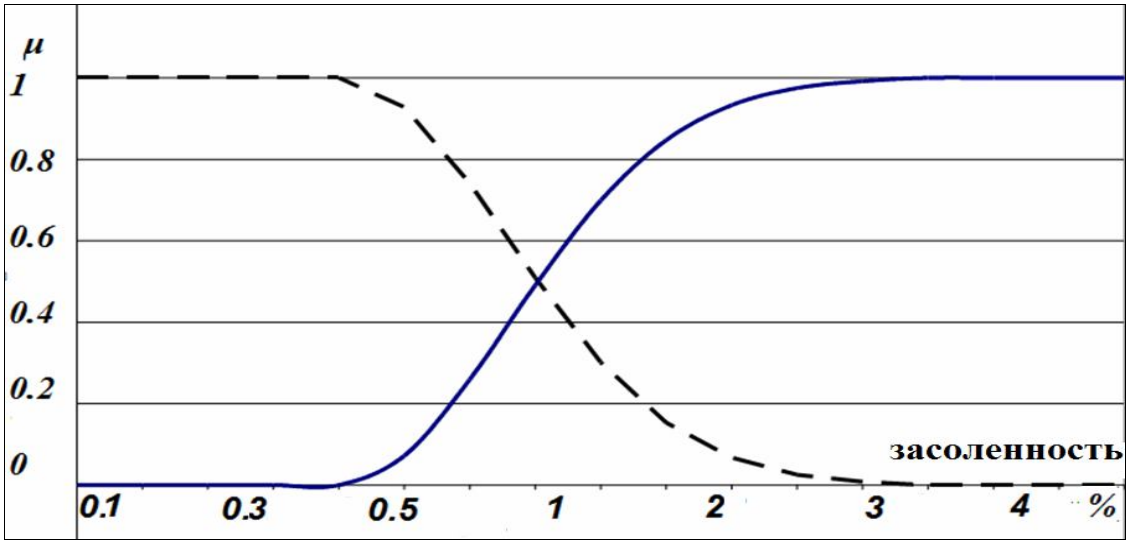


Рисунок 4.5 – Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов засолённости

Значения коэффициента засоленности вычисляется с помощью следующей функции:

$$K_{sol} = \sum_{i=1}^{2} \eta_i(\text{sol}) \cdot \mu_i(\text{sol}), \qquad (4.19)$$

где $\eta_1(\text{sol}) = 1$ $\eta_2(\text{sol}) = 0.001$. Для получения удельного электрического сопротивления грунта при конкретной влажности и засоленности необходимо значения, полученные с помощью выражения 4.17 умножить на K_{sol}.

4.5 Построение модели ρ в зависимости от температуры в области отрицательных ее значений.

Известна экспериментальная зависимость расчета удельного электрического сопротивления влагосодержащих грунтов [85] от температуры

$$\rho = \rho_{20} \cdot e^{-0.022 \cdot (t-20)}, \qquad (4.20)$$

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

Относительно отрицательных температур отмечается, что при замерзании поровой влаги ρ грунта возрастает в несколько раз, но какова закономерность этого роста в зависимости от влажности в [78 -85], как и в других известных источниках, не указывается. Поэтому решено было произвести ряд экспериментов на установках, изображенных на рисунке 4.2, с охлаждением образцов грунта до температуры -20 ^0C .

При этом доказано, что формула (4.20) не работает для сухих грунтов и для влагосодержащих в диапазоне температур от $4\,^0C$ и ниже. Эксперименты показали, что при отсутствии влаги при понижении температуры понижается удельное электрическое сопротивление грунта.

Экспериментальные зависимости ρ от температуры (кривые 1-3 на рисунке 4.6) при определенной влажности в диапазоне отрицательных температур для песка и супеси даже ориентировочно не описываются формулой (4.20), по которой построена кривая 4, представленная на рисунке 4.6. При сухом грунте с уменьшением температуры ρ уменьшается по экспоненте, а при влажном – в районе от $0\,^0C$ до $-1\,^0C$ происходит скачкообразное увеличение ρ (рисунок 4.6), что объясняется кристаллическим строением данных грунтов. Для расчета величины этого скачка для песка и супеси были выведены в результате регрессионного моделирования следующие формулы [94,160]

$$\rho_{П}^{1} = \rho_{П}^{0}(-0{,}03 \cdot \nu^2 + 0.86 \cdot \nu - 1.9)$$
$$\rho_{С}^{1} = \rho_{С}^{0}(0.024 \cdot \nu^2 - 0.022 \cdot \nu + 0.2)\text{,} \qquad (4.21)$$

где ν – влажность, выраженная в долях, $\rho_{\text{П}}^{0}$ и $\rho_{\text{С}}^{0}$ – удельные сопротивления песка и супеси при $0\ ^{0}C$, а $\rho_{\text{П}}^{1}$ и $\rho_{\text{С}}^{1}$ при $-1^{0}C$.

Расчет удельного электрического сопротивления песка и супеси при температуре ниже $-1^{0}C$ может быть выполнен с помощью зависимостей [94,158 -160]

$$\rho_{\text{П}} = \rho_{\text{П}}^{1} \cdot 0.87^{(t+1)},\ \rho_{\text{С}} = \rho_{\text{С}}^{1} \cdot 0.88^{(t+1)}. \qquad (4.22)$$

Зависимости на рисунке 4.6 построены по формулам (4.21) и (4.22) для песка влажностью 5% и 16% (кривые 1 и 2) и супеси влажностью 16% (кривая 3), а также по формуле (4.20) для песка влажностью 16% (кривая 4), и экспериментальные данные (■ – песок 16%, ♦– супесь 16%, ▲ – песок 5%). Для глин и суглинков скачкообразного увеличения ρ в районе $0\ ^{0}C$ не происходит ввиду аморфного строения данного вида грунта. Поэтому для расчета удельного электрического сопротивления глин в области отрицательных температур предлагается следующая зависимость [94,158-160]:

$$\rho_{\text{гл}} = \rho_{\text{гл}}^{0} \cdot 0.88^{(t+1)}, \qquad (4.23)$$

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

Кривые, представленные на рисунке 4.7, можно использовать для определения динамики изменения ρ супеси и песка в диапазоне от $+20^{0}$С до -20^{0}С при любой влажности.

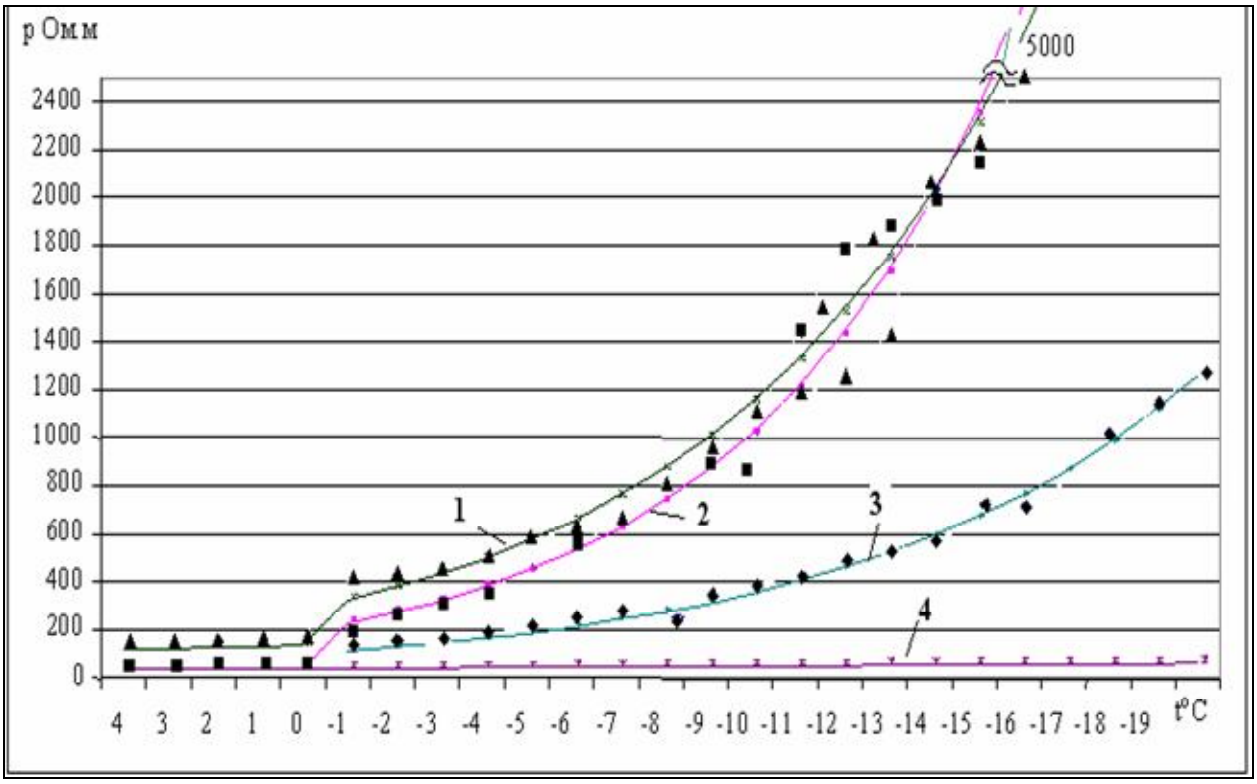


Рисунок 4.6 – Зависимости удельного электрического сопротивления ρ от температуры t°

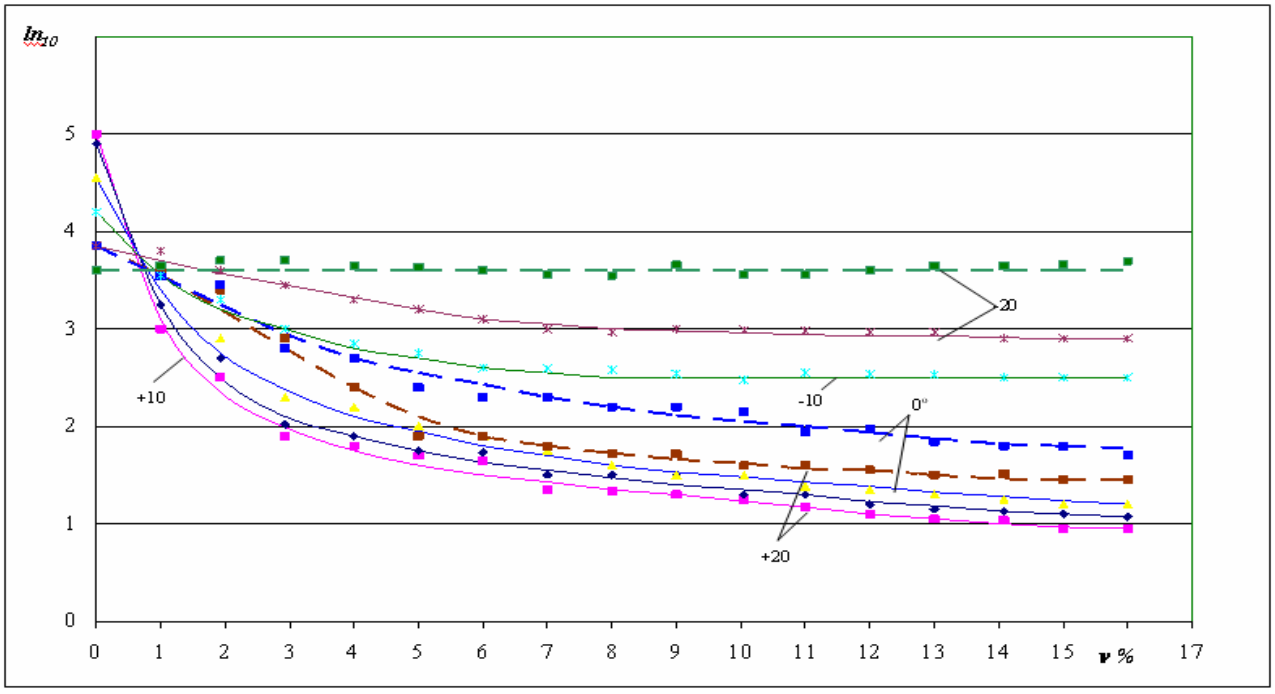


Рисунок 4.7 – Зависимости ρ от ν % для супеси и песка (сплошные и прерывистые линии) при температурах 20, 10, 0,-10,-20° С

Анализ значений ρ, полученных с помощью разработанных зависимостей, показывает, что они входят в диапазоны, указанные в [80]. Таким образом, полученная модель может быть применена для определения удельного электрического сопротивления любого типа грунта от влажности и температуры с достаточной для практики точностью.

4.6 Построение модели ρ грунта в зависимости от плотности

Степень уплотненности dгр грунта оказывает непосредственное влияние на его ρ наряду с v и t. Утверждение [84], что чем плотнее утрамбован грунт, тем меньше его удельное электрическое сопротивление, понятно по физической сути и общепринято. 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 [161], позволяющая обеспечить необходимое уплотнение образцов конкретного вида грунта и измерять электропроводность грунта при различной степени его плотности. Установка (рисунок 4.8) представляет собой трубу 1 диаметром 11 см, закрепленную вертикально на раме 2, которая установлена на упругих опорах 3, с возбудителем колебаний 4. Два внутренних электрода 5 и 6, размещены в двух радиальных отверстиях 7, выполненных в средней части трубы. Нижний внешний электрод 8 установлен неподвижно внизу трубы, а верхний внешний 9 – вверху трубы, с возможностью прижима к образцу грунта 10, помещенного в трубе, например, винтом 11. Внешние электроды присоединены к источнику питания 12, а внутренние – к вольтметру 13.

Эксперименты проводились следующим образом:

– в трубу с сечением S и длинной l_T загружался образец грунта известных веса P, влажности v и температуры t;

– затем образец подвергался виброобработке для достижения некоторой его уплотненности;

– на внешние электроды подавалось напряжение с частотой 50 Гц. Ток, проходящий через грунт, измерялся амперметром 14, а напряжение на внутренних

электродах – вольтметром 13;

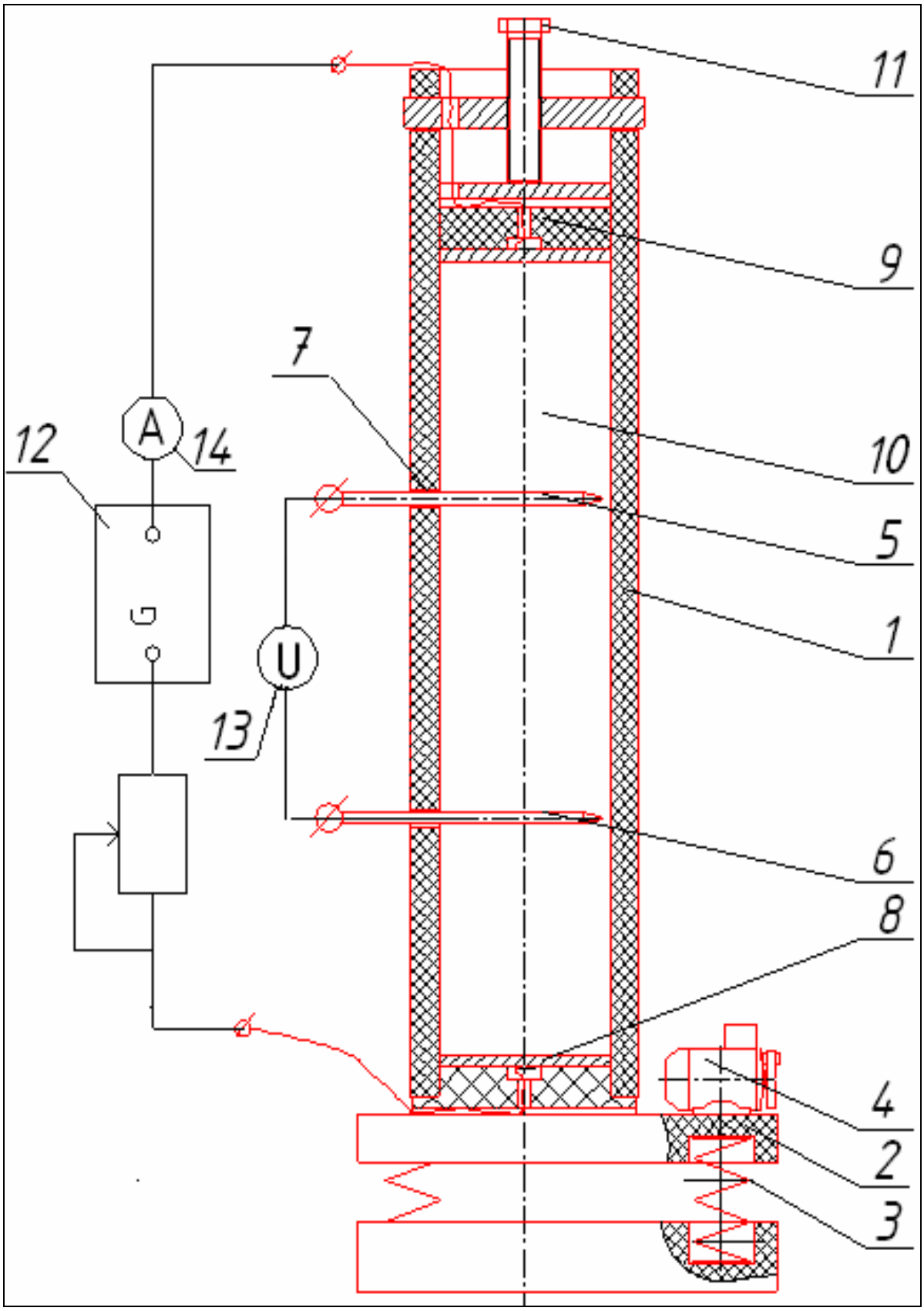


Рисунок 4.8 – Установка для определения электропроводности грунта в зависимости от его плотности

– удельное электрическое сопротивление рассчитывали по $\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot l}$, где l – расстояние между внутренними электродами 6 и 7;

– плотность d определялась по известной формуле: $d = \frac{P}{S \cdot l_T}$.

Затем установку отключали от источника напряжения, и грунт для уплотнения подвергался виброобработке в течение некоторого времени. После очередного этапа уплотнения снова подавалось напряжение, и проводились измерения. Эти действия продолжались до предельного уплотнения образца.

За предельное уплотнение принималось уплотнение, которое не менялось после 10-15 минут виброобработки. В ходе экспериментов исследовались грунты: песок, супесь и суглинок. Грунты брались однородные, то есть без примесей других пород. Для каждого вида грунта эксперимент проводился для различной степени увлажненности, начиная с сухого состояния и до значительной влажности. Степень увлажнения для различных грунтов была разная: пески и супеси увлажнялись практически до состояния насыщения, суглинки до состояния 30-35% насыщения. Грунт увлажнялся водопроводной водой, и проводились измерения с увеличением его уплотнения.

В результате измерений были получены зависимости, некоторые из них изображены на рисунке 4.9. Анализ полученных зависимостей позволяет судить, что, чем суше грунт, тем более круто изменяется ρ. При сравнении изменения ρ различных грунтов было замечено, что для суглинков эти зависимости идут более полого, чем для супесей и песков.

Известно [84] чем выше d, т.е. чем лучше утрамбован грунт, тем меньше его ρ, и наши эксперименты подтверждают это положение, причем для влагосодержащих грунтов характер изменения ρ от плотности экспоненциальный (рисунок 4.9). Во влажном состоянии ρ песка имеет значение 40 Ом·м, в сухом же состоянии оно может доходить до 10 кОм·м, т.е. чем влажнее грунт, тем ниже находится зависимость ρ от d.

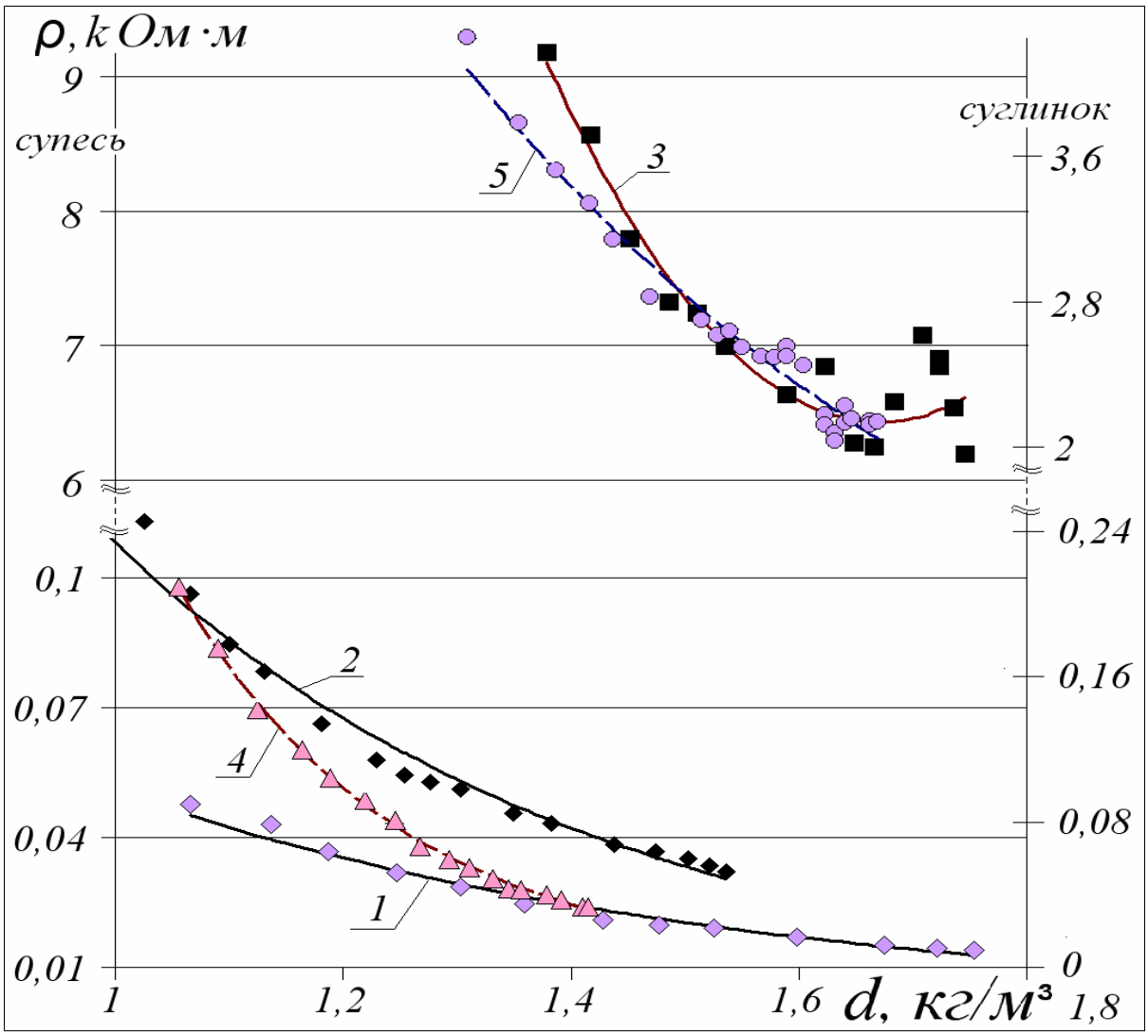


Рисунок 4.9 – Зависимость ρ от плотности для супеси влажностью 9% (кривая 1), 5% (кривая 2) и 1% (кривая 3) и суглинка влажностью 7% (кривая 4) и 2% (кривая 5)

В результате исследований разработана эмпирическая формула [162,163] ρ песка, супеси и суглинка от плотности, которая выглядит следующим образом:

$$\rho = \rho_{d0} e^{k_v (d - d_0)}, \qquad (4.24)$$

где ρ_{d0} и d_0 – удельное электрическое сопротивление и плотность грунта соответственно, взятые по данным геологоразветки, которые берутся перед проектированием 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 $-k_v = -e^{(-0.05 \cdot v + 1.1)}$.

Зависимости получены с помощью метода наименьших квадратов.

Для влажных супеси и суглинка от 1% до состояния водонасыщения ρ уменьшается с ростом плотности. На рисунке 4.9 для супеси (кривые 1,2 и 3) соответствует левая шкала, для суглинка – правая.

Для суглинков и глин во влажном состоянии характерно явление слипания частиц. Это приводит к образованию многочисленных пустот и трещин, что уменьшает проводимость грунта. Поэтому при организации устройств заземления необходимо учитывать эту особенность [91–93].

При проведении экспериментов на нашей лабораторной установке мы так же столкнулись с проблемой прилипания влажного суглинка к стенкам установки, что не давало возможности добиться однородного уплотнения. Нам удалось получить примерно однородную по плотности структуру для суглинка с влажностью менее 10%.

Изменение d от температуры для песка и супеси несущественно из-за их кристаллического строения даже при отрицательных температурах, когда происходит кристаллизация влаги, что было доказано путем проведения экспериментов. Для суглинка и глины наблюдается более заметное увеличение объема при росте влажности. Плотность d изменяется под воздействием влажности, но это изменение оказывает незначительное влияние на ρ по сравнению с влиянием на удельное электрическое сопротивление влажности и температуры, например, при увлажнении песка с 0 до 10% его плотность увеличивается на 314 кг/м^3. При этом ρ уменьшается с 9300 Ом·м до 75 Ом·м (в 124 раз), а при изменении d на 314 кг/м^3 ρ уменьшается с 850 Ом·м до 450 Ом·м для песка с влажностью 1% и с 75 Ом·м до 40 Ом·м для песка с влажностью 10%, то есть, менее, чем в два раза. Поэтому изменением плотности при изменении влажности можно пренебречь.

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 (4.24), позволяющая определять динамику уменьшения ρ грунта в процессе его уплотнения от состояния разрыхления до полного оседания для выбора дальнейших мероприятий.

Существуют данные по оседанию грунтов [164,165], которые определяют временные интервалы перехода грунта к состоянию естественного залегания. Например, при планомерно возведенном сооружении заземления с применением тщательной трамбовки для глинистых грунтов требуется от 2 до 5 лет, для песчаных грунтов 1-2 года, а без уплотнения – от 10 до 15 и 2-5 лет соответственно. Полученные графики (рисунок 4.9) могут быть разделены на соответствующие периоды (2-5 лет и 1-2 года) для прогнозирования уменьшения ρ грунта во времени. Что позволит уточнить необходимость дополнительных мер по улучшению параметров ЗУ.

4.9 Выводы

1. Удельное электрическое сопротивление грунта ρ колеблется в широких пределах – от единиц и десятков до тысяч Ом на метр, так как зависит от множества факторов, основные из которых: вид грунта, его влажность, засоленость, температура и плотность. Грунты не являются «чистыми», что вносит элемент неопределенности при расчете ρ любого вида грунта. Ввиду этого в качестве основного математического аппарата моделирования удельного сопротивления грунта целесообразно использование аппарата нечеткой логики.

2. В процессе разработки моделей на основе экспериментов получены функции принадлежности и нечеткие интервалы для таких показателей как вид грунта, влажность и засоленность.

3. Показано, что моделирование удельного электрического сопротивления ρ с использованием нечеткой логики позволяет уточнить его значение в зависимости от вариации выше означенных величин.

4. Рассчитанное с помощью полученной модели значение ρ может быть

использовано на стадии проектирования устройств заземлений для более точного его расчета, который ранее делался с большим запасом.

5. Модель с использованием формул зависимости удельного электрического сопротивления грунта от плотности [162,163] может быть использована при прогнозировании уменьшения ρ после ввода в эксплуатацию сооружений заземления. Что позволит при необходимости выбрать комплекс мер для уменьшения величины электричекого сопротивления заземляющих устройств.

5 Разработка класса нечетких климатических моделей грунта для безопасной эксплуатации электротехнических комплексов

5.1 Постановка задачи

Рассматриваемое производство является энергоемким: мощность среднего завода по производству глинозема составляет 200МВт. При переходе на иные концентрационные режимы, связанные с поиском энергоэффективности производства в целом, могут возникать резкие повышения объемов потоков веществ, циркулирующих на технологических переделах. Эти явления, в свою очередь, могут провоцировать возникновение аварий техногенного характера и аварий электрооборудования.

При возникновении подобных аварий может резко увеличиваться вероятность травматизма, связанного с поражением электрическим током, так как на территории рассматриваемого типа производства находятся мощные энергоустановки, в том числе и открытые распределительные устройства 110кВ. Эксплуатация электроустановок представляет определенную опасность для жизни работающего персонала.

Устройства заземления предназначены для обеспечения принятых режимов работы энергоустановок и защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током с помощью отвода в землю потенциала, который может появиться в случае аварийной работы на корпусе электрооборудования. Основным параметром заземления является его сопротивление, которое рассчитывается на основании удельного электрического сопротивления земли, которое изменяется в больших пределах в течение года в зависимости от климатических условий.

Так, например, в период активного снеготаянья или обильных дождей удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли резко падает, и потенциал, который может появиться в аварийном случае, может распространиться на значительное расстояние от места входа его в землю и

привести к электротравматизму работающего персонала. В виду этого в данной главе должны быть решены следующие задачи.

1. Для повышения безопасности работы с электрооборудованием ЭТК необходимо более точное определение напряжения прикосновения и шага в конкретный момент времени. Эта задача может быть решена путем расчета удельного электрического сопротивления слоев грунта при условии определения влажности и температуры этих слоев в конкретный момент времени и в конкретной местности.

2. Влажность и температура грунта в каждой конкретной местности могут меняться в довольно широком диапазоне в течение года и вглубь от поверхности земли. В связи с этим встает задача разработки моделей климатических параметров грунта на основе анализа данных метеорологии геологии, опубликованных в литературе и полученных из метео- и геологоразведочных центров.

3. Известно, что температурный режим поверхности земли имеет колебательный характер. Тепло вглубь от поверхности земли распространяется по закону теплопроводности Фурье. Поэтому, разработка модели годового изменения температуры слоев грунта должна основываться на этом законе.

4. Влажность слоев грунта определяется различными климатическими факторами. Следовательно, при построении модели влажности необходимо определить факторы, оказывающие значительное влияние на влажность грунта на разных глубинах от поверхности земной коры, где эти факторы действуют.

5. Выше перечисленные задачи имеют много неопределенностей, что позволяет прийти к единственному выводу: для построения методик вычисления удельного электрического сопротивления грунта необходимо использовать аппарат нечеткой логики, который позволяет решать задачи с неопределенными данными.

6. Построенная на основе имитации протекающих в течение года процессов модель климатических параметров грунта совместно с моделью ρ может быть встроена в современные АСУ предприятий, которая должна иметь функцию

определения напряжения прикосновения и шага в случае аварийных ситуаций.

5.2 Статистика электротравматизма на промышленных предприятиях

Электротравматизм [166,167] составляет малый процент в сравнении с другими видами производственного травматизма, но при этом, по количеству травм с тяжелым и смертельным исходом этот вид травматизма занимает первое место. Статистика показывает, что наибольшее число электротравм (60-70%) возникает при работе на электроустановках напряжением до 1000В. Это объясняется широким распространением таких установок.

Большая часть несчастных случаев происходит из-за низкого уровня организации работ, грубых нарушений Правил (ПУЭ), в том числе:

1. Непосредственного прикосновения к открытым токоведущим частям и проводам.
2. Прикосновения к токоведущим частям, изоляция которых повреждена.
3. Прикосновения к металлическим частям оборудования, случайно оказавшихся под напряжением.
4. Касания к токоведущим, частям при помощи предметов с низким сопротивлением изоляции.
5. Отсутствия или нарушения защитного заземления.
6. Ошибочной подачи напряжения во время ремонтов или осмотров.
7. Воздействия электрического тока через дугу.
8. Воздействия шагового напряжения и др.

Статистика электротравм на предприятиях по профессиям приведена на рисунке 5.1.

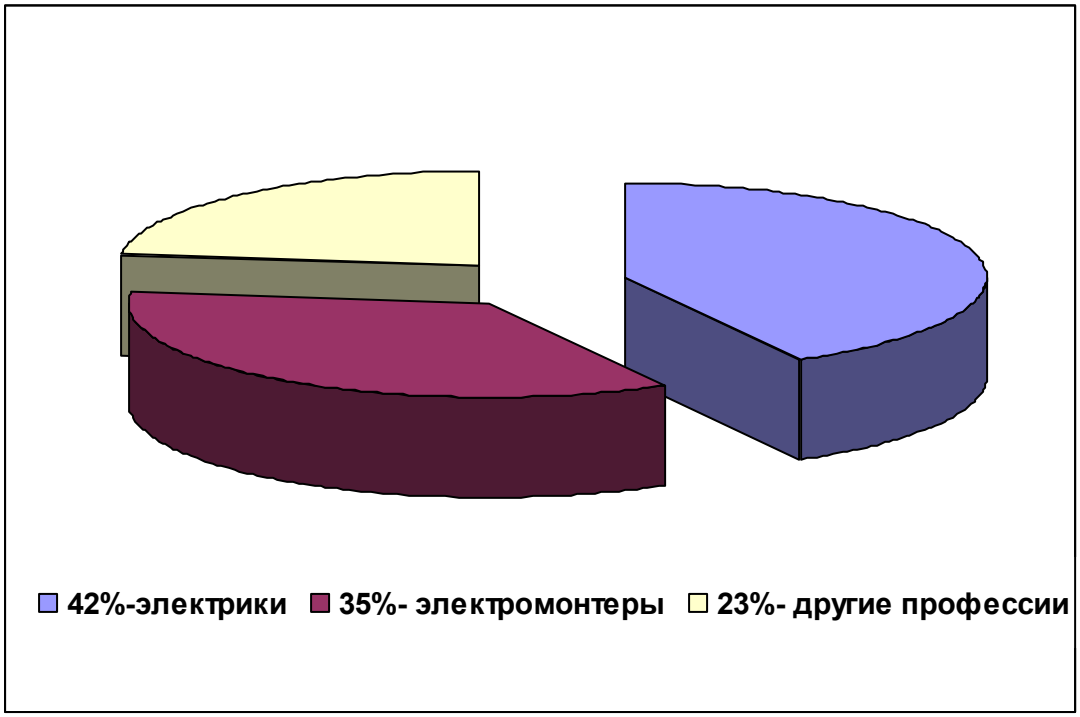


Рисунок 5.1 – Статистика электротравмирования по профессиям на предприятиях

Диаграмма иллюстрирует, что более всего подвержены электротравматизму профессии, непосредственно связанные по работе с электрооборудованием, но доля травмированных, не входящих в группу профессий, связанных с энергетикой тоже достаточно велика – 23%.

На рисунке 5.2 приведена статистика электротравм на предприятиях Российской энергетики [166,167]. Примерная картина просматривается и в других отраслях промышленности.

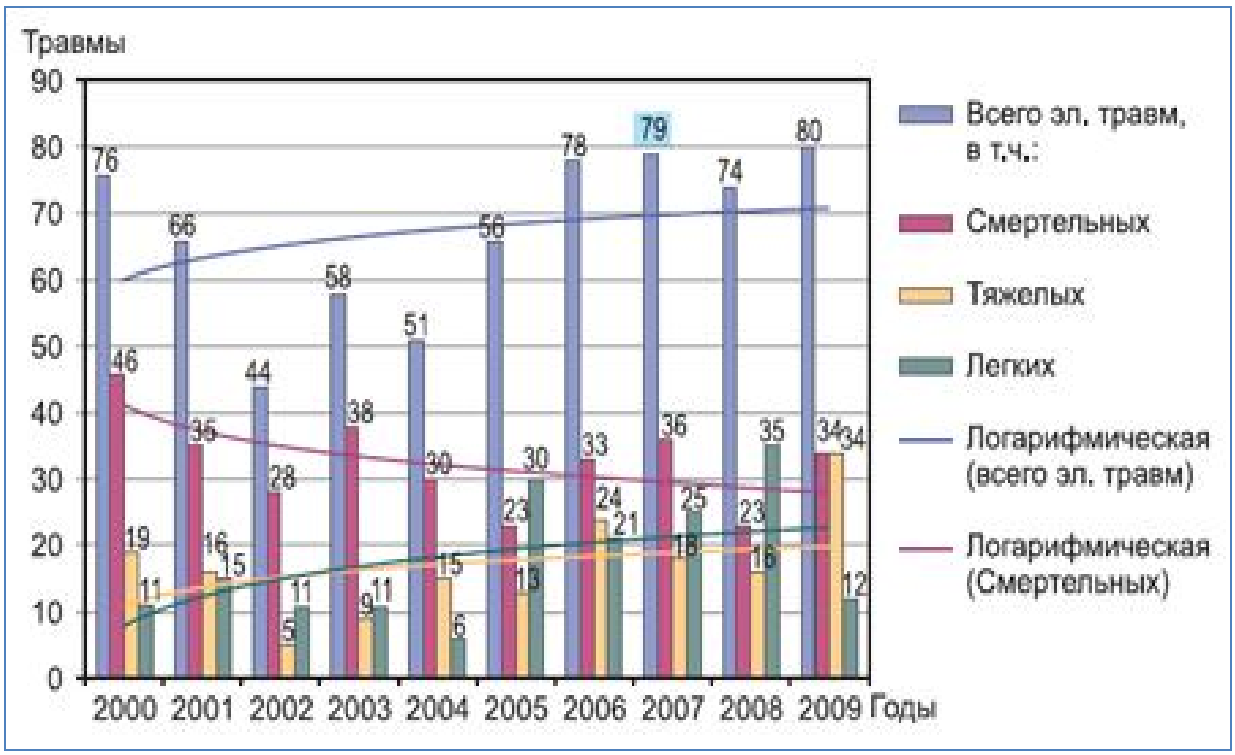


Рисунок 5.2 – Статистика электротравмирования за 10 лет на предприятиях электроэнергетики [166]

Анализ травматизма на тепловых и электрических установках показывает, что за 6 месяцев в 2014 году количество несчастных случаев по сравнению с аналогичным периодом прошлого года снижено на 10 %. За 6 месяцев 2014 года на энергоустановках, поднадзорных Ростехнадзору, зарегистрировано 37 несчастных случаев со смертельным исходом, а за аналогичный период 2013 года – 43 несчастных случаях со смертельным исходом.

Наибольшее количество несчастных случаев со смертельным исходом за 6 месяцев 2014 года произошло на электроустановках (ЭУ) потребителей – 25 (67%), в электрических сетях – 9 (25 %) и в тепловых установках энергоснабжающих организаций – 3 (8 %) [167].

Доля электротравм по отношению ко всем травмам на производстве составляет около 11,2 %. Из них:

- 57 % – при прикосновении к токоведущим частям;
- 23 % – от прикосновения к металлическим частям;
- 16 % – от прикосновения к неметаллическим частям;

- 2.5 % – от шагового напряжения;
- 1.5 % – при приближении (не касаясь) в высоковольтных установках более 1000В.

На электротравматизм оказывают значительное влияние имеющиеся дефекты конструкций, их изготовления и монтажа в электроустановках, функция которых – предупреждение случайного прикосновения к токоведущим и к металлическим частям электрооборудования. Анализ показывает, что организационно-социальные причины электротравматизма играют немалую роль в уменьшении несчастных случаев. При этом, как показывает статистика, за последние годы роль организационных причин возросла в среднем в 1.3 раза ввиду увеличения плотности размещения электрооборудования на предприятиях.

5.3 Моделирование удельного электрического сопротивления грунта на глубинах заземлений с учетом климатических условий на основе метода Такаги-Сугено

Удельное электрическое сопротивление слоев грунта зависит от типа грунта, температуры его слоев и их влажности (см. раздел 4). Грунты залегают слоями, толщина которых различна в каждом конкретном месте. Температура и влажность каждого слоя изменяются вглубь земли и в течение года. Поэтому для построения модели климатических условий необходимо учесть выше перечисленные факторы.

5.3.1 Моделирование температуры слоев грунта.

Температурный режим слоев грунта зависит от особенностей их географического положения, физических свойств каждого слоя, погодных условий, сезона года, времени суток, влажности грунта и других факторов [168 -173]. Годовой ход температуры поверхности грунта определяется приходом солнечной радиации в течение года и, следовательно, имеет колебательный характер. Разность между максимумом и минимумом температуры в данной

местности называется амплитудой хода температуры. Наименьшие t на поверхности грунта наблюдаются в течение января – февраля, а наибольшие – в течение июля – августа.

Данный раздел посвящен моделированию изменения t на глубинах залегания заземлений на основе использования среднемесячных значений температур по данным метеостанций [175–180]. Для решения поставленной задачи используются сведения [168–174], полученные из метеорологии и теории молекулярной теплопроводности Фурье:

– для всех типов грунта период колебания температуры с глубиной не изменяется. Иными словами: на поверхности грунта и на всех глубинах интервал между последовательными максимумами и минимумами в суточном ходе составляет 24 часа, а в годовом – 12 месяцев;

– возрастание глубины в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды колебания t в геометрической прогрессии. Этот закон распространяется на суточные и годовые колебания температур.

Районы вечной мерзлоты в данном моделировании не рассматривались. Для любой климатической зоны существует так называемый слой постоянной температуры, температура которого приблизительно равняется среднегодовой температуре поверхности грунта. Этот слой располагается на глубине примерно 15 м в средних и около 10 м в южных широтах. При приближении к этой глубине амплитуда годового колебания t стремится к нулю. Следующие 50м грунта вглубь имеют температуру постоянного слоя. Дальнейшее изменение t с увеличением глубины можно учитывать исходя из того, что на каждые 100 м t увеличивается на 3^0C [169] в соответствии с зависимостью, представленной в [169,172].

Суточное изменение температуры на поверхности грунта отражается на ее распределение по глубине только до 70-100 см [169]. Максимальные и минимальные t на глубинах наступают позднее, чем на поверхности, при этом, запаздывание прямо пропорционально глубине. Суточные максимумы и минимумы запаздывают на каждые 0.1м в среднем на 2.5-3.5 часа, а годовые – на каждый 1м глубины на 20-30 суток.

Погрешности в расчетах температуры вызываются неоднородностью состава и структуры грунтов, а так же тем, что тепло распространяется вместе с осадками вглубь, не подчиняясь законам молекулярной теплопередачи. Однако, многочисленные наблюдения (см. таблицы 5.1 и 5.2) показывают, что фактическое распределение тепла в грунте достаточно близко соответствует этим законам.

В литературе [170] имеются зависимости, позволяющие определять распространение температуры. Так, например, амплитуду колебаний t на интересующей исследователя глубине предлагается вычислять с помощью следующей формулы

$$A_h = A_П e^{-3.16\cdot10^{-4} h\sqrt{\frac{\pi}{T_K \cdot K}}}. \qquad (5.1)$$

где $A_П$ – амплитуда колебаний температуры поверхности грунта; A_h – амплитуда колебаний температуры на глубине h; T_K – период колебаний; К – коэффициент, отражающий температуропроводность грунта.

Таблица 5.1 – Температура грунта по метеоданным Павлодарской области за 2005г.

Месяцы	Температура(^oC) на глубинах(м)					
	0	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2
Январь	-16.4	-0.3	0.3	1.7	3.8	6.6
Февраль	-21.9	-2.9	-1.8	-0.3	2.4	5.5
Март	-5.2	-1.9	-1.8	-0.8	1.3	4.3
Апрель	6.4	3.8	3.1	2.6	2.1	3.7
Май	14.0	12.5	11.3	9.6	6.8	4.8
Июнь	20.8	18.2	16.6	14.6	10.8	7.1
Июль	21.3	20.4	19.3	17.4	13.7	9.4
Август	18.2	19.3	18.8	17.9	15.0	11.2
Сентябрь	12.3	14.1	14.2	14.6	13.8	11.7
Октябрь	5.8	6.0	6.9	8.5	10.9	11.2
Ноябрь	-3.1	1.9	3.0	5.2	8.0	9.8

Декабрь	-14.0	-3.4	-2.0	0.8	4.7	7.9

Таблица 5.2 – Температура грунта по метеоданным Павлодарской области за 2006г.

Месяцы	Температура (^{o}C) на глубинах(м)					
	0м	0.2м	0.4м	0.8м	1.6м	3.2м
Январь	-25.7	-5.7	-4.5	-2.2	1.8	5.9
Февраль	-16.7	-5.6	-4.8	-3.1	0.3	4.3
Март	-3.4	-2.6	-2.6	-1.9	0.0	3.4
Апрель	4.0	3.5	2.7	2.1	1.5	3.0
Май	12.3	10.3	91.0	7.4	5.3	4.1
Июнь	21.5	18.7	16.8	14.1	10.2	6.3
Июль	20.1	20.2	19.1	17.1	13.8	8.9
Август	17.3	18.8	18.0	16.8	14.3	10.5
Сентябрь	13.4	15.2	15.2	15.0	13.0	11.3
Октябрь	4.5	6.9	7.8	9.3	11.0	10.9
Ноябрь	-4.6	2.3	3.3	5.3	7.9	9.5
Декабрь	-6.1	-0.5	0.1	1.8	4.9	7.8

Для расчета температуры грунта на определенной глубине и времени года можно использовать формулу [170]

$$t = t_{П} - A_{П} e^{-3.16\cdot 10^{-4}\cdot h\sqrt{\pi/365}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left[g - 171 - 1.834\cdot 10^{-2}\cdot h\sqrt{365/\pi\cdot K}\right]\right), \qquad (5.2)$$

где $t_{П}$ – температура «слоя постоянной температуры», ^{o}C, например для средних широт $t_{П} \approx 8^{0}$C [168,169]; $A_{П}$ – амплитуда колебания t поверхности грунта (относительно слоя постоянной годовой t) на требуемой глубине, ^{o}C; h – глубина, м, g – дни (количество суток).

Моделирование температуры грунта по (5.1) и (5.2) весьма проблематично, так как требует знания коэффициента К, а его определение является не простой задачей. Этот коэффициент рассчитывается для конкретной местности и не может быть определен для любых климатических зон.

5.3.2 Моделирование температуры грунта на основе ее среднемесячных значений

В ходе исследований был выполнен анализ годового хода температуры на поверхности грунта и на ряде глубин по различным районам территории СНГ. Данные были получены от метеостанций г. Павлодара (северо-восточный Казахстан) и взяты из литературы [169,170,172]. На основании этих данных выполнено построение зависимостей температуры грунта вглубь от поверхности для двенадцати месяцев года.

Анализ зависимостей показал, что для разных регионов характер их однотипен: с увеличением глубины, температура слоев грунта имеет тенденцию экспоненциального приближения к температуре, называемой температурой постоянного слоя, которая равна среднегодовой температуре данной местности. Рисунок 5.3 иллюстрирует это утверждение для района г. Павлодара.

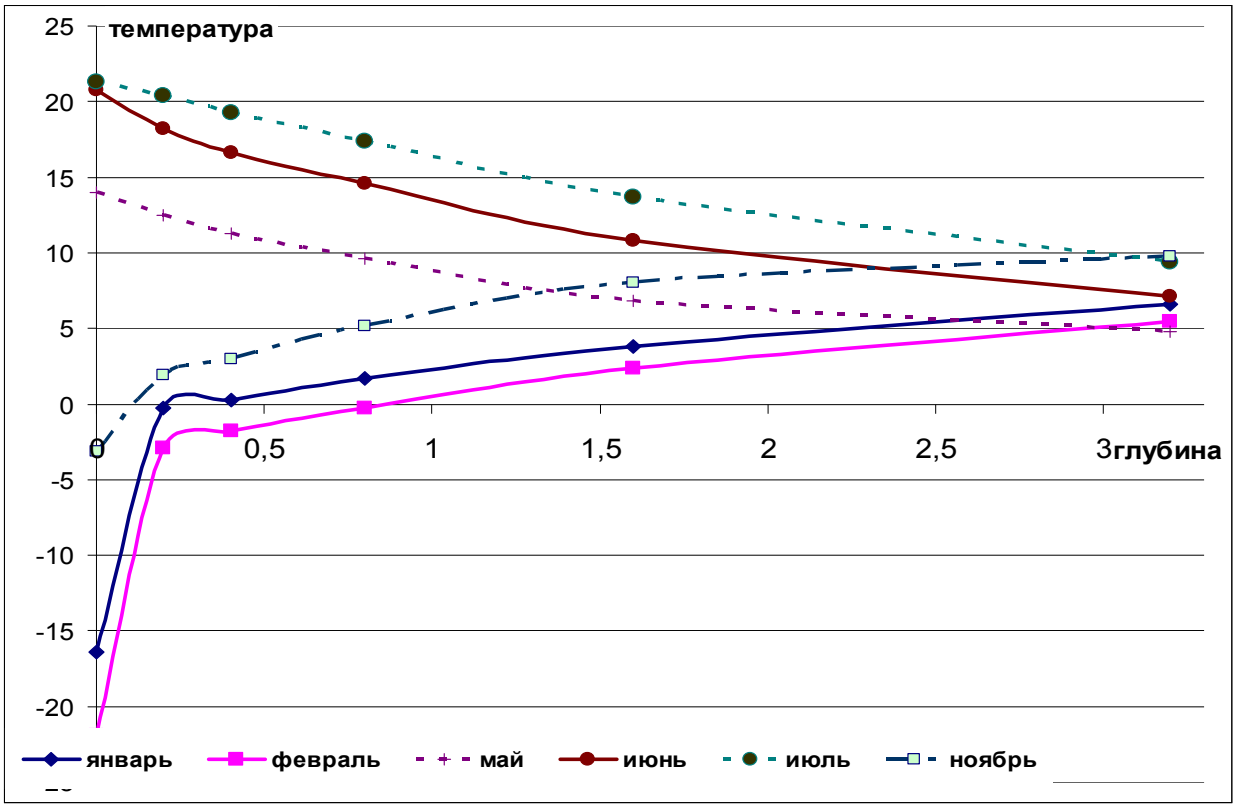


Рисунок 5.3 – Изменение температуры вглубь от поверхности земли по месяцам для района г. Павлодара

Затем были построены графики годового изменения температуры на глубинах 0м, 1.25м, 2.5м, 5м и 7.5м по данным из выше означенных источников. Годовые изменения температур на этих глубинах для г. Калининграда приведены на рисунке 5.4. Рисунок хорошо иллюстрирует колебательный характер изменения температуры на различных глубинах, при этом видно: амплитуда колебаний уменьшается при увеличении глубины.

Аналогичный характер имеют графики и для других рассматриваемых регионов: городов Павлодара, Павловска, Киева и Ставрополя [169,172].

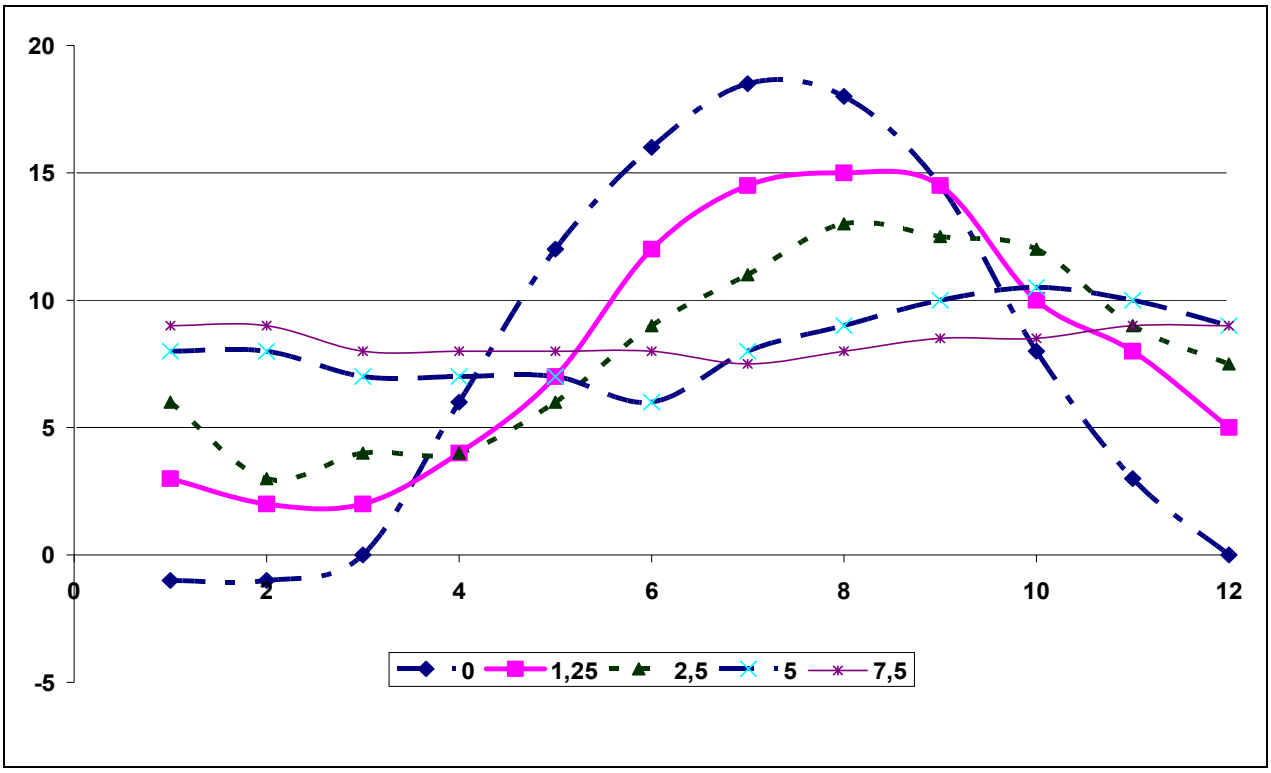


Рисунок 5.4 – Годовые колебания температуры на глубинах 0м, 1.25м, 2.5м, 5м и 7.5м в районе г. Калининграда

В результате проведенного анализа представленной выше информации, была разработана [175] формула определения амплитуды годового колебания температуры в глубинах грунта:

$$A_h = A_П \cdot q^h, \qquad (5.3)$$

где A_h – амплитуда годового колебания t (^oC) на глубине h (м) от поверхности грунта; $A_П$ – амплитуда годового колебания t (^oC) температуры поверхности грунта; q – величина, характеризующая убывание температуры вглубь грунта: $q = \exp(\frac{\ln(A_{ПТ} / A_П)}{h_{ПТ}})$, $h_{ПТ}$ – глубина постоянной годовой температуры для средних широт h=15 метров; h – глубина от поверхности земли в метрах; $A_{ПТ}$ – амплитуда колебания t на глубинах с постоянной годовой температурой, приблизительно $\approx 0{,}1^oC$, $A_П = \frac{T_{П\,max} - T_{П\,min}}{2}$, здесь $T_{Пmax}$ – максимальная среднемесячная температура, $T_{Пmin}$ – минимальная среднемесячная температура за данный год.

Разброс температур на интересующей исследователя глубине можно определить, используя следующую зависимость [175]

$$t_h = t_П \pm A_h .$$

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

$$t = t_П - A_h \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365}(g - 20 \cdot h)\right], \qquad (5.4)$$

где 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, $t_П$.(температура слоя постоянной температуры) для средних широт приблизительно равна 8^oC.

Таким образом, зная значения $t_П$, $T_{Пmin}$, $T_{Пmax}$, можно вычислить амплитуду колебания $A_П$ температуры на поверхности грунта и A_h по (5.3) и промоделировать изменение температуры на интересующей исследователя

глубине по (5.4). Проверка адекватности модели выполнялась для регионов средних широт: Калининграда, Пскова, Владивостока [169,172], Павлодара (данные метеостанции за 2005-2008 гг.), и южных широт: регион Ставрополя [172, 175].

На рисунке 5.5 приведены смоделированные графики годового хода изменения t на глубинах 0.3м ,1м, 5м, 2.5м и 10м при $A_П=15^oC$ и $t_П = 8^0C$ для г. Павлодара. Цифрами 1 и 2 обозначены точки значений, измеренных на метеостанции температур грунта на глубинах 0.3м и 1м. Рисунок хорошо иллюстрирует погрешность моделирования при сравнении с данными метеостанции: на глубине 0.3 м наблюдается незначительное отклонение от графика, а на глубине 1м точки наблюдаемых температур (точки на графиках, обозначенные цифрами 1 и 2) находятся вблизи полученного с помощью выражений 5.3–5.4 графика или совпадают с ним.

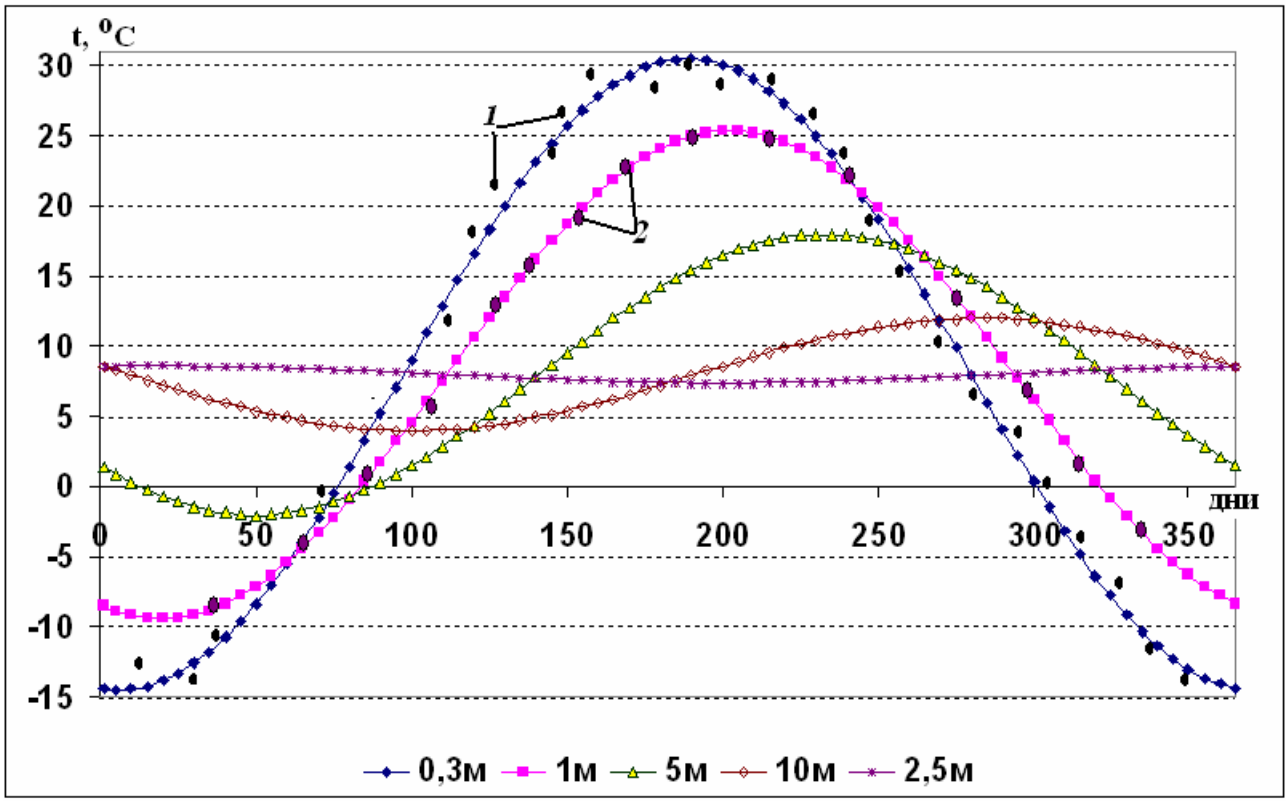


Рисунок 5.5 – Смоделированные зависимости годового хода температуры на поверхности грунта на глубинах 0.3, 1, 2.5, 5 и 10м от времени года и данные метеостанции по Павлодарской области, 2008г.

Максимальное расхождение модели с данными метеостанций перечисленных выше городов наблюдается на глубинах 10-30см, но не более $3^{o}C$, что объясняется влиянием суточных колебаний t. Как показывают расчеты ρ по модели [94] для разных грунтов, ошибка по температуре в 3^{o}C приводит к погрешностям при определении ρ, не превышающим 10%. С увеличением глубины расхождение смоделированных и измеренных температур уменьшается, а на глубине 7м эта величина уже составляет не более 0.8 ^{o}C. Для решения задач устройства заземлений эти погрешности можно не учитывать ввиду того, что заземления располагают на глубинах ниже 0.5м. Описанная модель (формулы 5.3-5.4) не работает на территории вечной мерзлоты, где даже летом почва не оттаивает полностью (проверено на примере данных г. Якутска).

Из изложенного следует, что разработанная модель позволяет еще на стадии проектирования достаточно просто определять t грунта на различных глубинах и в любой период года. Для интересующей исследователя местности нужно знать только $t_{\Pi max}$, $t_{\Pi min}$ и t_{Π} поверхности грунта за год. Эту информацию можно получить в метеостанции.

5.3.3 Примеры расчета температуры *t* и удельного электрического сопротивления ρ грунта [175] для заземления на ТЭЦ в г. Павлодаре.

Заземление установлено на глубине 1м, грунт – песок с влажностью $\nu = 5\%$.

Вычисляется t на глубине 1м. В расчетах использованы данные по Павлодарской области. В июле месяце на поверхности грунта средняя температура t=24^{o}C. Годовая амплитуда A_{Π} температуры поверхности грунта равна 15^{o}C. Амплитуда колебания температур на глубине 0.8м A_h=10,7^{o}C получена с помощью (5.18), тогда по формуле (5.19) при $t_{\Pi}=8^{0}$C температура грунта на данной глубине в июле t=17.5^{o}C. Удельное электрическое сопротивление ρ грунта рассчитывалось [94] по формуле (5.8) для нечеткого интервала «влажно», где $\mu_{A_1}(\nu)=0$ и $\mu_{A_2}(\nu)=1$ – функции принадлежности, 0.8 и 2 коэффициенты, определяющие степень нечеткости и положение на числовой оси

параметра, то есть влажности [94]. Подставляя в (5.9) ν=5%, а полученное значение ρи t=17.5^{0}C в (5.10), имеем удельное электрическое сопротивление $\rho = 0.873 кОм \cdot м$.

Вычисление погрешностей расчетов t **и** ρ**.** По данным метеостанции г. Павлодара, на глубине один метр среднемесячная t грунта в июле месяце равна 16.5 ^{0}C. Следовательно, в приведенном примере погрешность определения t на данной глубине составляет 6%, а удельное электрическое сопротивление ρ (0,893 кОм·м при t=16.5^{0}C), следовательно, погрешность в вычислении ρ составит 2.2%.

5.4 Построение модели влажности грунта на глубине заземления

Основной электрический проводник в грунте – влага. Именно она оказывает самое существенное влияние на сопротивление грунта. Поэтому при построении модели знаний о сопротивлении грунта в реальных условиях необходимо включить определение влажности его слоев в данном конкретном месте в определенный период времени.

Моделирование влажности грунта в средних широтах выполнялось на основе нечеткой логики в следующей последовательности:

– построение модели влажности на основе данных метеоцентра для глубин до 1м, так как именно на этих глубинах из-за влияния климатических условий влажность грунта сильнее подвергается изменению [92,93];

– моделирование влажности на глубинах ниже 1м – на основе данных геологоразведочного центра, поскольку на этих глубинах влажность грунта зависит только от уровня грунтовых вод.

5.4.1 Определение влажности грунта на глубине до 1м

Для решения этой задачи использовались усредненные данные метеостанции по району Жолболды Павлодарской области (засушливая зона и зона слабого весеннего увлажнения, т.е. промачивания) [93] за 2005–2008гг., представленные в таблице 5.3.

Для определения значимости влияния природных климатических факторов

на *v* грунта были вычислены коэффициенты парной корреляции *r* [30,31], представленные в таблице 5.4. Известно, чем ближе значение абсолютной величины r к единице, тем ближе к линии регрессии располагаются экспериментальные точки, и тем теснее связь между ними. Например, коэффициент корреляции влажности от выпавших осадков на глубине 20см равняется 0.66, а на глубине 100см – 0.79, что показывает хорошую тесноту связи между факторами.

Таблица 5.3 – Усредненные данные метеостанции по району Жолболды Павлодарской области за 2005-2008гг.

Месяцы	Количество выпавших осадков, мм	Температура на поверхности грунта, ^{0}C	Влажность воздуха, %	Средняя скорость ветра, м/с	Влажность грунта на глубине 20см, %	Влажность грунта на глубине 100см, %
4	90.3	8.1	5.6	4.7	5.9	5.2
5	18.5	16.6	8	4.5	2.3	2.7
6	43.6	23.1	11.8	3.7	2.8	1.8
7	51.9	24.6	14.3	3.4	1.7	1.4
8	25.1	20.6	12.8	3.9	1.7	1.0
9	13.4	13.7	8.8	4.1	1.5	1.5
10	28.8	5.3	5.7	4.2	4.6	2.3

Таблица 5.4 – Значение коэффициентов корреляции r между влажностью грунта на глубинах 0.2м и 1м и климатическими факторами местности

Влажность на глубине	r (влажность воздуха)	r (средняя скорость ветра)	r (температура поверхности грунта)	r (количество выпавших осадков)
20см	-0.73	0.61	-0.81	0.66
100см	-0.72	0.73	-0.66	0.79

С помощью метода наименьших квадратов [29 -31] получили двухфакторную модель в виде линейной функции, которая выглядит таким

образом

$$\begin{aligned} v_{20} &= 4{,}2 + 0{,}034 \cdot o_c - 0{,}17 \cdot t_{пг}; \\ v_{100} &= 2{,}5 + 0{,}028 \cdot o_c - 0{,}085 \cdot t_{пг}, \end{aligned} \qquad (5.5)$$

где o_c – количество осадков, мм; $t_{пг}(^0C)$ – температура на поверхности грунта.

Было вычислено значение коэффициентов корреляции r между влажностью грунта на глубинах 0.2м и 1м и климатическими факторами данной местности: влажностью воздуха, средней скорости ветра, температурой поверхности грунта, количеством выпавших осадков (см. таблицу 5.4).

Для оценки полученной модели и определения процента разброса функции *v* относительно ее среднего значения в зависимости от количества выпавших осадков и температуры на поверхности грунта находили коэффициент детерминированности $B_{ух}$ [30,31]. Он равен: $B_{ух}$=0.7 для глубины 20см, $B_{ух}$=0.84 для 100см, и эти значения близки к единице. Это значит: все эмпирические значения (все точки поля корреляции) лежат близко к регрессионной прямой. В этом случае говорят о линейном соотношении (линейной функции), т. е. о совпадении фактических и полученных с помощью модели значениями *v*.

Если к модели добавить такой параметр как скорость ветра, то она будет иметь вид

$$\begin{aligned} v_{20} &= 8{,}06 + 0{,}03 \cdot o_c - 0{,}20 \cdot t_{пг} - 0{,}81 \cdot \upsilon_в; \\ v_{100} &= -4{,}10 + 0{,}03 \cdot o_c - 0{,}007 \cdot t_{пг} + 1{,}3 \cdot \upsilon_в, \end{aligned} \qquad (5.6)$$

где $\upsilon_в$ – средняя скорость ветра, м/с.

Здесь $B_{ух}$=0.9 для глубины 20см, $B_{ух}$=0.96 для 100см, что говорит о возрастании точности модели по сравнению с выражениями (5.5) с добавлением параметра скорости ветра.

Моделирование зависимости *v* по глубине до 1м было выполнено с помощью нечеткой логики и метода Такаги-Сугено [95-101,104,151,152]. 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 – $0 \le h < 20$см (выбрано 20см, т.к. имеется влажность грунта на этой глубине по данным метеостанции), второй – $h \ge 100$ см, область переключения между интервалами: $20 \le h < 100$см, где h – глубина грунта, на которой необходимо найти влажность. Когда имеется два интервала, принято выбирать из числа стандартных ФП Z- и S-функции для $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ (рисунок 5.6). Для терма «верхний» на первом интервале $\mu_1(h)=1$, на втором $\mu_1(h)=0$, на интервале переключения:

$$\mu_1(h) = 1 - \frac{h - 20}{80},$$

определяемого так: если $\mu_1(h)$ убывающая, то $\mu_1(h) = 1 - \mu_2(h)$, а

$$\mu_2(h_{ГВ}) = \frac{h - 20}{100 - 20} = \frac{x - a}{b - a}.$$

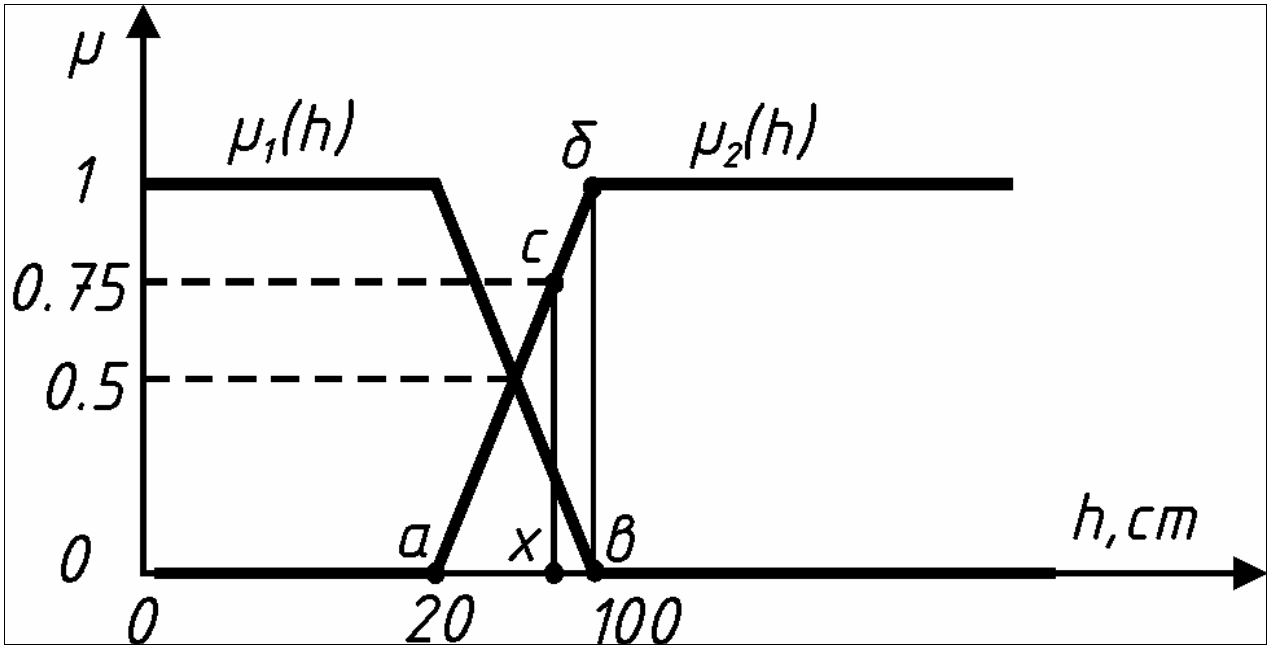


Рисунок 5.6 – Семейство ФП для определения влажности по глубинам

Последняя вычисляется из соотношения сторон ав/ах=бв/сх треугольников абв и *хас*, т.к. они подобны (рисунок 5.6). Соответственно, для терма «нижний» $\mu_2(h) = 1 - \mu_1(h)$ на этих же интервалах. Отметим, что для построения ФП масштаб по оси ординат не имеет значения.

В соответствии с теорией нечеткой логики выражение для определения влажности представляется так

$$v = \sum_{i=1}^{2} \eta_i(h) \cdot \mu_i(h) . \qquad (5.7)$$

Функции $\eta_1(h) = v_{20}$ и $\eta_2(h) = v_{100}$ из выражения (5.6). ФП $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ имеют вид

$$\mu_1(h) = \begin{cases} 1, & 0 \le h < 20 \\ 1 - \dfrac{h-20}{80}, & 20 \le h < 100 \\ 0, & h \ge 100 \end{cases}, \quad \mu_2(h) = \begin{cases} 0, & 0 \le h < 20 \\ \dfrac{h-20}{80}, & 20 \le h < 100 \\ 1, & h \ge 100 \end{cases}. \qquad (5.8)$$

По $(5.6) - (5.8)$ получена зависимость определения влажности v для глубины до 1м, имеющая вид

$$v_h = v_{20} \cdot \mu_1(h) + v_{100} \cdot \mu_2(h) . \qquad (5.9)$$

Функции v_{20} и v_{100} находятся по данным метеостанций для каждого месяца (за исключением периода промерзания грунта). Влажность грунта на глубинах до 1м в период его замерзания (с ноября по февраль) не изменяется, так как осадки накапливаются в виде снега и льда на поверхности земли и не проникают вглубь, поэтому метеостанциями в этот период она не измеряется.

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 ФП $\mu_1(m)=1$ 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. ФП представлены в виде П-образной функции (рисунок 5.7) и имеют вид

$$\mu_1(m)=\begin{cases}0, & m\le 3,\ m\ge 11\\ \exp(-3\cdot(m-4)^2), & 3<m\le 4\\ 1, & 4\le m\le 10\\ \exp(-3\cdot(m-10^2)), & 10\le m\le 11\end{cases} \quad \text{и } \mu_2(m)=1-\mu_1(m). \qquad (5.10)$$

В результате для глубины 1м влажность в зависимости от o_c, $t_{пг}$, $\upsilon_в$ и времени года (по месяцам) вычисляется по формуле

$$v=\sum_{i=1}^{2}\eta_i(m)\cdot\mu_i(m)=\eta_1(m)\cdot\mu_1(m)+\eta_2(m)\cdot\mu_2(m), \qquad (5.11)$$

где $\eta_1(m)=v_h^{(m=10)}$ – влажность за октябрь, рассчитанная по (5.9), так как для рассматриваемого региона (средние широты) в зимние месяцы (m=11,12,1,2) v не изменяется; $\eta_2(m)=v_h$ – влажность за теплые месяцы (m=4÷10) по (5.9).

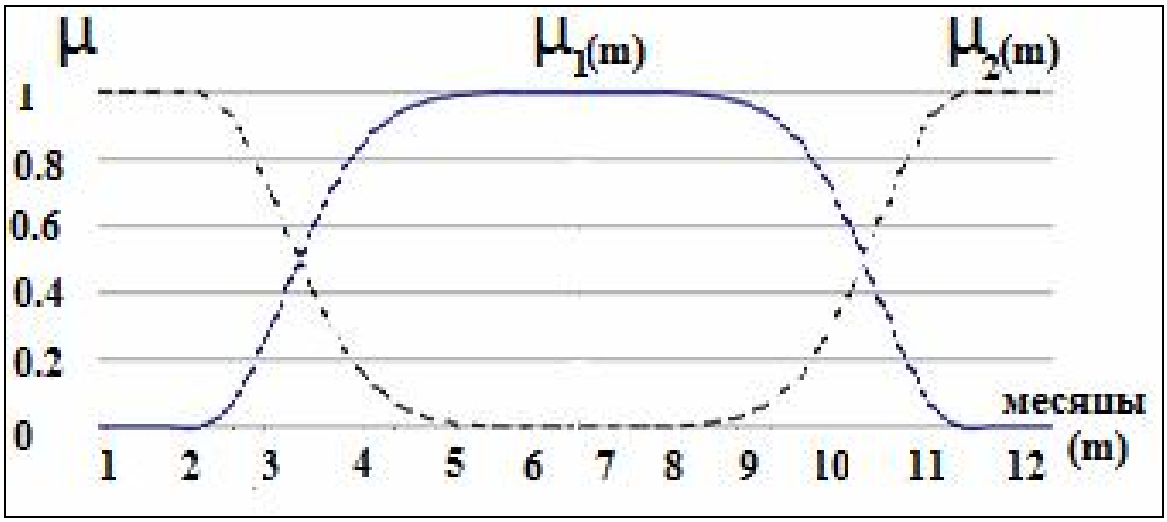


Рисунок 5.7 – Семейство ФП для определения влажности по месяцам

Адекватность полученной модели доказана по критерию $F_{эк}$ Фишера [34] (оценивается степень отклонения *v*, вычисленной по (5.11), от данных метеостанции): $F_{эк}$=3.17 для влажности на глубине 0.2м и $F_{эк}$=3.31 на глубине до 1м, что выше табличного значения: 3.10 (для уровня значимости α=0.05). Смоделированная зависимость влажности грунта от климатических условий и от времени года представлена на рисунке 5.8. Опыт показывает [84], что ρ понижается в весенние и осенние месяцы года, когда из-за тающего снега и дождей резко увеличивается влажность грунта. Увеличение ρ происходит зимой вследствие замерзания и летом из-за испарения влаги, причем более высокие значения ρ наблюдаются зимой, что еще раз доказывает адекватность полученной модели реальным данным.

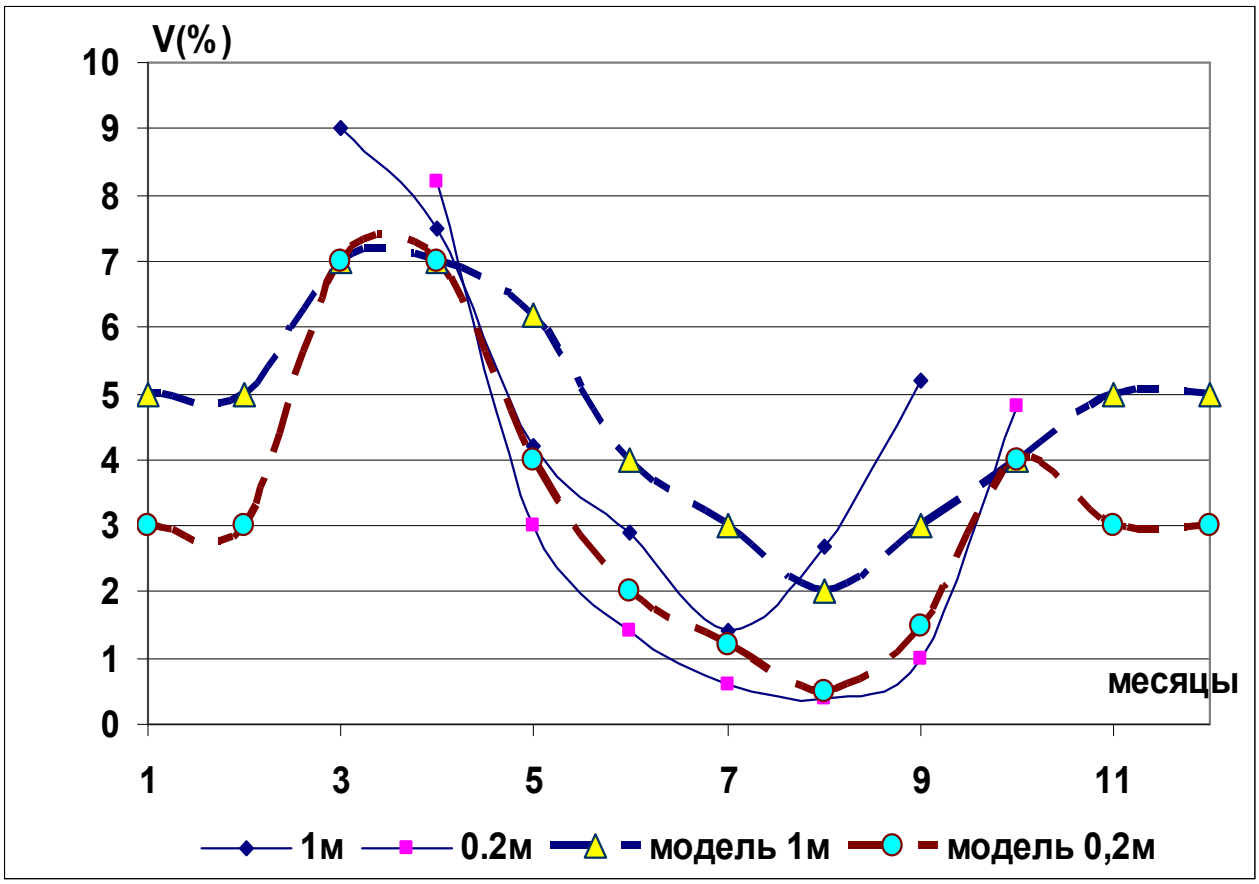


Рисунок 5.8 – Сопоставление полученной зависимости влажности (графики «модель 1м» и «модель 0.2м») с данными метеостанции г.Павлодара за 2005-2008 гг. (графики «1м» и «0.2м»). на глубине 0.2м и 1м

Сравнение значений, полученных с помощью модели, с данными метеостанции показало, что максимальное расхождение не превышало 30%. Необходимо отметить, что погрешность определения влажности для каждого упомянутого года в отдельности значительно меньше.

Следовательно, модель влажности для глубин до 1м от среднемесячного количества осадков, температуры на поверхности грунта и скорости ветра, сформированная по данным предыдущих лет, может быть использована при проектировании заземляющих устройств в последующие годы.

5.4.2 Моделирование влажности грунта на глубинах ниже 1 м. Влажность грунтов, расположенных ниже 1м от поверхности, практически не зависит от климатических условий [164,172], а определяется уровнем грунтовых вод. Для разработки модели определения влажности грунта была использована

высота $h_{КП}$ капиллярного поднятия (водоподъемная способность) [165,174]: 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 ФП $\mu_1(h_{ГВ})$ и второй – «далеко» с $\mu_2(h_{ГВ})$. Следовательно, будет два интервала: первый на промежутке $0 \le h_{ГВ} \le 0.8h_{КП}$ м; второй – $h_{ГВ} \ge h_{КП}$ м, а интервал переключения – $0.8h_{КП} \le h_{ГВ} < h_{КП}$, м. Значение $0.8h_{КП}$ выбрано по той причине, что с этого расстояния от уровня воды грунт начинает «высыхать».

Если имеется два интервала, то принято выбирать из числа стандартных ФП Z- и S-функции для $\mu_1(h_{ГВ})$ и $\mu_2(h_{ГВ})$. Для терма «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 терма «далеко» - $\mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ})$ на этих же интервалах. Функции принадлежности $\mu_1(h_{ГВ})$ и $\mu_2(h_{ГВ})$ представлены на рисунке 5.9 и имеют вид

$$\mu_1(h_{ГВ}) = \begin{cases} 1, & \text{при} \quad 0 \le h_{ГВ} \le 0.8h_{КП} \\ 1 - \dfrac{h_{ГВ} - 0.8 \cdot h_{КП}}{0.2 \cdot h_{КП}}, & 0.8h_{КП} \le h_{ГВ} \le h_{КП} \\ 0, & \text{при} \quad h_{ГВ} \ge h_{КП} \end{cases}, \qquad (5.12)$$

$$\mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ})$$

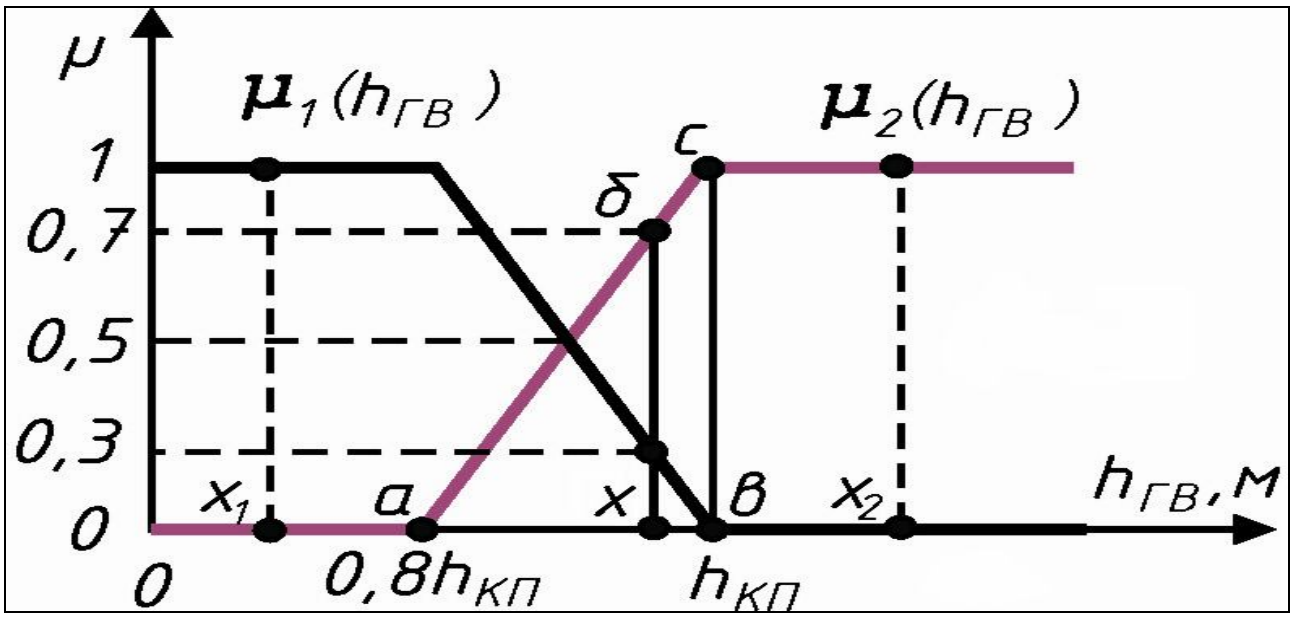


Рисунок 5.9 – Функции принадлежности $\mu_1(h_{гв})$ и $\mu_2(h_{гв})$

Формула для определения v запишется следующим образом

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

Зависимость $\eta_1(h_{ГВ})$ построена по данным геологоразведочного центра в виде кривой, полученной при использовании метода наименьших квадратов, например для песка $\eta_1(h_{ГВ}) = 18 - 27 \cdot h_{ГВ}$, а $\eta_2(h_{ГВ})$=4. 5 (4. 5 – влажность естественного залегания песка в процентах). В результате модель определения v грунтов стала выглядеть следующим образом [178,179]

$$\begin{aligned}
v_{песок} &= (18 - 27 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 4{,}5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}); \\
v_{супесь} &= (23 - 19 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 3{,}8 \cdot \mu_2(h_{ГВ}); \\
v_{глина} &= (50 - 12{,}8 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 18 \cdot \mu_2(h_{ГВ}), \\
v_{суглинок} &= (45 - 25 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 7{,}5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}),
\end{aligned} \qquad (5.13)$$

Здесь коэффициенты 18, 23, 50, 45 – это максимальная влагоемкость песка, супеси, глины и суглинка соответственно. Для водоносного слоя грунта, каким обычно бывает песок, процентное содержание влаги в нем может быть 25 и более процентов.

Рассмотрим пример определения влажности для песка на глубине h=5.2м (точка x1, рисунок 5.9) , при этом грунтовые воды находятся на уровне $h_{угв}$=5м. Рассчитывается $h_{гв}=|h- h_{угв}|$=0.2м, что соответствует терму «близко», т.к. $0 \le h_{ГВ} \le 0.8h_{КП}$ с ФП $\mu_1(h_{ГВ})=1$ и $\mu_2(h_{ГВ})=0$, влажность $\nu_{песок}=(18-27h_{гв})\cdot 1=12.6\%$. Если же высота залегания слоя песка составляет h=5.8м (точка x2), то $h_{гв}$=0.8м, $\mu_1(h_{ГВ})=0$ и $\mu_2(h_{ГВ})=1$, то в этом случае его влажность будет составлять ν=4.5%. Если же слой песка находится на глубине h=5.47м (точка x), то $h_{гв}$=0.47м, то эта точка лежит на интервале переключения $0.8h_{КП} \le h_{ГВ} \le h_{КП}$. Следовательно, функции принадлежности $\mu_2(h_{ГВ}) = \frac{h_{ГВ} - 0.8 \cdot h_{КП}}{0.2 \cdot h_{КП}} = 0.7$, а $\mu(h_{гв})$=0.3 и по (5.13) влажность будет составлять ν=4.7%.

Были произведены расчеты *ν* по (5.13) для ряда геологоразведочных скважин в районе Павлодарской области. На рисунке 5.10 представлены: экспериментальные данные, обозначенные маркерами ♦, ■и △(скважина 704 от 06.01.2007г.), и кривая, полученная по (5.28) для трех слоев, через которые проходила скважина (супесь, песок и глина). Причем, слой песка для данной скважины является водоносным, поэтому реальные данные по влажности песка на графике проходят выше смоделированной кривой. Этим же и объясняется резкий подъем влажности грунта супесь. Уровень грунтовых вод – 3.8м.

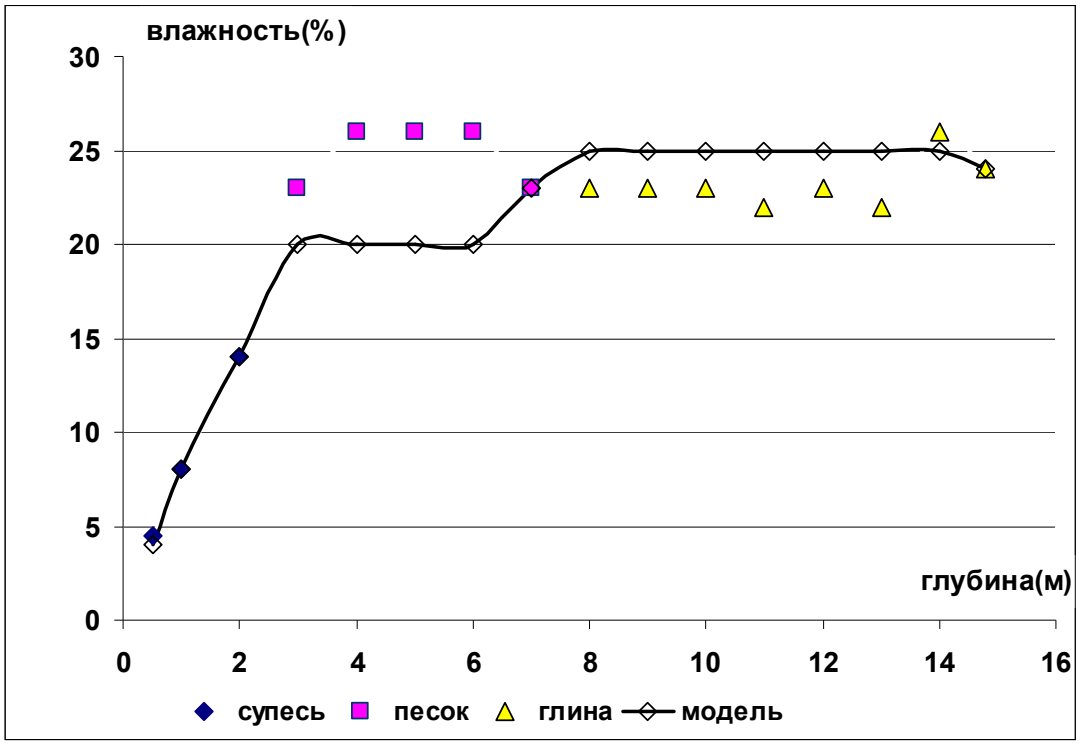


Рисунок 5.10 – Смоделированная зависимость влажности от глубины и реальные значения по данным геологоразведки (ТОО «Изыскатель»). Глубина грунтовых вод – 3.8м

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 α =0.05).

Таким образом, зная количество слоев, их вид и глубину залегания грунтовых вод, с помощью модели (5.13) получаем влажность грунта в любое время года на глубинах ниже 1м. Погрешность моделирования влажности не превышает 20% для сухих грунтов и 10% – для влажных.

5.5 Расчет заземлений на основе нечеткой модели ρ

На основе разработанных нечетких моделей предоставляется возможность для более точного расчета устройств заземления. Для решения этой задачи была разработана программа, алгоритм которой описан в параграфе 7.4. Решение

упомянутой выше задачи достигается посредством более точного определения удельного электрического сопротивления грунта в конкретной местности.

Перед проектированием ЗУ всегда выполняются изыскательские работы, во время которых определяется количество слоев грунта, их вид, мощность, наличие грунтовых вод, их уровень и засоленность.

В метеослужбе региона берутся данные по среднемесячной температуре, уровню осадков и силе ветра за последний год (количество статистики может быть увеличено). Такие данные могут предоставить и собственные метеослужбы (крупные предприятия их имеют). Эти данные вводятся в программу.

Расчет ρ слоев грунта выполняется по следующей методике:

– по метеоданным рассматриваемого региона, вводимым в программу, строятся зависимости:

а) изменения температуры слоев грунта (формулы 5.2-5.4);

б) изменения влажности в верхних слоях грунта (до 1м глубиной) (выражения 5.6-5.11).

– по данным геологического исследования определяются виды грунта, толщина их залегания и уровень грунтовых вод, и по этим данным строятся зависимости изменения влажности слоев грунта на глубинах ниже 1м (выражения 5.12 -5.13);

– по температурным изменениям в слоях, где будет располагаться проектируемое заземление, выбирается временной период, когда температура в этих слоях минимальна (по требованиям ПУЭ должен выбираться период, когда удельное электрическое сопротивление грунта максимально), и именно для этого временного периода определяется влажность грунта по упомянутым выше выражениям;

– с помощью выражений 4.8 – 4.11 для положительных значений температур и 4.12 – 4.14 для отрицательных температур определяются удельные электрические сопротивления слоев грунта необходимых для расчета сопротивления проектируемого вида заземляющего устройства.

Для расчета в программе требуется задать количество слоев грунта, которые имеются в месте расчета заземлений, их вид и толщину, а также усредненные

помесячные климатические данные за последние 12 месяцев (температуру, количество осадков и силу ветра). По этим данным идет расчет удельного электрического сопротивления слоев грунта на основе разработанных нечетких моделей.

Рисунок 5.11 иллюстрирует результат расчета с помощью нечетких моделей удельного электрического сопротивления ρ четырех слоев грунта на глубинах от 0м до 14м. Синяя сплошная линия характеризует изменение ρ вглубь от поверхности в декабре месяце.

Рисунок 5.11 – Изменение удельного электрического сопротивления грунта по глубине залегания в зависимости от его вида, температуры и влажности

На графике видно, что с глубиной температура растет, а ρ уменьшается. На уровне 2м от поверхности земли меняется вид грунта (верхний слой мощностью 2м – супесь), и, следовательно, изменяется удельное электрическое сопротивление. Следующий слой мощностью 6м – песок, за ним располагается слой глины (толщина слоя – 4м), нижний слой – супесь. На глубине 5.3м

начинается водоносный слой песка, поэтому значение удельного электрического сопротивления этого слоя близко к нулю, точнее 0.5Ом·м.

Изменение удельного электрического сопротивления в марте, в период активного снеготаянья характеризует график, изображенный зеленой линией с маркерами. Рисунок 5.11 хорошо иллюстрирует падение ρ верхнего слоя земли практически до нуля в начале весны (зеленая линия с маркерами) и возрастание ρ верхнего слоя земли в декабре, когда температура устойчиво держится ниже нуля (синяя сплошная линия).

Расчет заземляющих устройств ведется по известным формулам [80,81] (1.31–1.33). При расчете ЗУ пользователь имеет возможность выбрать тип заземления из четырех возможных конструкций: 1) простой вертикальный, 2) простой горизонтальный, 3) конструкция соединенных вертикальных электродов, 4) сетка.

Каждый из типов заземлений рассчитывается в зависимости от глубины установки (на рисунке 5.12 глубина установки – 0.6м), взаимного расположения и геометрических размеров его элементов.

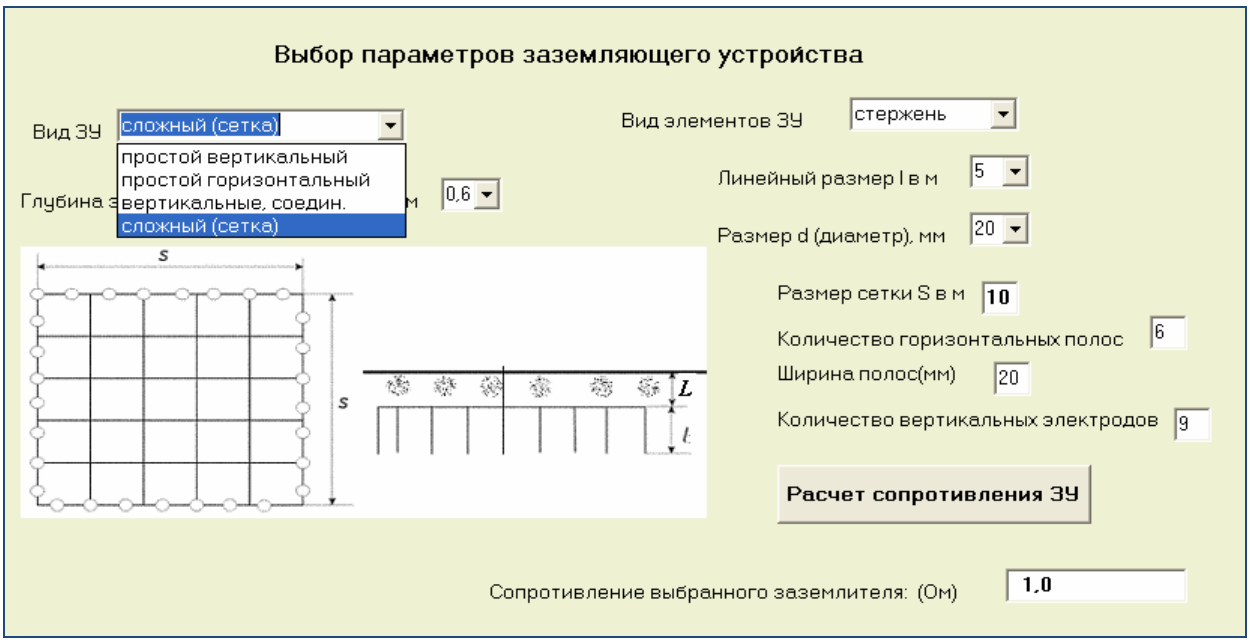


Рисунок 5.12 – Интерфейс выбора проектируемого вида заземляющего устройства и результат расчета его сопротивления

После расчета выбранного вида заземления можно на основании разработанных моделей проанализировать изменение его сопротивления в зависимости от времени года, а так же от глубины закладки.

5.6 Определение напряжения прикосновения и шага на основе предлагаемой модели удельного электрического сопротивления грунта

На основании разработанных нечетких моделей удельного электрического сопротивления грунта предлагается рассчитывать напряжение прикосновения и шаговое напряжение. Дело в том, что 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.

Разработанные нечеткие модели ρ слоев грунта с учетом климатических условий позволяют учесть это явление и выполнить расчет напряжения прикосновения и шагового напряжения с большей точностью. Ввиду большой вычислительной и алгоритмической сложности модели для ее реализации была разработана программа. Расчет потенциала, образовавшегося на поверхности земли, идет по известным формулам [80,81,84], но при этом учитывается многослойность земли и различное удельное электрическое сопротивление этих слоев.

Так, например, современные континентальные осадки имеют удельное сопротивление 1-3 Ом·м [80], а в промышленных зонах удельное сопротивление талых вод и осадков меньше 1 Ом·м. Исходя из этих величин, в программе с использованием нечетких моделей выполняется расчет распространения потенциала по поверхности земли от места его входа.

При однофазном замыкании на землю определяется ток [84]:

$$I_з = \frac{U_ф}{R_0 + R_{конт}}, \qquad (5.14)$$

где $U_ф$ – напряжение фазы, R_0 – сопротивление заземления нейтрали, $R_{конт}$ – сопротивление растеканию тока в месте контакта.

Для расчета потенциала поверхности земли, для удаленной на расстояние x метров точки от заземления используется формула [84]:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \qquad (5.15)$$

где ρ – удельное сопротивление земли (1 Ом·м при обильных дождях и активном снеготаянье), x – расстояние от места входа потенциала, l – величина слоя, имеющего сопротивление ρ.

Опасным напряжением считается 36в, которое может быть снижено при ряде условий. Таким образом, из выражений 5.28 и 5.30 в программе определяется опасное расстояние для работающего персонала. На рисунке 5.13 представлен расчет изменения потенциала на поверхности земли при замыкании фазы на землю во время сильного увлажнения ее поверхности.

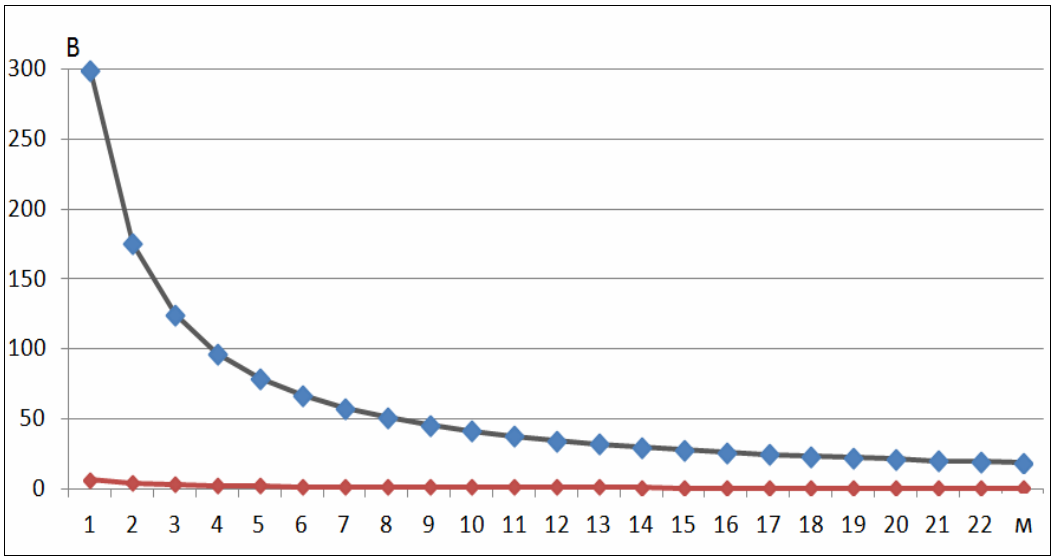


Рисунок 5.13 – Изменение потенциала на поверхности земли в случае замыкания фазы на землю в период активного снеготаянья (верхняя кривая) и в период без обильной влаги

Из учета того, что длина шага 0.8м, опасным расстоянием от заземления 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 (см. рисунок 5.13).

5.7 Выводы

1. Удельное электрическое сопротивление грунта ρ колеблется в широких пределах – от единиц и десятков до тысяч Ом на метр, так как зависит от множества факторов, основные из которых: вид грунта, его влажность, засоленость, температура и плотность. Грунты в природе залегают слоями и не являются исключительно «чистыми», то есть они содержат примеси различных видов. В течение года влажность и температура слоев грунта меняются под влиянием климатических условий и вглубь от земной поверхности. Все это вносит элемент неопределенности при расчете ρ любого вида грунта. Поэтому в качестве основного математического аппарата моделирования удельного сопротивления грунта целесообразно использование аппарата нечеткой логики.

2. В процессе разработки моделей на основе анализа данных метеостанций получены функции принадлежности и нечеткие интервалы для таких показателей как влажность слоев грунта под воздействием климатических факторов конкретной местности.

3. Предложенные нечеткие модели позволяют определить параметры грунта в любое время года и на любой глубине с достаточной для практики точностью. Решение на основании этих моделей дает более точные результаты ρ по сравнению с пересчетом с помощью поправочных коэффициентов [74,85].

4. Показано, что моделирование удельного электрического сопротивления ρ и других, оказывающих влияние на ρ показателей грунта с использованием нечеткой логики, позволяет уточнить вариацию этих величин в зависимости от

состава грунта и климатических условий [183]. Рассчитанное с помощью полученной модели значение ρ может быть использовано на стадии проектирования устройств заземлений для более точного его расчета, который ранее делался с большим запасом.

5. Разработана программа расчета заземлений любой конструкции и напряжений прикосновения и шаговых напряжений на основе предлагаемых моделей. При создании систем оповещения при включении этой программы в состав АСУ современных предприятий эти модели позволят повысить безопасность при работе на энергоустановках во время аварий.

6. В программе есть возможность построить графики изменения удельного электрического сопротивления слоев грунта по глубине залегания, а также изменения сопротивления устройств заземления в течение года.

6 Экономическое обоснование предлагаемых моделей для электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств

6.1 Постановка задачи

1. Для расчета экономического эффекта от предлагаемой динамической модели энергопотребления ЭТК непрерывного энергоемкого производства необходимо:

– проанализировать существующие методики расчета по использованию электроэнергии потребителей розничного и оптового рынка с присоединенной мощностью более 750кВт, к которым относится и гидрохимическое производство глинозема,

– выбрать формулы расчета экономического эффекта от заблаговременного расчета величины почасового энергопотребления, которая должна указываться при составлении договора на поставку электроэнергии,

– рассчитать экономический эффект от применения предлагаемой модели при изменении основных технологических параметрах при текущих ценах на электроэнергию.

2. Для определения экономического эффекта расчета параметров заземлений на основе предлагаемых моделей удельного электрического сопротивления грунта необходимо:

– выполнить расчет заземления при его проектировании по существующей методике и по предлагаемой;

– произвести сравнение затрат по используемому материалу на одно заземление.

3. Для расчета экономического эффект от внедрения разработанной программы, основанной на предлагаемых моделях определения влажности и температуры грунта и дающей возможность определить его ρ в любое время года без трудоемких измерений на глубине, интересующей проектировщиков, необходимо выполнить анализ существующих экономических методик и

выполнить расчет за счет освобождения персонала от трудоемких измерений.

6.2 Расчет экономической эффективности от внедрения динамической модели прогнозирования электропотребления

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 помесячной разбивкой и почасовой детализацией.

В ходе планирования энергопотребления может производиться корректировка почасовых объёмов при условии соблюдения установленного договором регламента информационного обмена между предприятием и поставщиком электроэнергии (приложение №8 к договору покупки электроэнергии) и компенсации последнему стоимости отклонений фактических почасовых объёмов по [1-8].

В современных условиях предприятия имеют возможность выбора на рынке среди большого количества поставщиков сырья различного качественного состава и цены. При выборе видов сырья оптимального сочетания с точки зрения себестоимости выпускаемой продукции, неизбежно возникают ситуации изменения технологических параметров (например, поступление сырья с более высоким содержанием извлекаемого вещества), что в конечном итоге приводит к уменьшению или увеличению потребления электроэнергии.

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

Потребители розничного рынка с присоединенной мощностью более 750 кВА (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 [7]

$$S_{откл} = \sum_{i}^{m} S_i^{откл}, \qquad (6.1)$$

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

$$S_i^{откл} = \begin{cases} (V_i^{факт} - V_i) \times I_i \times (k_{пов} - 1), \text{если} \dfrac{V_i^{факт} - V_i}{V_i} > 0.02 \\ (V_i - V_i^{факт}) \times I_i \times (1 - k_{пониж}), \text{если} \dfrac{V_i - V_i^{факт}}{V_i} > 0.02 \\ 0, \text{если} \left| \dfrac{V_i - V_i^{факт}}{V_i} \right| \le 0.02 \end{cases} \quad (\text{руб}) \qquad (6.2)$$

где V_i – договорной объем потребления электроэнергии;

$V_i^{факт}$ – фактический объем, I_i – стоимость в объемах планового потребления;

$k_{пов}$ – коэффициент, рассчитываемый по формуле 6.3;

$k_{пониж}$ – коэффициент, рассчитываемый по формуле 6.4.

$$k_{пов} = \begin{cases} 1{,}00, & \text{если } \dfrac{V_i^{факт} - V_i}{V_i} \le 0.02 \\ 1{,}5, & \text{если } 0.02 < \dfrac{V_i^{факт} - V_i}{V_i} \le 0.05 \\ 1.75, & \text{если } 0.05 < \dfrac{V_i^{факт} - V_i}{V_i} \le 0.10 \\ 2.00, & \text{если } \dfrac{V_i^{факт} - V_i}{V_i} > 0.10 \end{cases} \qquad (6.3)$$

$$k_{\text{пониж}} = \begin{cases} 1{,}00, & \text{если } \dfrac{V_i^{\text{факт}} - V_i}{V_i} \geq -0.02 \\ 0.45, & \text{если } -0.05 \leq \dfrac{V_i^{\text{факт}} - V_i}{V_i} \leq -0.02 \\ 0.35, & \text{если } -0.10 \leq \dfrac{V_i^{\text{факт}} - V_i}{V_i} < -0.05 \\ 0.25, & \text{если } \dfrac{V_i^{\text{факт}} - V_i}{V_i} < -0.10 \end{cases} \quad (6.4)$$

Считая, что тариф на электроэнергию для диапазона присоединения СН-I 1.3833 руб/кВт·час (коэффициент оплаты мощности в дневную зону суток 0,00363083078), и при условии договора представлять изменение энергопотребления не позднее, чем за 2 суток, вычислим эффект от применения предлагаемого инструментария при изменении ряда технологических параметров. При этом учтем, что для данного нелинейного инерционного производства при изменении технологических параметров переходной процесс полностью заканчивается через 5 суток, а значение энергопотребления для его оценки установится через 2 суток. Поэтому необходимо рассчитать величину стоимости отклонений фактического объема потребления электроэнергии от договорного по формуле (6.2) с учетом того, что с 1 января 2012 года $V_i = 0$.

Расчет экономического эффекта от применения предлагаемой динамической модели прогнозирования электропотребления (см. таблицу 6.1) произведем на примере затрат электроэнергии при изменении режимного технологического параметра алюминатного модуля М3. Например, при изменении этого технологического параметра на +6% происходит увеличение энергопотребления на 17.1% (см. рисунок 2.17). Для этого варианта $k_{\text{пов}}$ будет изменяться от 1 до 2, то есть принимать значения 1 при отличии от договорного объема менее или равному 2%, 1.5, если отличие более 2% и менее 5%, 1.75, если отличие более 5% и менее 10% и 2, если превышение энергопотребления более 10% относительно договорного объема (формула (6.3)).

Таблица 6.1 – Энергопотребление и стоимость отклонений от договорного его объема при изменении алюминатного модуля M_3 на +5%

Часы	1-е сутки		2-е сутки		Стоимость с применением инструментария (руб)	
	Энергопо-требление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышен.) (руб)	Энергопо-требление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышен.) (руб)	1-е сутки	2-е сутки
1	200	0	224,88	311088,8	276660	311088,8
2	200	0	225,19	311511,48	276660	311511,48
3	200	0	225,5	311934,15	276660	311934,15
4	203,33	0	225,81	312356,83	281271	312356,825
5	206,67	142941	225,84	312410,62	285882	312410,62
6	210	145246,5	225,88	312464,42	290493	312464,42
7	213,33	221328	225,92	312518,21	295104	312518,21
8	216,67	224786,25	225,96	312572,01	299715	312572,01
9	220	228244,5	226	312625,8	304326	312625,8
10	220,31	304748,68	226,04	312679,6	304748,68	312679,6
11	220,61	305171,35	226,08	312733,39	305171,35	312733,39
12	220,92	305594,03	226,12	312787,19	305594,025	312787,19
13	221,22	306016,7	226,16	312840,98	306016,7	312840,98
14	221,53	306439,38	226,19	312894,78	306439,38	312894,78
15	221,83	306862,05	226,23	312948,57	306862,05	312948,57
16	222,14	307284,73	226,27	313002,37	307284,73	313002,37
17	222,4444	307707,4	226,27	313002,37	307707,4	313002,37
18	222,75	308130,08	226,27	313002,37	308130,07	313002,37
19	223,06	308552,75	226,27	313002,37	308552,75	313002,37
20	223,36	308975,43	226,27	313002,37	308975,43	313002,37
21	223,67	309398,1	226,27	313002,37	309398,1	313002,37
22	223,97	309820,78	226,27	313002,37	309820,78	313002,37
23	224,28	310243,45	226,27	313002,37	310243,45	313002,37
24	224,58	310666,13	226,27	313002,37	310666,13	313002,37
	Итого за 2 суток стоимость отклонений: 13081545руб				Итого: 14705770,08руб	

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 энергоснабжающей организации, помимо предварительно рассчитанных обязательств по договору поставки электроэнергии, стоимость отклонений фактического потребления, равную 13081545руб., рассчитываемую по первой из формул (6.1). На рисунке 6.1 показано графическое представление расчета.

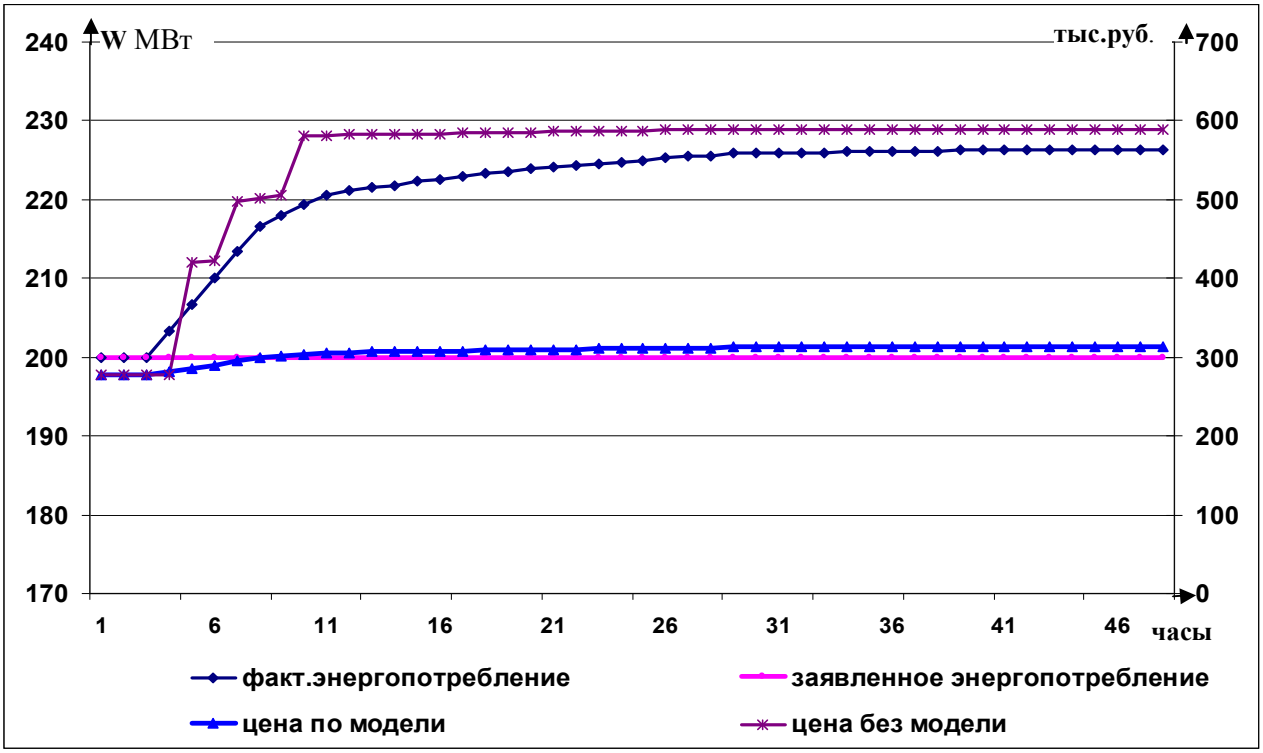


Рисунок 6.1 – Энергопотребление и его стоимость при отклонении от договорного объема при изменении параметра производства М3 (алюминатного модуля) на +5% без применения модели почасового прогнозирования ( ) и с применением этой модели( )

В итоге предприятие должно уплатить 26361225,33 руб., так по договору оно должно было за 2 суток 13279680 руб. Если заранее был бы представлен график изменения энергопотребления, то стоимость электроэнергии составила бы 14705770,08руб. В результате экономический эффект от использования предложенного инструментария составляет:

26361225,33 – 14705770,08=11655455,25 рублей

При уменьшении алюминатного модуля М3 на 5% энергопотребление производства снижается на 11.8% (см. рисунок 2.17). Для этого варианта $k_{пониж}$=[0.25 - 0.75], $S_{откл}$= 8015912руб. расчет за 2 суток.

В результате предприятие должно уплатить 21295592руб., (по договору сумма оплаты=13279680 руб.), а при заранее оговоренной нагрузке сумма оплаты составит 11934467руб. Экономический эффект:21295592–11934467=9361125 рублей. Данные по расчету сведены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Энергопотребление и стоимость отклонений от договорного его объема при изменении алюминатного модуля M_3 на -5%

Часы	1-е сутки		2-е сутки		Стоимость с применением инструментария (руб)	
	Энергопотребление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышен.) (руб)	Энергопотребление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышение) (руб)	1-е сутки	2-е сутки
1	200	0	175,79	182377,2	276660	182372,8
2	200	0	175,79	182377,2	276660	182372,5
3	200	0	175,78	182377,2	276660	182371,9
4	197,5	0	175,78	182377,2	273201,8	182371,4
5	195	121384,6	175,78	182377,2	269743,5	182370,5
6	192,5	173085,4	175,78	182377,2	266285,3	182368,5
7	190	197120,3	175,78	182377,2	262827	182367,4
8	187,5	194526,6	175,78	182377,2	259368,8	182366,3
9	185	191932,9	175,78	182377,2	255910,5	182362,2
10	182,5	189339,2	175,77	182377,2	252452,3	182357
11	180	186745,5	175,77	182377,2	248994	182354,9
12	178,12	184779,8	175,76	182377,2	246373	182350,8
13	177,89	184561,3	175,76	182377,2	246081,8	182347,6
14	177,68	184342,9	175,76	182377,2	245790,6	182346,6
15	177,47	184124,5	175,76	182377,2	245499,3	182344,5
16	177,26	183906,1	175,75	182377,2	245208,1	182341,4
17	177,05	183687,7	175,75	182377,2	244916,9	182339,3
18	176,84	183469,3	175,75	182377,2	244625,7	182336,2
19	176,63	183250,8	175,750	182377,2	244334,5	182336,2
20	176,42	183032,4	175,750	182377,2	244043,2	182336,2
21	176,21	182814	175,750	182377,2	243752	182336,2
22	176	182595,6	175,750	182377,2	243460,8	182336,2
23	175,79	182377,2	175,750	182377,2	243169,6	182336,2
24	175,79	182377,2	175,750	182377,2	243169,6	182336,2
	Итого за 2 суток стоимость отклонений:8015912 руб				Итого: 9361125 руб	

При изменении извлечения A_2O_3 из боксита на +10% происходит увеличение энергопотребления на 18.4% (см. рисунок 2.19). Для этого варианта $k_{пов}$=[1.5 -1.75] (формула (6.3)). Стоимость отклонений фактического потребления равна: 9380360руб. По расчету предприятие должно уплатить 22660040руб., (по договору – 13279680 руб.), а при заранее оговоренной нагрузке – 14279744руб. Экономический эффект: 22660040-14279744=8380296 руб. Данные по расчету сведены в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Энергопотребление и стоимость отклонений от договорного его объема при увеличении извлечения A_2O_3 из боксита на +7%

Часы	1-е сутки		2-е сутки		Стоимость с применением инструментария (руб)	
	Энергопотребле-ние (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышен) (руб)	Энергопотребление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превышен.) (руб)	1-е сутки	2-е сутки
1	200	0	217,7333	225892,9	276660	301190,5
2	200	0	217,8444	226008,2	276660	301344,2
3	200	0	217,9556	226123,4	276660	301497,9
4	201,64	0	218,0667	226238,7	278928,6	301651,6
5	203,28	0	218,1778	226354	281197,2	301805,3
6	204,92	141732,9	218,2889	226469,3	283465,8	301959
7	206,56	142867,2	218,4	226584,5	285734,4	302112,7
8	208,2	144001,5	218,5111	226699,8	288003,1	302266,4
9	209,84	145135,8	218,5778	226769	290271,7	302358,6
10	211,48	219405,2	218,6111	226803,6	292540,3	302404,8
11	213,12	221106,7	218,6444	226838,1	294808,9	302450,9
12	214,76	222808,1	218,6778	226872,7	297077,5	302497
13	216,4	224509,6	218,7111	226907,3	299346,1	302543,1
14	216,5111	224624,9	218,7444	226941,9	299499,8	302589,2
15	216,6222	224740,1	218,7778	226976,5	299653,5	302635,3
16	216,7333	224855,4	218,8111	227011,1	299807,2	302681,4
17	216,8444	224970,7	218,8111	227011,1	299960,9	302681,4
18	216,9556	225086	218,8111	227011,1	300114,6	302681,4
19	217,0667	225201,2	218,8111	227011,1	300268,3	302681,4
20	217,1778	225316,5	218,8111	227011,1	300422	302681,4
21	217,2889	225431,8	218,8111	227011,1	300575,7	302681,4
22	217,4	225547,1	218,8111	227011,1	300729,4	302681,4
23	217,5111	225662,3	218,8111	227011,1	300883,1	302681,4
24	217,6222	225777,6	218,8111	227011,1	301036,8	302681,4
	Итого за 2 суток стоимость отклонений: 9380360 руб				Итого: 14279744руб	

При уменьшении извлечения A_2O_3 из боксита на -7% энергопотребление производства снижается на 11.8% (см. рисунок 2.19). Для этого варианта $k_{пониж}$=[1-0.35] (формула (7.4)) и $S_{откл}$=7081284руб. (рассчитано по средней из формул (7.1)) итоговая сумма платежа=20360964руб. При заранее оговоренной нагрузке: 14569300руб.

Экономический эффект: 20360964 - 14569300= 5791664 рублей. Данные по расчету сведены в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Энергопотребление и стоимость отклонений от договорного его объема при уменьшении извлечения A_2O_3 из боксита на -7%

Часы	1-е сутки		2-е сутки		Стоимость с применением Инструментария(руб)	
	Энергопотребление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превыш.) (руб)	Энергопотребление (МВт·час)	Стоимость отклонений (превыш.) (руб)	1-е сутки	2-е сутки
1	200	0	179,3222	161236,7	276660	248056,4
2	200	0	179,1278	161061,8	276660	247787,5
3	200	0	178,9333	160887	276660	247518,5
4	197,2667	0	178,7389	160712,2	272879	247249,5
5	194,5333	148003,9	178,5444	160537,3	269098	246980,5
6	191,8	145924,3	178,35	160362,5	265316,9	246711,6
7	189,0667	169998,3	178,1556	160187,7	261535,9	246442,6
8	186,3333	167540,7	177,9611	160012,8	257754,9	246173,6
9	183,6	165083	177,9611	160012,8	253973,9	246173,6
10	182,2389	163859,2	177,9611	160012,8	252091,1	246173,6
11	182,0444	163684,4	177,9611	160012,8	251822,1	246173,6
12	181,85	163509,5	177,9611	160012,8	251553,1	246173,6
13	181,6556	163334,7	177,9611	160012,8	251284,1	246173,6
14	181,4611	163159,9	177,9611	160012,8	251015,2	246173,6
15	181,2667	162985	177,9611	160012,8	250746,2	246173,6
16	181,0722	162810,2	177,9611	160012,8	250477,2	246173,6
17	180,8778	162635,3	177,9611	160012,8	250208,2	246173,6
18	180,6833	162460,5	177,9611	160012,8	249939,3	246173,6
19	180,4889	162285,7	177,9611	160012,8	249670,3	246173,6
20	180,2944	162110,8	177,9611	160012,8	249401,3	246173,6
21	180,1	161936	177,9611	160012,8	249132,3	246173,6
22	179,9056	161761,2	177,9611	160012,8	248863,4	246173,6
23	179,7111	161586,3	177,9611	160012,8	248594,4	246173,6
24	179,5167	161411,5	177,9611	160012,8	248325,4	246173,6
	Итого за 2 суток стоимость отклонений: 7081284 (руб)				Итого:14569300(руб)	

Расчет эффективности предлагаемого инструментария [184] для остальных технологических параметров, изменение которых приводит к ощутимым изменениям потребления электроэнергии, сведены в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Экономическая эффективность применения предлагаемой модели для ряда технологических параметров

Технологический параметр	Изменение параметра	$k_{пов}$ / $k_{пониж}$	$S_{откл}$	S	S с планом	Эконом. эффект
Расход боксита	+10%	$k_{пов}$ = [1÷1,75]	9379829	22659509	14001048	22659509-14001048 = 8658461
Расход боксита	-10%	$k_{пониж}$ = [1÷0,35]	7163876	20443556	12366894	20443556-12366894 = 8076662
Концентрация щелочи В5	+4%	$k_{пониж}$ = [1÷0,45]	6505865	19785545	12928492	19785545-12928492 = 6857052
Концентрация щелочи В5	-4%	$k_{пов}$ = [1÷1,5]	6271097	19550777	13655827	19550777-13655827 = 5894950

Анализ значений, сведенных в таблицу, приводит нас к выводу, что применение разработанной модели прогнозирования электропотребления при изменении внешних воздействий позволяет составить заявку на потребление энергии заранее и таким образом избежать штрафных тарифов при оплате электроэнергии.

6.3 Экономическая эффективность модели поиска оптимального режима управления производством

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. Режимные параметры, при которых достигается такое уменьшение энергопотребления, были получены с помощью применения алгоритма оптимального оперативного управления и его программной реализации.

Если при поддержании режимных параметров на среднем допустимом уровне расход электроэнергии и пара на 1т готового продукта составляет

500КВт·час и 9.4 т соответственно, то экономия в 7% по электроэнергии составит 35 КВт·час, а при цене на электроэнергию 1.38 руб. /кВт час это будет 48.3 руб. на 1тонну глинозема. Полученная экономия пара в 11% (от 9.4 т на тонну готового продукта) составит примерно 1.034 т, а при стоимости пара 4800 руб./т. экономический эффект составит 4963 рубля на одну тонну глинозема, или при средней производительности завода в 200тонн в сутки:
(4963+48.3)*200=1002300(рублей в сутки), в том числе по электроэнергии – 9660руб/сутки.

6.4 Экономический эффект внедрения программы предупреждения опасных напряжений прикосновения и шага в случае аварийных ситуаций с электрооборудованием и сетями

Этот раздел посвящен расчету экономической эффективности определения ρ по предлагаемым моделям, примененным в программе «Расчет параметров заземляющих устройств», посредством сравнения затрат на измерение удельного сопротивления грунта и варианта с внедрением разработанной программы.

Эффективность [185,186] внедрения программы обусловливается действием ряда факторов организационного, информационного и экономического характера. Организационный эффект проявляется в освобождении работников от большого числа трудоемких измерений удельного сопротивления ρ грунта, уменьшению числа поездок на объекты, где необходимо его измерять, и, как следствие, уменьшения численности персонала. Информационный фактор эффективности выражается в повышении уровня информированности персонала, увеличивая тем самым время для проведения анализа и оценки эффективности принимаемых решений. Экономический фактор проявляется в уменьшении затрат на выполнение предусмотренных ПУЭ операций.

Рассчитаем временные затраты базового варианта, который представляет собой поездку на объект (около 1-3 часов в зависимости от его расположения), само измерение (2-3 часа) и составление актов измерения (около 2 часов), причем

этим занимаются два человека, в общем, приходится до 8 часов на один объект. Рассмотрим трудоемкость работ Тр организации до и после внедрения программы. Рабочее дневное время двух работников составит 8 часов. В одном месяце 22 рабочих дня. Тр с базовым вариантом составит 22·8=176 часов в месяц. Количество объектов зависит от числа заказов. Измерения проходят только в благоприятную погоду (в дождливую погоду измерения проводить запрещено по технике безопасности). Предполагается, что таких дней в месяце – 15. При использовании программы (полчаса на один объект) на 15 объектов приходится 7,5 часов (1 день) одного работника. Сравнительная оценка представляется в виде соотношения 15:1. Таким образом, внедрение программы позволит существенно увеличить эффективность работы за счет уменьшения временных затрат и уменьшения трудоемкости работ предприятия.

Затраты на заработную плату работников в год:

Общая сумма до внедрения

Зп = оклад · численность рабочих · количество месяцев

Средний оклад рабочего = 20000 руб., старшего рабочего - 25000 руб.

Зп =[20000(руб)·1(раб.)+25000(руб)·1(ст.раб.)]·12(мес.)= 540000руб.

Расчет стоимости оборудования и эксплуатационных расходов. Для измерения ρ используются электроизмерительные приборы (измерители сопротивления, тестеры грунта и устройств заземления) стоимости Ст=60000руб. Срок службы прибора Ссл=12 лет, ежегодная поверка прибора Пп=4500 руб. Общие затраты на прибор = Ст + Сл·Пп = 114000 руб. за 12 лет. Стоимость эксплуатации прибора в год составит:

Стпр=114000/12= 9500 руб.

Таким образом, полная себестоимость базового варианта:

Сбв = Зп+Стпр = 549500 руб.

Рассчитаем себестоимость программного продукта. Основная заработная плата вычисляется по формуле

$$Зо = T_{Ci} \cdot n \cdot t,$$

где T_{Ci} – тарифная ставка специалиста, (руб.); n – количество исполнителей, участвовавших в разработке программного продукта; t – количество времени затраченного на разработку программного продукта, месяцев.

Возьмем в качестве тарифной ставки средний оклад программиста – 30000рублей. Количество исполнителей – 1, количество времени затраченного на разработку программного продукта – 3 месяца.

Общие затраты за три месяца на основную заработную плату исполнителя будут равны: Зо = 30000·1·3 = 90000 руб.

Дополнительная заработная плата выражается в выплатах, предусмотренных законодательством о труде, и определяется по нормативу в процентах к основной заработной плате, вычисляется по формуле:

$$Зд = Зо \cdot Нд \text{ (руб.)},$$

где Нд – норматив дополнительной заработной платы на предприятии, %.

На предприятии норматив заработной платы принят в размере 25 %.

$$Зд = 90000 \cdot 25/100 = 22500 \text{ руб.}$$

Рассчитаем отчисления на социальные нужды по формуле

$$Зсз = (Зд + Зо) \cdot Нсз/100\% \text{ руб.},$$

где Нсз – норматив отчислений на социальные нужды, %.

Положим норматив отчислений в пенсионный фонд 10%. Тогда

$$Зсз=(90000+22500)\cdot 0,1=112500\cdot 0.1=11250 \text{ руб.}$$

Для разработки программы и ее эксплуатации необходимы технические средства. Определение затрат производится по договорным ценам (рыночным ценам действующим на момент приобретения). Результаты расчётов представлены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Перечень необходимого аппаратно-программного обеспечения

Наименование спецоборудования	Количество	Цена за единицу, (рублей)
Системный блок в сборе	1	18000
Монитор LG 18,5" (47см) 1366·768, 16:9, VGA., 5мс.	1	4500
Принтер HP Laser Jet 2130	1	4000
Итого по аппаратной части		26500
MS Office		8000
Windows XP		5000
Итого по программному обеспечению		13000
Итого: 39500		

Накладные расходы включают затраты, связанные с необходимостью содержания аппарата управления, вспомогательных хозяйств и опытных производств. Норматив накладных расходов применяется в размере 10%. Накладные расходы определяется по формуле

$$Рн = 39500 \cdot 0.1 = 3950 \text{ руб.}$$

Расчет эксплуатационных расходов производится на основе данных о стоимости оборудования, которые включают в себя: расходы на электроэнергию, амортизационные отчисления (амортизация – процесс перенесения стоимости основных фондов по мере их износа на производимый с их помощью продукт или на услуги) и прочие расходы на эксплуатацию, и содержание оборудования.

Норма амортизации – часть стоимости основных средств организации, выраженная в процентном соотношении годовой суммы амортизации к первоначальной стоимости основных фондов. Вычисляется по формуле

$$На = 100\% / Тс,$$

где Тс – срок службы оборудования, лет;

Срок службы компьютерной техники принят равным 5 лет. Следовательно, На=100% / 5 = 20%, и амортизационные отчисления составят за 3 месяца

$$А = 39500 \cdot 0.2 \cdot 3/12 = 1975 \text{ руб.}$$

Расчет затрат на электроэнергию вычисляют исходя из продолжительности разработки программного продукта, количества кВт/ч, затраченных на его

разработку и тариф за 1 кВт/ч по формуле

$$Э = Кэ \cdot Тр,$$

где Кэ – стоимость одного кВт/ч, рублей, Тр – количество кВт/ч.

Базовый тариф для прочих потребителей составляет 2,6 руб за 1 кВт/ч. Время реализации 3 месяца, среднее потребление энергии в месяц составило 80 кВт/ч, то есть было потреблено 240 кВт/ч. Рассчитаем затраты на электроэнергию по формуле: $Э = 2.6 \cdot 240 = 624$ рубля

К прочим расходам относят расходы на комплектующие, которые представлены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Расчёт затрат на покупные и комплектующие изделия

Наименование	Количество, штук	Цена за единицу, руб.	Сумма руб.
Заправка картриджа	1	150	150
Бумага	1	135	135
ИТОГО			285

Полученные результаты расчётов статей затрат сведены в таблицу 6.8.

Таблица 6.8 – Расчет плановой себестоимости программного продукта

Наименование статей	Сумма, руб.
Материальные затраты: покупные и комплектующие изделия (М)	285
Электроэнергия (Э)	624
Основная заработная плата исполнителей (Зо)	90000
Дополнительная заработная плата исполнителей (Зд)	22500
Отчисления на социальные нужды (Зсз)	11250
Амортизация (А)	1975
Накладные расходы (Рн)	3950
ИТОГО плановая себестоимость	130584

Плановая себестоимость разработки программы, согласно произведённым расчётам составила 130584 рубля.

Рассчитаем отпускную цену программного продукта по формуле

$$Оц = С+П,$$

где Оц – отпускная цена разработчика; П – прибыль; С – плановая себестоимость.

Прибыль рассчитывается по формуле

$$П = C \cdot R/100\%,$$

где R – уровень рентабельности, %.

Норму рентабельности примем на уровне 10%, так как разрабатываемый программный продукт представляет собой рисковое капитальное вложение, отсюда следует:

$$П = 130584 \cdot 0.1 = 13058.4 \text{ рублей}$$

Рассчитаем отпускную цену

$$Оц = 130584 + 13058.4 = 143642.4 \text{ рублей}$$

Вычислим стоимость программы с учетом НДС, которая представляет собой сумму отпускной цены и налога на добавленную стоимость и определяется по формуле

$$НДС = (С + П),$$

Ставка НДС /100 % (Ставка налога установлена в размере 12 %, начиная с 2010 года.)

$$НДС = 143642.4 \cdot 12 /100 \% = 17237.09 \text{ рублей}$$

Цена программного продукта с учетом НДС, представляет собой сумму отпускной цены и налога на добавленную стоимость

$$Оц с НДС = 143642.4 + 17237.09 = 160879.5 \text{ рублей}$$

Произведем вычисление экономического эффекта от внедрения программы с учетом того, что предприятие уже имеет компьютер, для офисной работы (то есть нет необходимости дополнительных затрат на его приобретение).

С внедрением разработанной программы расчет удельного электрического сопротивления сможет выполнять один работник. Поэтому общая сумма расходов за год составит

$$Свп=Зп + стоимость программы,$$

где Зп – заработная плата одного работника за год.

$$Зп = 20000 \cdot 1 \cdot 12 \text{ месяцев} = 240000 \text{ руб.}$$

Тогда общая сумма затрат в первый год эксплуатации составит

$$240000 + 160879.5 = 400879.5 \text{ рублей}$$

Ожидаемый экономический эффект только в первый год эксплуатации

$$Ээ=(Сбв – Свп)= 549500-400879.5=148620.5 \text{ рублей}$$

По результатам расчетов можно заключить, что внедрение программы «Расчет параметров заземляющих устройств» является экономически выгодным мероприятием.

Внедрение разработанной программы приводит к следующим изменениям: снижение затрат труда (в человеко-часах) (резкое уменьшение числа трудоемких измерений и обработке данных), сокращение численности персонала, получение более полной результативной информации и сокращение сроков ее обработки. Эти факторы, определяющие экономический эффект внедрения программы приводят к прямой экономической эффективности [185].

6.5 Расчет экономического эффекта от внедрения предлагаемой модели удельного электрического сопротивления грунта при проектировании заземлений

Для расчета эффективности предлагаемой методики при проектировании параметров заземления будем руководствоваться требованиями ПУЭ:

– для подстанции 110 кВ сопротивление растеканию токов должно быть не более 0.5 Ом (ПУЭ 1.7.90), но допускается его увеличение для песчаных грунтов до 10 Ом;

– при использовании опасного оборудования локальное заземление должно иметь сопротивление не более 10 Ом (ПУЭ 1.7.103);

– заземления молниеприемников должны иметь сопротивление не более 10 Ом (РД 34.21.122-87, п. 8).

На основании изложенного будем считать сопротивление заземления равным 10 Ом.

Расчет параметров заземления будем выполнять для вертикальных одиночных электродов (заземлителей) с приведением удельного электрического сопротивления слоев грунта к эквивалентному ρ. Имеется формула, применяемая в инженерном проектировании с достаточной для практики точностью [85]

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{4L}{d}\right) + 0.5\ln\left(\frac{4T + L}{4T - L}\right)\right], \qquad (6.5)$$

где R – сопротивление заземлителя, L- длина заземлителя, d – диаметр заземлителя, ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, в котором находится заземлитель, T – величина немного больше ½L. Для расчета принято: T=0.515L.

В результате выражение (6.5) приобретает вид

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{2L}{d}\right) + 0.5\ln\left(\frac{40.515 \cdot L + L}{40.515 \cdot L - L}\right)\right]. \qquad (6.6)$$

По этой формуле, задаваясь значением ρ и d , можно получить семейство кривых для определения длины заземлителя в зависимости от его сопротивления. При диаметре равном 20 мм и ряде значений ρ было построено семейство функций, вид которых представлен на рисунке 6.2.

Рассчитаем эквивалентное удельное электрическое сопротивление по значению, измеренному методом ВЭЗ в июле месяце на территории алюминиевого завода г. Павлодара (северо-восточный Казахстан): $\rho_1 = 400 Ом \cdot м$. Эквивалентное ρ определяется с помощью формулы [85]

$$\rho_{экв} = k_C \rho . \qquad (6.7)$$

Климатическая зона по данным [85] номер 1. Для этой зоны глубина слоя сезонных изменений – 2.4 метра. Показания снимались при обычной влажности, следовательно, $k_{C3} = 2.7$, а для вертикальных электродов длиною 5м $k_{экв,в} = 1.35$.

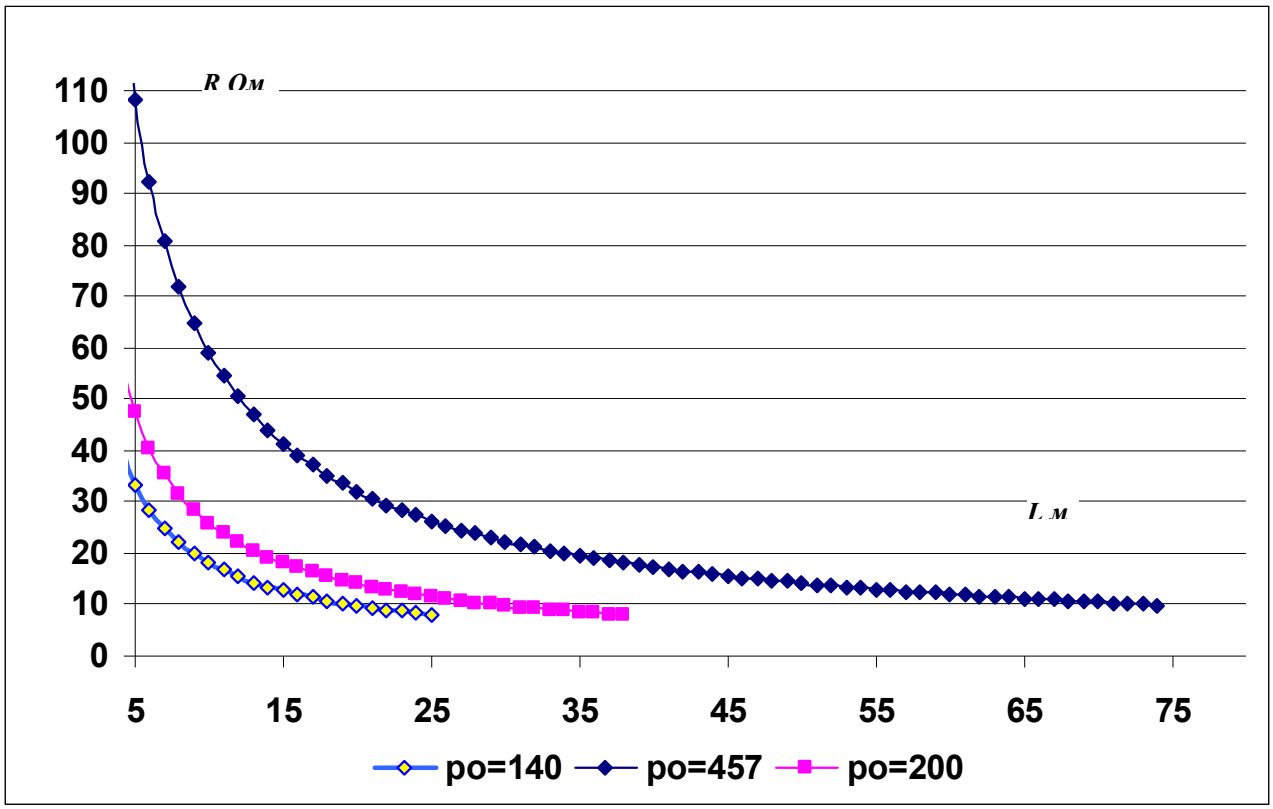


Рисунок 6.2 – Зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, построенные с помощью соотношения 6.6 при ρ=140, 457и 200Ом·м

При приведении к расчетным условиям параметров двухслойной электрической структуры земли принимаем во внимание, что мощность слоя сезонных изменений (h_C=2.4м) меньше мощности слоя (h_1=5м), найденного во время изысканий, проводившихся методом ВЭЗ, так как принят сезонный коэффициент для вертикальных электродов длиною в 5м. В этом случае расчет эквивалентного удельного электрического сопротивления будет выполняться по формуле [85]:

$$\frac{h_1}{\rho_{1экв}} = \frac{h_C}{k_C \rho_1} + \frac{h_1 - h_C}{\rho_1} \quad \Rightarrow \rho_{1экв} = \frac{k_C \rho_1 h_1}{k_C h_1 - h_C (k_C - 1)},$$

$$\rho_{1экв} = \frac{1.35 \cdot 400 \cdot 5}{1.35 \cdot 5 - 2{,}4 \cdot (1.35 - 1)} = 457 \text{ (Ом·м)}.$$

Строим зависимость сопротивления одиночного вертикального заземлителя от его длины при $\rho_{экв} = 457 Ом \cdot м$. Из рисунка 6.2 видно, что сопротивление 10 Ом достигается только при длине электрода 75м. Такой длины заземлитель смонтировать проблематично, поэтому произведем расчет заземления в виде соединенных в замкнутый контур одиночных электродов по формуле

$$R = \frac{R_1}{kN}, \tag{6.8}$$

где R_1 – сопротивление одиночного электрода (Ом), k – коэффициент использования, который учитывает влияние расстояния между электродами, N – количество электродов в заземлении (сопротивление соединительного заземляющего проводника не учитывается).

Если расстояние между электродами будет не менее глубины погружения электродов, то $k \approx 1$.

Произведем вычисление количества электродов по формуле

$$N = \left] \frac{R_1}{kR} \right[. \tag{6.9}$$

В качестве R_1 возьмем значение 110 Ом, которым будет обладать одиночный заземлитель длиной в 5м (рисунок 6.2): $N = \left] \frac{110}{1 \cdot 10} \right[= 11 (\text{электродов})$. На изготовление данного заземления пойдет нержавеющей стали

$$V = 11 \cdot \pi \cdot 0.02^2 \cdot 5 = 0.069 \cdot 7900 = 546 (\text{кг}).$$

Стоимость (без учета соединительного проводника) заземления, изготовленного из стального прута диаметром 20мм (сталь 13Х15Н4АМ3 ГОСТ 5632-61) при цене стали 155000 руб. за тонну: 155000·0.546=84632 руб.

На соединение 11-ти электродов, смонтированных в виде замкнутого контура в заземление, с учетом, что расстояние между электродами (возьмем 6 метров) должно быть не менее их длины, необходимо 6(м)·11=66 метров стальной полосы 5×30 мм. В результате на соединение уйдет $V = 66 \cdot 0.03 \cdot 0.005 = 0.0099(м^3)$ стали и в килограммах:

$$V = 0.0099 \cdot 7900 \approx 74(кг).$$

Стоимость стальной полосы на соединение электродов при цене 155000 руб. за тонну составит 11356 руб. Итого стоимость материалов на изготовление заземления

84632+11356=95987 руб.

Произведем аналогичный расчет с применением разработанных моделей ρ. Рассчитаем удельное электрическое сопротивление с помощью предлагаемой методики. На том участке, где проводился замер ρ, имеется грунт следующих видов: супесь (мощность слоя 1.8м), песок (мощность 2.5м), глина (мощность – 3.2м). Возьмем худший вариант: отсутствие грунтовых вод вблизи этих слоев грунта.

Выполним расчет влажности слоев по методике, описанной в разделе 5. В результате получается, что средняя влажность верхнего слоя супеси в феврале составляет 4%, влажность следующего слоя, находящегося вне зоны влияния климатических изменений и вдали от грунтовых вод берется средняя для песка – 4,5%, для глины – 18%.

При данной влажности и температуре 20^oC удельные электрические сопротивления этих слоев грунта, рассчитанные по формулам 5.7–5.8 будут следующие: супеси – 118 Ом·м, песка – 200 Ом·м, глины – 54 Ом·м.

Простроим графики изменения температур этих слоев в течение года с помощью предлагаемой модели, описанной в разделе 5. Известно, что для рассматриваемой климатической зоны самое высокое значение удельного электрического сопротивления при измерении его методом ВЭЗ наблюдается в середине февраля. Поэтому в качестве расчетного значения будем брать

температуру слоев на уровне 20 февраля, то есть по рисунку 6.3 это значение температур слоев при N=50 (N – номера дней в году).

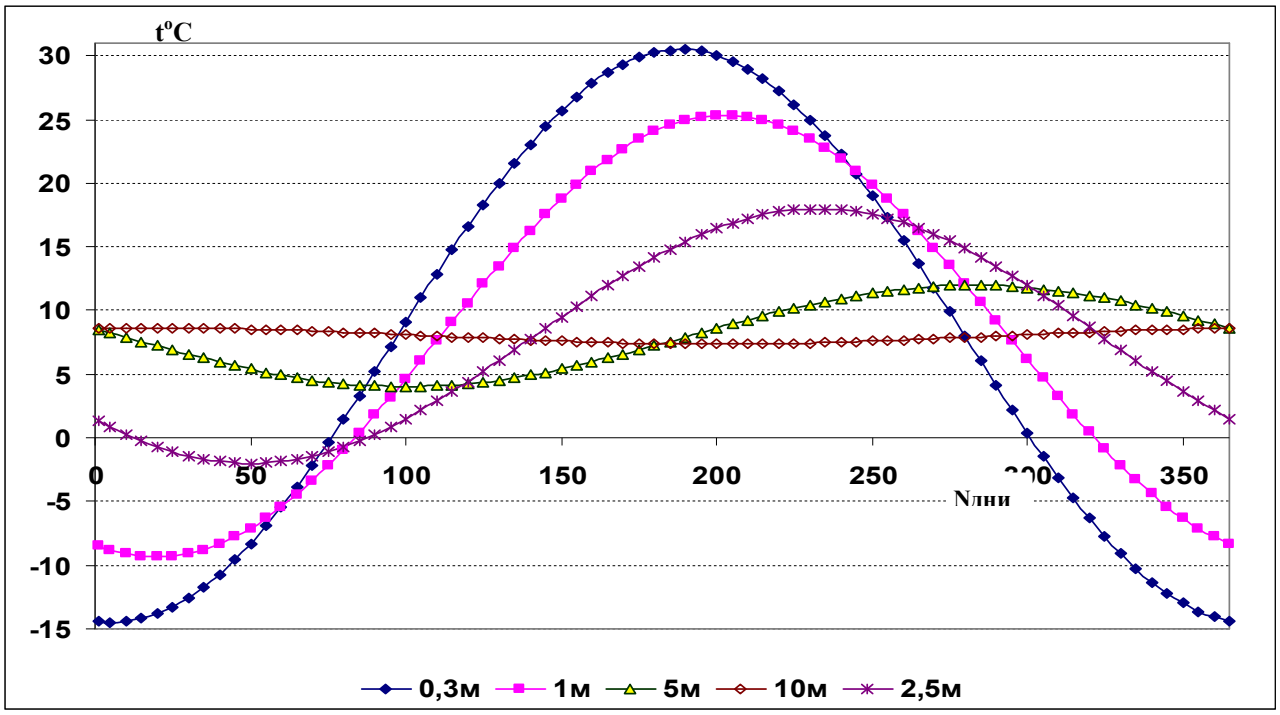


Рисунок 6.3 – Изменение температуры на глубинах 0.3, 1, 2.5, 5 и 10м в течение года

Простроив зависимости температуры от глубины залегания слоев грунта, получаем среднюю температуру для слоя грунта «супесь» в конце февраля: $-7^{o}\mathrm{C}$, для слоя «песок»: на глубину 1 метр этого слоя распространяется отрицательная температура $-2^{o}\mathrm{C}$, следующие 1.5 метра имеют уже положительную температуру, средняя величина которой: $+2.4^{o}\mathrm{C}$, слой «глина» имеет температуру $+6.8^{o}C$.

Рассчитаем удельное электрическое сопротивление этих слоев грунта по формулам раздела 5.3. Для слоев с отрицательной температурой определяем ρ при $0^{o}\mathrm{C}$: $\rho = \rho_{20} \cdot e^{-0.022 \cdot (0-20)}$. Для супеси $\rho_{0С}$=183 Ом·м, $\rho_{0П}$=310 Ом·м.

Величина скачка при переходе от $0^{o}\mathrm{C}$ к $-1^{o}\mathrm{C}$ для супеси

$$\rho_{\mathrm{C}}^{1} = \rho_{\mathrm{C}}^{0}(0.024 \cdot \nu^{2} - 0.022 \cdot \nu + 0.2) = 183 \cdot (0{,}024 \cdot 4^{2} - 0.02 \cdot 4 + 1.2) = 274 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

для песка

$$\rho_{\mathrm{П}}^{1} = \rho_{\mathrm{П}}^{0}(-0{,}03\nu^{2} + 0.86\nu - 1.9) = 310 \cdot (-0.03 \cdot 4{,}5^{2} + 0.86 \cdot 4 - 1.9) = 422 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

При температуре $-7^{o}\mathrm{C}$ супесь имеет удельное электрическое сопротивление:

$\rho_{\mathrm{C}} = \rho_{\mathrm{C}}^{1} \cdot 0.88^{(t+1)} = 274 \cdot 0{,}88^{(-7+1)} = 590\,\mathrm{Ом \times м}$, песок при температуре $-2^{o}\mathrm{C}$:

$\rho_{\mathrm{П}} = \rho_{\mathrm{П}}^{1} \cdot 0.87^{(t+1)} = 422 \cdot 0{,}87^{(-2+1)} = 486\ \mathrm{Ом \times м}$.

Песок при температуре $+2^{o}\mathrm{C}$ (мощность слоя 1.5 м) имеет $\rho_{\mathrm{П}}$=297 Ом·м , а глина при $+6.8^{o}C$ $\rho_{\mathrm{ГЛ}}$=72 Ом·м. Рассчитаем эквивалентную проводимость

$$\frac{590}{1.8} + \frac{486}{1.0} + \frac{297}{1.5} + \frac{7.5}{3.2} = 7.29\,.$$

Отсюда эквивалентное сопротивление:

$$\mathrm{Rэкв} = 137\ \mathrm{Ом \times м} \approx 140\,\mathrm{Ом \times м}\,.$$

Простроив зависимость (6.6) при тех же параметрах и данном ρ (рисунок 6.2) получаем, что сопротивления в 10 Ом можно достигнуть при величине заземляющего электрода уже в 22м. Применив методику, описанную выше, рассчитаем заземление, состоящее и нескольких электродов. Электрод, длиною в 5м при $\rho = 140\mathrm{Ом \times м}$ будет иметь сопротивление 33 Ом. Округлим эту величину до 40 и по формуле (6.9) получим количество $\mathrm{электродов} = 4$ (на их изготовление уйдет 198,5 кг металла). То есть при той же цене на материал для изготовления электродов будет затрачено 30775руб.

На соединение 4-ти электродов, смонтированных в виде замкнутого контура в заземление необходимо 6(м)·4=24 метра стальной полосы 5×30 мм. В результате, на соединение уйдет $V = 24 \cdot 0.03 \cdot 0.005 = 0.0036(\mathrm{м}^3)$ стали и в килограммах $V = 0.0036 \cdot 7900 \approx 26.6(\mathrm{кг})$. Стоимость стальной полосы на соединение электродов при цене 155000 руб. за тонну составит 4129 руб. Итого стоимость материалов на изготовление заземления

30775+4129=34904 рублей.

Экономический эффект от применения предлагаемой методики только по материалу на изготовление одного заземления составит:
95987-34904=61083 руб., а в металле – 394 кг.

Это же заземляющее устройство можно изготовить в виде электродов, смонтированных в одну линию. Тогда стальной полосы, выполняющей соединение понадобится не 24, а 18 метров, следовательно, стоимость материалов такого заземления будет 3097 руб., то есть экономический эффект в этом случае равняется 62115 руб. на одно заземление (в металле – 396 кг).

6.6 Выводы

1. Потребители розничного рынка с присоединенной мощностью более 750кВт и, к которым относится и гидрохимическое производство глинозема, должны в ежегодно обновляемых договорах на покупку электроэнергии указывать (на очередной год) объем потребляемой электрической энергии (мощности) с помесячной разбивкой и почасовой детализацией. Предлагаемая программа позволит заранее рассчитать величину энергопотребления, как его месячный объем, так и почасовой, при различных концентрационных режимах производства, облегчая тем самым, составление такого договора.

2. Предлагаемый инструментарий производит расчет энергопотребления данного производства при заданных режимных параметрах и динамику его изменения при переходе на новые технологические режимы, что позволит во время представить изменения графиков почасового энергопотребления и тем самым уменьшить оплату за потребление электроэнергии.

3. Определены технологические параметры гидрохимического производства глинозема, при изменении которых в незначительных пределах происходит значительное изменение энергопотребления, и рассчитан экономический эффект применения предлагаемой модели, который при тарифе на электроэнергию для диапазона присоединения СН-I (1.3833руб/кВт·час) составляет для глиноземных производств средней мощности составляет от 5791664(руб) (при уменьшении извлечения A_2O_3 из боксита на 7%) до 11655455,25 рублей (при изменении алюминатного модуля M_3 на +5%).

4. Предлагаемый алгоритм, использующий разработанные методы

определения влажности и температуры грунта, дает возможность определить его ρ в любое время года без трудоемких измерений на глубине, интересующей проектировщиков заземляющих устройств.

5. Экономический эффект расчета параметров заземлений на основе предлагаемых моделей только по используемому материалу составляет 62115 рублей на одно заземление.

6. Программа, основанная на предлагаемых моделях, позволяет рассчитать сопротивления простых и сложных ЗУ в течение года в однородном, двухслойном и многослойном грунтах.

7. Внедрение разработанной программы позволит за счет освобождения персонала от трудоемких измерений удельного сопротивления грунта получить экономический эффект только в первый год эксплуатации 148620,5 рублей.

8. Приводимый в настоящей главе расчет экономической эффективности предлагаемых моделей и методов представляет собой экспертную оценку, так как документа, подтверждающего приводимые в данной главе расчеты экономической эффективности, получить не удалось. В приложении к диссертации содержатся акты о внедрении разработанных моделей и методов, являющиеся косвенным подтверждением их экономической эффективности.

7 Программные реализации предлагаемых моделей

7.1 Постановка задачи

1. Предлагаемая модель прогнозирования электропотребления ЭТК непрерывного нелинейного производства построена на основе имитации определяющих технологических процессов, которые описываются уравнениями материального баланса. Кинетика преобразования вещества основного продукта из жидкого состояния в твердое описывается дифференциальным уравнением первого порядка. При этом для имитации реальных процессов, проходящих в технологических участках, необходимо организовать моделирование с последовательным расчетом значений по каждому блоку-технологическому переделу. Расчет по данной модели весьма сложен даже при использовании специальных пакетов. Поэтому необходима разработка программы, реализующей данную модель.

2. Расчеты по означенной выше модели должны включать решение систем нелинейных уравнений. В связи с этим, необходимо преобразовать эти системы уравнений для пригодности их решения с помощью численных методов и выполнить это решение с помощью реализации в виде программы.

3. Модель имеет в своем составе дифференциальные уравнения, а для их решения необходимо применение численных методов. Следовательно, необходимо выбрать метод численного интегрирования, гарантирующий допустимую погрешность и запрограммировать полученный алгоритм.

4. Оптимизационная модель энергоэффективного управления рассматриваемым производством построена на основе генетического алгоритма. Для ее реализации необходима разработка программы, имеющей модуль расчета параметров производства, который должен быть включен в алгоритм модуля, реализующего работу генетического алгоритма.

5. Предлагаемый алгоритм, использующий разработанные модели

определения удельного электрического сопротивления ρ грунтов на основе их влажности и температуры требует большого количества расчетов в определенной последовательности, которые практически невозможно выполнить вручную. Кроме того, необходимо использование ранее сохраненных данных, которые нужны для расчетов климатических параметров грунта. Отсюда вытекает задача: разработки программы, реализующей предлагаемую модель на основе накапливаемых данных, то есть с использованием базы данных.

6. Программа, основанная на предлагаемом алгоритме, должна рассчитать сопротивления простых и сложных устройств заземления в течение года в однородном, двухслойном и многослойном грунтах.

7. На основании разработанных алгоритмов расчета удельного электрического сопротивления слоев грунта в реальных условиях необходимо разработать процедуры расчета напряжений прикосновения и напряжений шага в случае возникновения аварийных ситуаций на электрооборудовании.

8. Разрабатываемые программы должны иметь интуитивно понятный графический интерфейс.

7.2 Программа прогнозирования электропотребления электротехническим комплексом непрерывного инерционного производства

Для автоматизации расчета энергопотребления ЭТК глиноземного производства по способу Байера, была разработана программа на языке Delphi [187,188] с использованием моделей, приведенных в главе 2. Общий алгоритм ее работы представлен на рисунке 7.1, фрагмент кода приведен в приложении Б.

Вычислительный процесс имеет две независимые ветви: решение с помощью статической или динамической модели, имитирующей технологический процесс производства с определением энергопотребления по каждому материальному потоку. Данные по технологическим параметрам могут сохраняться в базе и при необходимости изменяться.

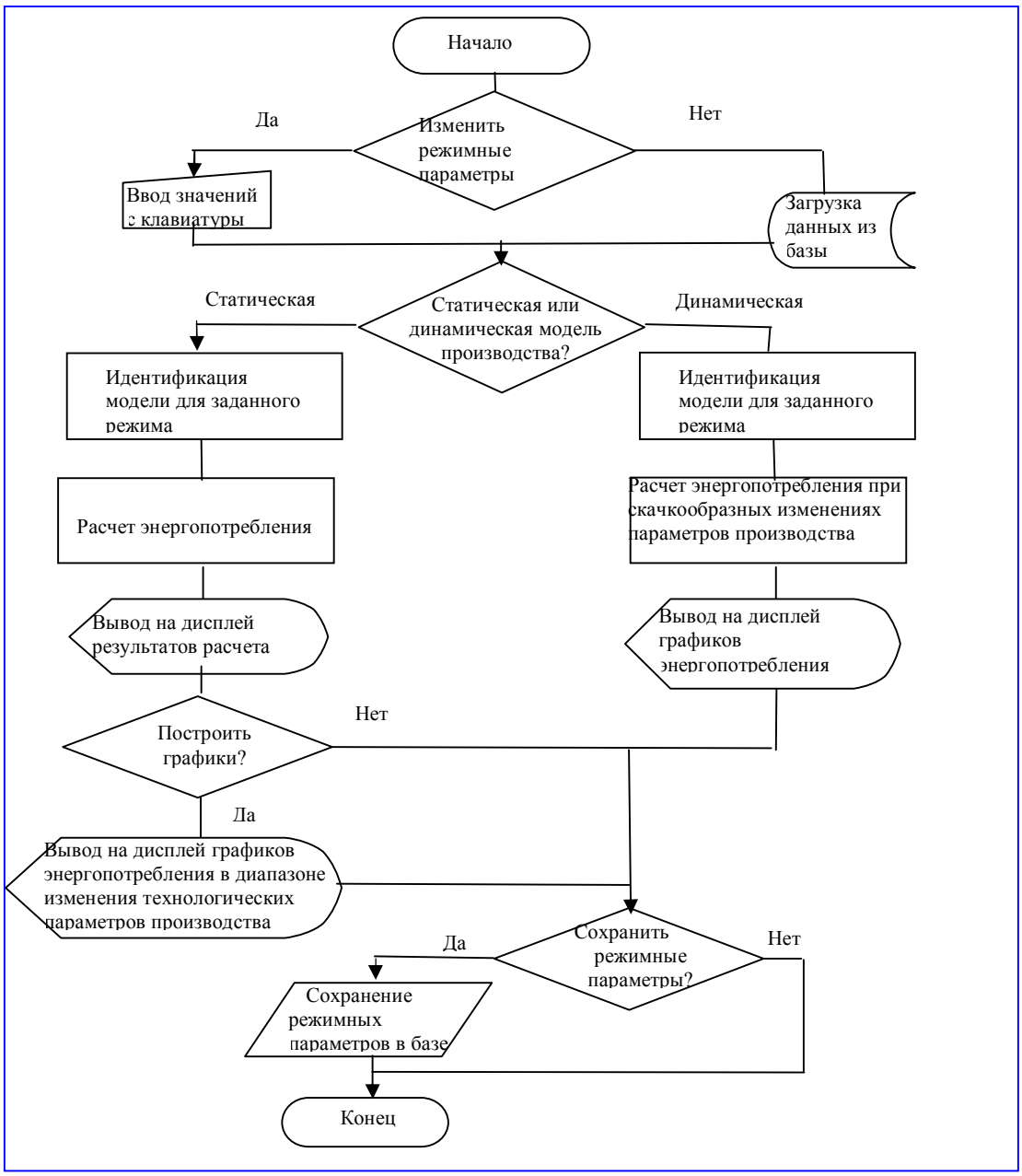


Рисунок 7.1 – Схема алгоритма расчета энергопотребления ЭТК нелинейного инерционного замкнутого производства

Фрагмент кода данной программы представлен в приложении Б. Из разделов построения моделей (2.3 – 2.7) видно, что исследуемый технологический процесс описывается системой нелинейных алгебраических уравнений (42 уравнения) и одним дифференциальным уравнением, представляющим работу блока V (см. рисунок 2.4) для статической модели, или системой 3-х дифференциальных уравнений (см. рисунок 2.15) и одного дифференциального уравнения, описывающего работу блока VIII, для динамической модели. При этом

переменные в этой системе не являются независимыми, а представляют собой зависимости, которые невозможно представить аналитически. Пояснение этому факту дает циклограмма способа Байера (рисунок 1.4), которая иллюстрирует взаимозависимости отношений концентраций жидкой фазы Al_2O_3 и Na_2O при 3-х вариантах температуры технологического процесса.

Ввиду отсутствия возможности применения единого численного математического метода для решения такой сложной задачи, математическое описание процесса решено было представить в виде 7 отдельных блоков, которые должны были решаться последовательно, на каждом итерационном приближении повторяя технологический цикл производства.

В качестве метода решения систем нелинейных уравнений блоков I, II, III, IV, VI, VII был выбран метод простой итерации ввиду простоты его реализации для данной задачи (см. раздел 2).

В результате алгоритм блока «Расчет энергопотребления», представленного на рисунке 7.1 выглядит следующим образом:

1) рассчитываются значения *i*-ой итерации системы нелинейных уравнений блока I;

2) решается система нелинейных уравнений блока IV, описывающих промывку шлама;

3) рассчитываются значения *i*-ой итерации системы нелинейных уравнений блоков II и III;

4) решается дифференциальное уравнение, которое описывает в статике процесс декомпозици глинозёма (блок V);

5) рассчитываются значения *i*-ой итерации системы нелинейных уравнений блоков VI и VII;

6) проверяется дисбаланс потока F2, и если он близок к нулю, то процесс расчёта модели производства прекращается;

7) рассчитывается энергопотребление производства при заданном технологическом режиме.

При таком алгоритме расчета модели и выбранных методах решения задач моделирования программа, написанная на языке Pascal среды программирования Delphi [187,188] выдает решение менее чем через 1 секунду при расчете на ПЭВМ, имеющей микропроцессор Intel Pentium и выше.

На рисунке 7.2 приведен интерфейс программы расчета энергопотребления в статическом режиме моделирования. Тут пользователь может принять значения режимных параметров, подгруженных из базы данных для расчета, или изменить любые параметры. При этом указываются предельные значения всех параметров в качестве комментария, а при вводе значений, выходящих за пределы, выдается сообщение об ошибке и устанавливается ближайшее возможное.

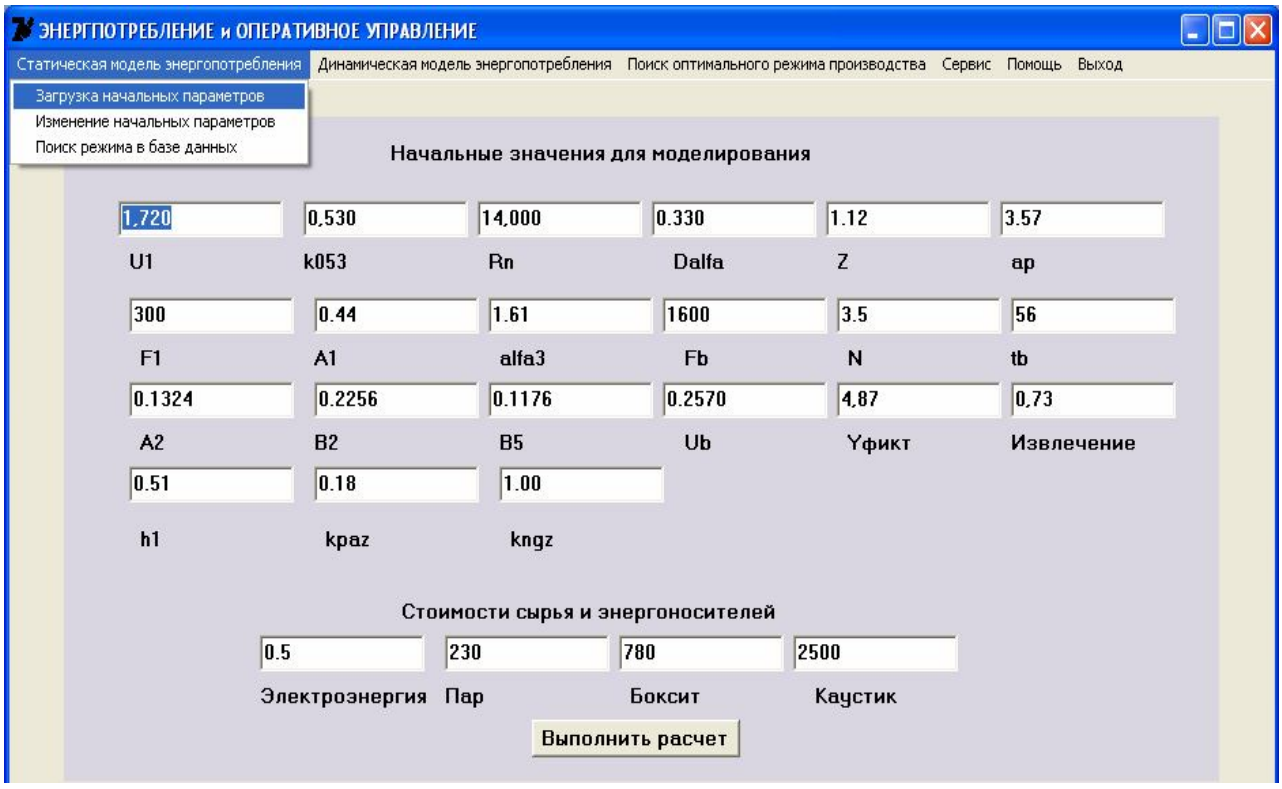


Рисунок 7.2 – Окно программы расчета энергопотребления в статическом режиме

Помимо простого расчета значения энергопотребления, разработанная программа имеет возможность строить графики изменения энергопотребления при изменении любого из технологических параметров. На рисунке 7.3 приведен пример формирования одного из таких графиков на экране ЭВМ.

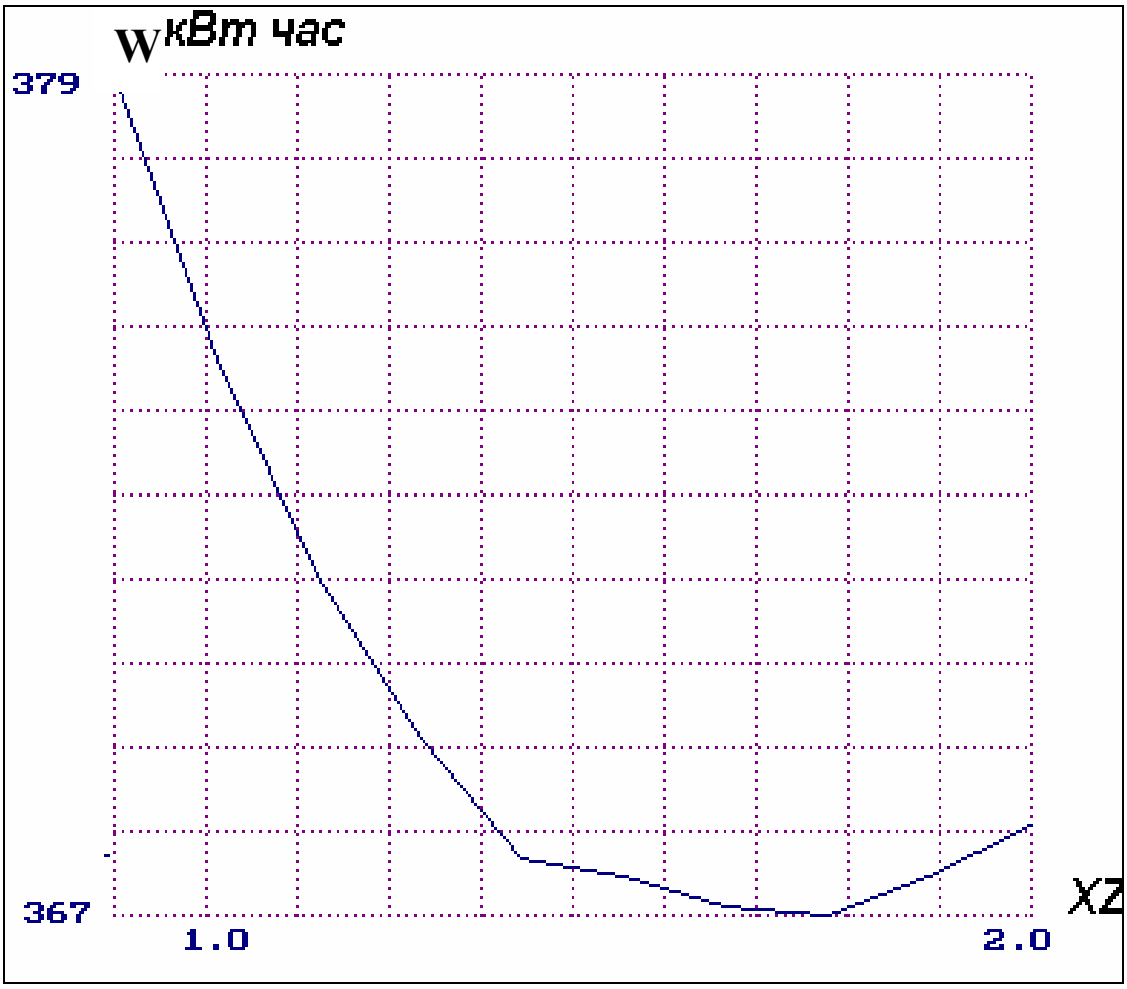


Рисунок 7.3 – Окно программы построения графика изменения энергопотребления при изменении параметра XZ

Для динамической модели расчета параметров производства также было выполнено исследование метода решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений, описывающих работу параллельных ниток декомпозеров в динамике. Выяснено, что для решения системы дифференциальных уравнений (2.18) выполняются те же требования, что и для дифференциального уравнения (2.12). Поэтому при программировании был взят тот же метод Эйлера. В результате динамическая модель позволила проследить изменение выходных параметров производства в динамике, то есть при переходных режимах, когда происходит изменении исходных параметров производства во времени.

7.3 Программа оптимального управления энергоемким непрерывным производством в зависимости от цен на энергоресурсы и сырье

Программа, разработанная для оперативного ситуационного управления, содержит в своей основе статическую модель МП. Ввиду того, что данный комплекс программ [191–195] был разработан как инструментарий, позволяющий ЛПР (лицу, принимающему решения) прогнозировать результаты управляющих решений, в нем предусмотрены возможности диалога.

Так как процесс моделирования с помощью ЭВМ разбивается на три задачи, пользователю предоставляется возможность выбора одного из имеющихся вариантов расчета. Головное меню содержит шесть пунктов (рисунок 7.4). Любой вариант начинается с выбора режима, который выполняется определением значений режимных параметров. При этом пользователь может изменить или оставить любое из существующих значений.

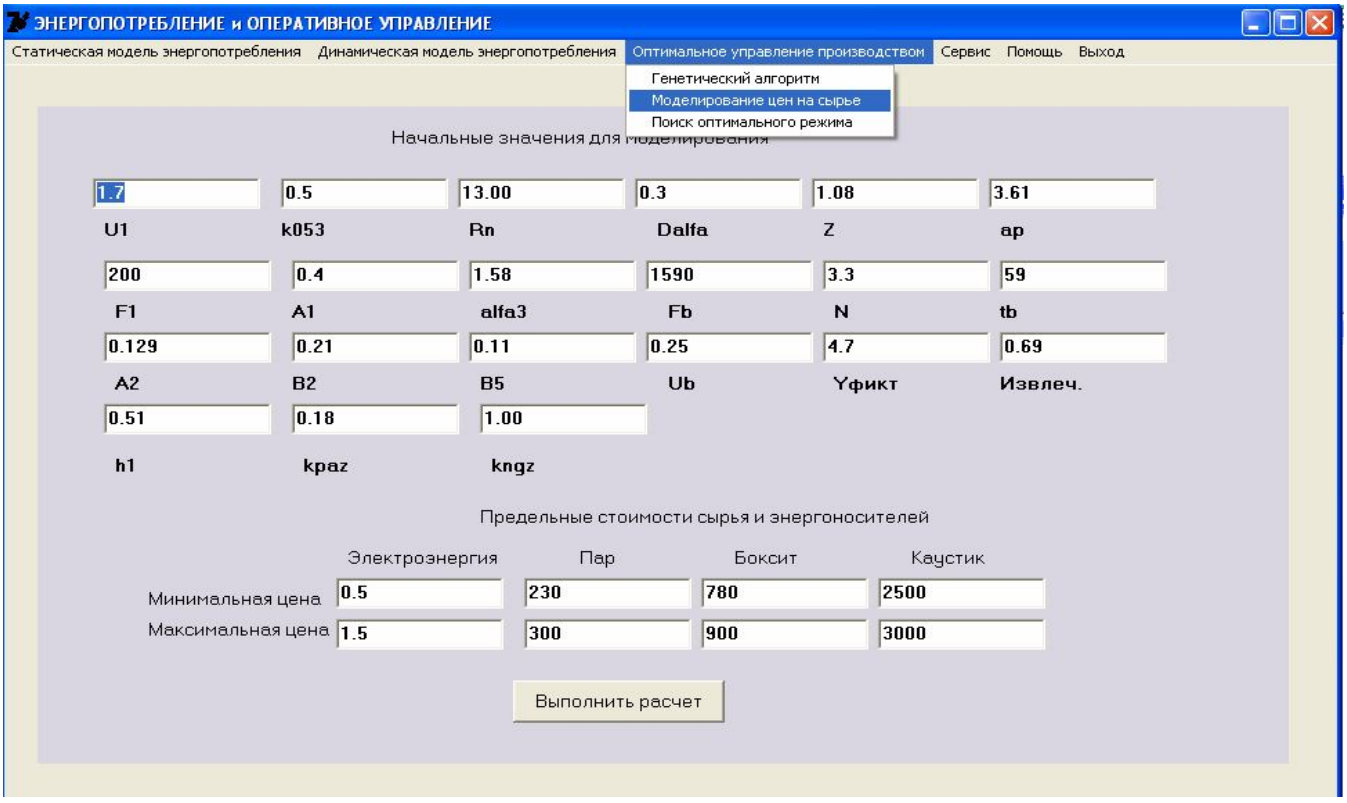


Рисунок 7.4 – Окно программы определения начальных значений при решении задачи поиска оптимального энергоэффективного режима функционирования ЭТК рассматриваемого типа производства

При решении задачи определения стратегии поиска оптимального режима производства необходимо ввести или скорректировать установленные ранее и сохраненные в базе данных значения цен. В этой же записи базы данных содержатся значения режимных параметров и идентифицирующих коэффициентов модели, сохраненные ранее. Значения записываются в базу, если выбран режим сохранения параметров. Таким образом, пользователь может иметь несколько вариантов режимных параметров. При этом имеется возможность восстановления необходимых значений управляющих параметров с помощью режима «загрузить».

После установки режима статическая модель МП рассчитывает электропотребление ЭТК и все выбранные пользователем параметры производства, а также себестоимость готового продукта. Затем пользователю предоставляется возможность моделирования различных режимных ситуаций, меняя до 12-ти параметров, с последующим получением на экране дисплея по выбору либо двухмерных графиков потоков, концентраций в этих потоках различных компонентов, расходных коэффициентов для электроэнергии, пара и сырья, а также себестоимости готовой продукции в зависимости от варьирования выбранного параметра, либо трехмерного изображения графика себестоимости в зависимости от изменения цены на один из видов сырья и выбранного параметра.

Решение оптимизационной задачи, алгоритм которой представлен на рисунке 7.5, выполняется на основе генетического алгоритма, в результате которого выдаются значения технологических параметров производства, позволяющие снизить энергопотребление без увеличения себестоимости готовой продукции при существующем соотношении цен.

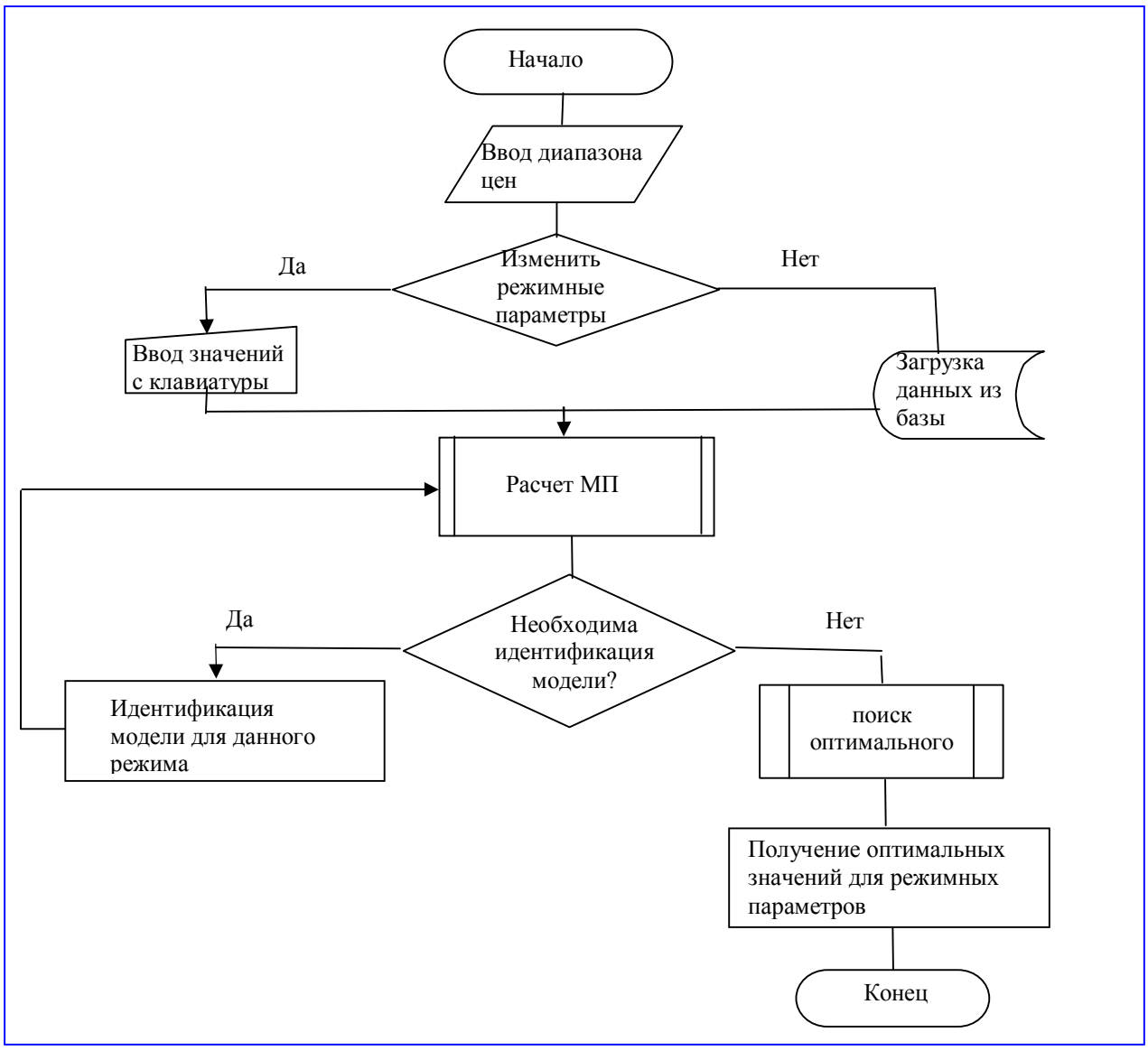


Рисунок 7.5 – Укрупненная схема алгоритма оптимальной стратегии управления производством

Кроме этого, пользователь может выбрать возможность моделирования изменения цен на энергоресурсы и сырье. А затем снова запустить задачу поиска оптимальных режимных параметров. При этом результаты расчетов записываются и могут быть предоставлены в виде трехмерных графиков. Для более полного объемного представления полученной области предусмотрена возможность поворота [189,190] полученного изображения вокруг всех трех осей координат и всего изображения вокруг центра координат вверх, вниз, влево и вправо. Поворотом управляют с помощью клавиш цифровой клавиатуры «1», «2», «3», «4», «5», «6».

Кроме того, ветвь этого программного инструментария предоставляет пользователю возможность просмотра трехмерных изображений срезов поверхности отклика критерия идентификации модели J(**U**) при варьировании двух из трех идентифицирующих параметров, что бывает весьма полезно при переходе от одного режима к другому в случае автоматической идентификации для задания начальных значений, а также ускорения сходимости для градиентных методов. Данное трехмерное изображение также может быть повернуто на любой угол [189,190] и относительно любой из трех осей координат.

Моделирование ситуаций, возникающих при изменении внешних воздействий (цен на энергоносители и сырье, качества сырья и т.д.) выполняется посредством динамической модели и является второй опцией головного меню данного программного инструментария. При этом пользователю предоставляется возможность выбора параметра, по которому возможны резкие колебания значений. По окончании расчета процессов, происходящих в случае резких колебаний параметров (моделируемый резок времени от 72-х часов до месяца), осуществляется вывод графиков изменения основных параметров и энергопотребления, а так же объема межпередельной емкости во времени. Моделируя различные ситуации, связанные с необходимостью резких переходов от одного режима к другому, ЛПР сможет предугадать возможность аварийных ситуаций, связанных с переливом или с резким недостатком раствора в производственном кольце, а также превышением или понижением энергопотребления.

Особенности программной реализации процедур идентификации модели. Программа содержит две процедуры идентификации модели производства. Обе процедуры реализуют задачу нелинейного программирования: поиска оптимума целевой функции J (2.41) по параметрам R_n,R_h,R_d, являющимся идентифицирующими коэффициентами. В одной процедуре реализован градиентный метод поиска, точнее его модификация, метод наискорейшего спуска [131–135], другая процедура содержит поиск оптимума методом Монте-Карло [131]. Ввиду того, что целевая функция J зависит только от режимных

параметров производства **YY**={B_6, M_2, M_5}, являющихся функциями идентифицирующих параметров **U**={R_n, R_h, R_d}, для поиска оптимума приходится многократно рассчитывать модель МП, по этой причине процедуры поиска оптимума имеют некоторые особенности.

Алгоритм градиентного метода поиска оптимального значения идентифицирующего параметра **U**={R_n, R_h, R_d} реализован следующим образом:

– задаются начальные значения идентифицирующих параметров;

– вычисляется значение режимных параметров **YY**={B_6, M_2, M_5}с помощью модели производства МП(**U, Z, X**) и вычисляется функция оценивания $J(B_6,M_2,M_5)$;

– затем вычисляется **grad J**; компоненты этого вектора вычисляются следующим образом: один из параметров получает приращение, а два других идентифицирующих параметра имеют первоначальную величину;

– с помощью МП вычисляются значения режимных параметров;

– определяется значение целевой функции J при измененном значении одного из параметров и вычисляется отношение $\frac{\Delta J}{\Delta \text{параметра}}$, затем параметр принимает прежнее значение, и аналогичная процедура выполняется для двух других идентифицирующих параметров;

– новые значения идентифицирующих параметров определяются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{n_i} &= R_{n_{i-1}} - h_{R_n} \left.\frac{\Delta J}{\Delta R_n}\right|_{i-1} \\ R_{h_i} &= R_{h_{i-1}} - h_{R_h} \left.\frac{\Delta J}{\Delta R_h}\right|_{i-1}, \\ R_{d_i} &= R_{d_{i-1}} - h_{R_d} \left.\frac{\Delta J}{\Delta R_d}\right|_{i-1} \end{aligned} \qquad (7.1)$$

– используя полученные значения идентифицирующих параметров, вычисляются режимные параметры производства **YY** с помощью МП и далее – определение значения целевой функции J;

– если полученное значение целевой функции оказывается меньше предыдущего, то вычисленные значения идентифицирующих параметров принимаются за начальные для вычисления нового приближения к оптимуму по формулам (7.1) . В случае, если значение целевой функции не возросло, вычисляется новое значение **gradJ**;

– каждое новое вычисление **gradJ** фиксируется, и если значение целевой функции *J* при новых значениях идентифицирующих параметров не уменьшается, то происходит уменьшение «шага спуска» по каждому параметру в два раза;

– критерием останова вычислительного процесса служат следующие условия: либо модуль **gradJ** , вычисляемый по формуле

$$\left|\mathbf{gradJ_i}\right| = \sqrt{\left(\frac{\Delta J_i}{\Delta R_{n_i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_i}{\Delta R_{h_i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_i}{\Delta R_{d_i}}\right)^2}, \qquad (7.2)$$

становится меньше наперед заданной точности, либо целевая функция не уменьшается после 2^6-кратного уменьшения «шага спуска» более чем в два раза.

Алгоритм реализации метода случайного поиска оптимального значения параметра $\mathbf{U}=\{R_n, R_h, R_d\}$ выглядит следующим образом:

– задается количество приближений к оптимуму J;

– на каждой итерации происходит вычисление новых значений идентифицирующих параметров R_n, R_h, R_d, для вычисления нового значения каждого параметра генерируется 100 равномерно распределенных случайных чисел $stepR_d$, $stepR_n$, $stepR_h$ из интервала, соизмеримого с пределами изменения вычисляемого идентифицирующего параметра, которые являются шагом изменения значения данного параметра;

– получаются новые значения по формулам:

$$\begin{aligned} R_{d_{[i+1]}} &= R_{d_{[i]}} \pm stepR_{d_{[i]}} \\ R_{n_{[i+1]}} &= R_{n_{[i]}} \pm stepR_{n_{[i]}} \\ R_{h_{[i+1]}} &= R_{h_{[i]}} \pm stepR_{h_{[i]}} \end{aligned}, \qquad (7.3)$$

– затем вычисляются с помощью модели МП значения режимных параметров **YY**={B_6,M_2,M_5} и вычисляется значение J(B_6,M_2,M_5);

– выбирается из 100 значений такой шаг для каждого режимного параметра , при котором новое значение данного идентифицирующего параметра более других минимизирует целевую функцию J;

– при приближении к оптимуму интервал, в котором генерируется значение шага изменения параметра сужается в k раз, где k – номер шага итерации;

– процесс поиска оптимума прекращается либо при достижении заданного числа итераций, либо при условии, что J перестает изменяться после более 2-х последовательных итерационных приближений .

Построение трехмерных графиков. Перечисляя особенности программной реализации данного инструментария ситуационного управления, нельзя не остановиться на реализации трехмерных графических изображений и их поворотах в удобных для пользователя направлениях. Изображения строятся по точкам, значения которых заносятся во время расчета в трехмерные массивы. Покоординатный пересчет этих значений при любых поворотах осуществляется с помощью углов Эйлера [189,190]

$$\begin{aligned} x &= x_1 \cos\varphi - y_1 \sin\varphi \\ y &= x_1 \sin\varphi + y_1 \cos\varphi \\ z &= z_1 \end{aligned} \quad , \qquad (7.4)$$

где φ – угол поворота плоскости XOY от направления оси, совпадающий с кротчайшим поворотом от X к Y (поворот вокруг оси Z).

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 \\ y_1 &= y_2 \cos\theta - z_2 \sin\theta \\ z_1 &= y_2 \sin\theta + z_2 \cos\theta \end{aligned} \quad , \qquad (7.5)$$

где θ – угол поворота вокруг оси X .

$$\begin{aligned} x_2 &= x_3\cos\psi - y_3\sin\psi \\ y_2 &= x_3\sin\psi + y_3\cos\psi \\ z_2 &= z_3 \end{aligned}, \qquad (7.6)$$

где ψ – угол поворота вокруг оси Y.

Новые значения координат точек изображения вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned} x_1 &= \cos\varphi(x\cos\psi - y\sin\psi) - \sin\varphi[\cos\theta(x\sin\psi + y\cos\psi) - z\sin\theta] \\ y_1 &= \sin\varphi(x\cos\psi - y\sin\psi) - \cos\varphi[\cos\theta(x\sin\psi + y\cos\psi) - z\sin\theta] \\ z_1 &= \sin\theta(x\sin\psi + y\cos\psi) + z\cos\theta \end{aligned}. \qquad (7.7)$$

Результаты пересчета заносятся в тот же трехмерный массив, и затем с помощью графических средств языка программирования [187,188] строится изображение на экране. Быстродействие данного алгоритма таково, что поворот изображения осуществляется практически мгновенно после нажатия клавиши поворота даже на компьютерах с невысоким быстродействием. Кроме того, было выяснено, что быстрее всего обрабатываются данные, имеющие тип DOUBLE, поэтому для расчетов моделей, а так же при построении графических изображений был использован именно этот тип данных.

На фрагменте (а) рисунка 7.6 показана поверхность функции идентификации J (см. выражение 2.41) в координатах J, R_n, R_H и J, R_d, R_H с использованием средств трехмерной графики. На фрагментах (а) и (б) приведены изображения одной той же поверхности только под разным углом зрения, получаемым с помощью поворота изображения. На фрагменте (в) – та же поверхность функции идентификации *J* в координатах, но уже в координатах J, R_d, R_H.

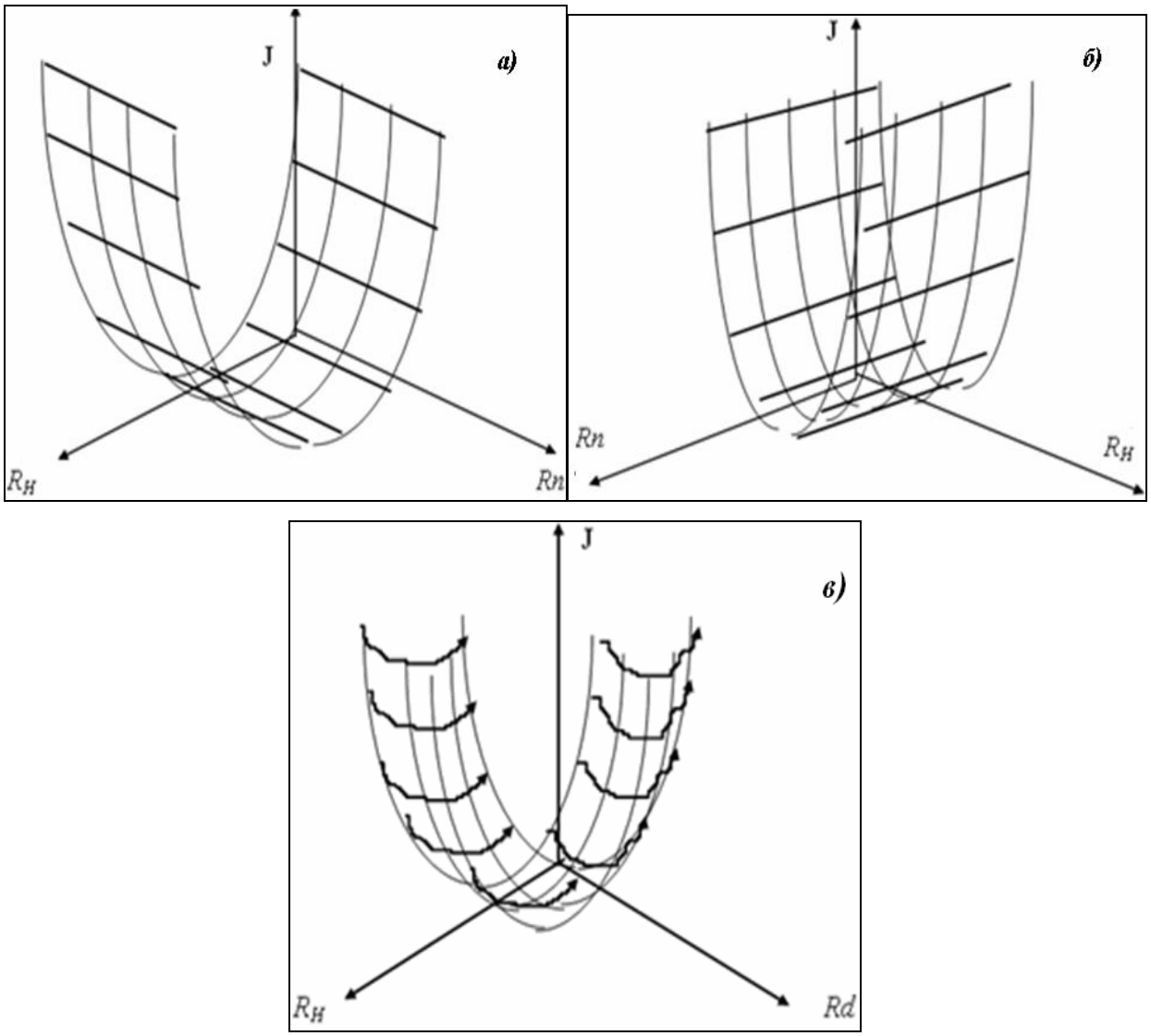


Рисунок 7.6 – Трехмерное изображение поверхности функции идентификации J в координатах J, Rn, RH, а) при одном повороте изображения, б) при другом, в) трехмерное изображение этой же функции J, но уже в координатах J, Rd, RH

Трехмерное изображение дает пользователю лучшее представление о характере функции, с которой он работает. При этом возможность повернуть изображение функции идентификации модели технологического процесса под различным углом зрения улучшает представление о ней.

7.4 Программа расчета заземлений энергоустановок

Основные задачи, стоящие при конструировании и моделировании заземляющих устройств: расчет удельного электрического сопротивления грунта с

учетом его многослойности и климатических условий местности и расчет сопротивления ЗУ. Конструирование устройств заземления (ЗУ) выполняется путем последовательного приближения основных параметров принятого ЗУ – форма, размеры, схема размещения – к тем, которые в конечном итоге будут способствовать выполнению заземления. При расчете параметров ЗУ используются формулы, в которых входит ρ грунта, а оно в реальных условиях меняется в десятки тысяч раз, т.к. зависит от множества факторов. В связи с этим в программу включены алгоритмы, позволяющие промоделировать температуру и влажность грунта на глубинах его залегания в течение года для расчета ρ .

Для автоматизированного расчета удельного электрического сопротивления ρ грунта и сопротивления ЗУ была разработана программа [181,182,196–201] Project_ZU.exe, одно из окон которой представлено на рисунке 7.7. На данную программу получено авторское свидетельство[198]. Алгоритм расчета был реализован с помощью среды программирования Turbo Delphi.

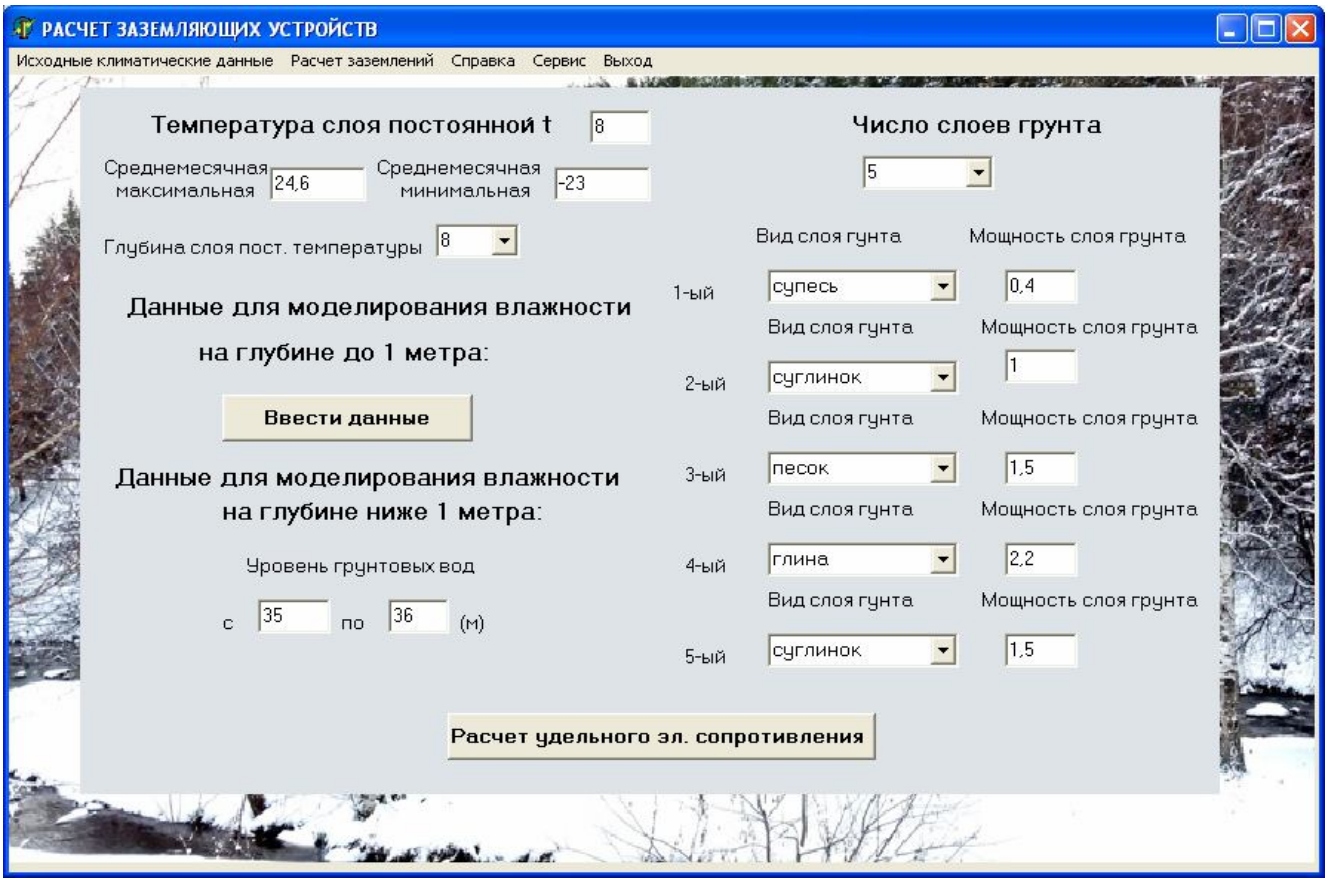


Рисунок 7.7 – Интерфейс окна программы для ввода климатических данных

Структурно программа состоит из нескольких модулей, которые вызываются пользователем посредством выбора опций главного меню или нажатия кнопок интерфейса. В программе предоставляется возможность для более точного расчета ЗУ определить значение удельного электрического сопротивления грунта, которое вычисляется с помощью моделей, приведенных в главе 5. Для этого требуется ввести климатические параметры местности, где планируется установка заземляющего устройства (среднемесячные: температуру, количество осадков, силу ветра, а также уровень грунтовых вод), задать необходимые параметры для расчетов ρ (вид грунта, количество и мощность слоев), выполнить его расчеты с помощью запрограммированных моделей определения влажности и температуры грунта на глубинах заземлений, а затем просмотреть графики изменения указанных величин в течение года.

На рисунке 7.8 представлен один из таких графиков изменения удельного электрического сопротивления слоев грунта во второй половине февраля месяца в глубину от уровня 0,6 м от поверхности земли до 14м для данных, представленных на рисунке 7.7. Данный временной период выбирается автоматически как наиболее неблагоприятный с точки зрения проводимости грунта для местности, в которой планируется установка заземляющего устройства.

Для расчета заземляющего устройства пользователь должен выбрать его конфигурацию из четырех возможных вариантов:

– простой вертикальный;

– простой горизонтальный;

– конструкция соединенных вертикальных электродов;

– сетка.

Интерфейс окна программы, позволяющей пользователю сделать необходимый выбор, приведен на рисунке 7.9.

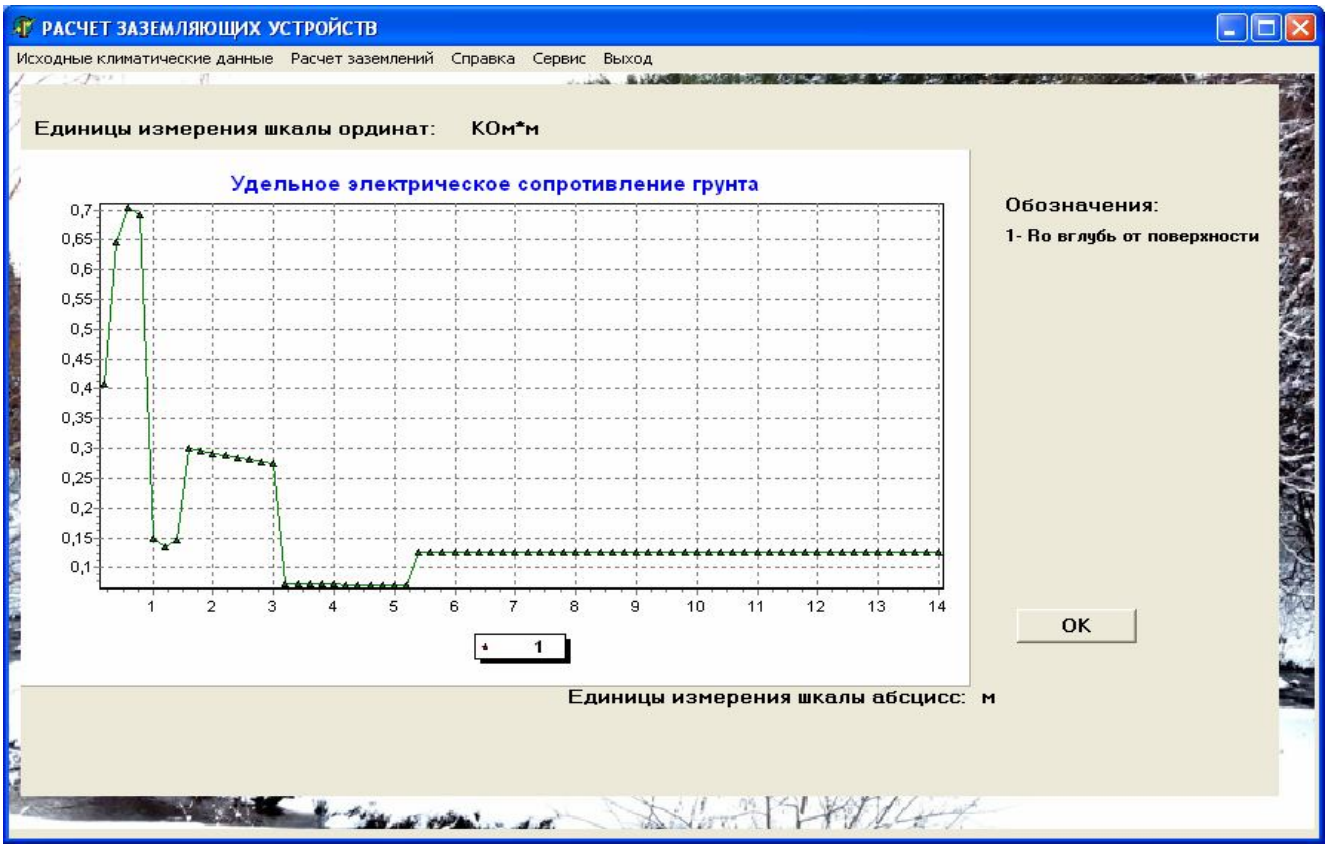


Рисунок 7.8 – График изменения удельного электрического сопротивления слоев грунта вглубь от 0,6 м от поверхности земли до 14м во второй половине февраля

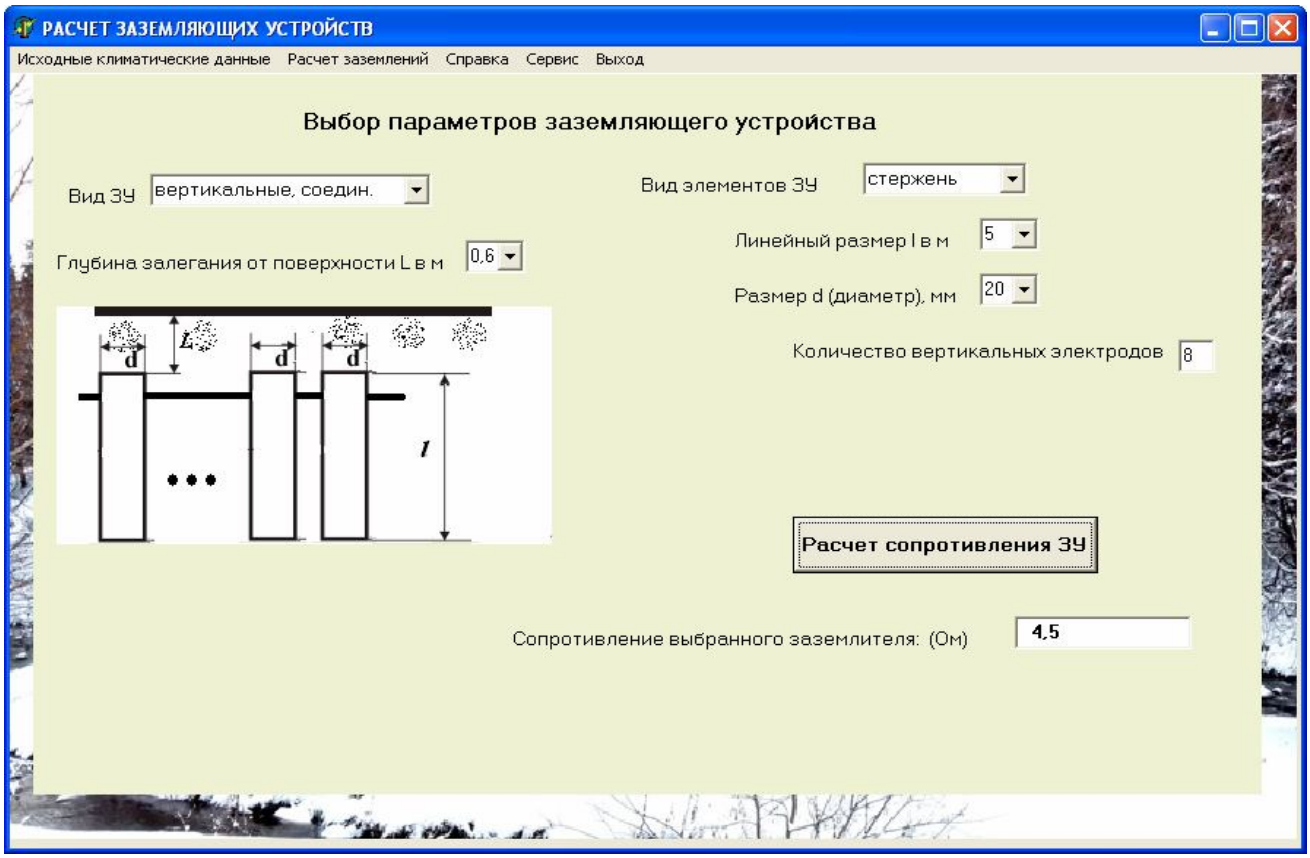


Рисунок 7.9 – Интерфейс окна «Выбор параметров заземляющего устройства»

Каждый из типов ЗУ рассчитывается в зависимости от глубины установки, взаимного расположения и геометрических размеров его элементов. Расчет выводится в численном (см. рисунок 7.9) и графическом представлении (рисунки 7.10–7.11).

Приведенный на рисунке 7.10 график иллюстрирует изменение сопротивления выбранного вида заземляющего устройства при увеличении глубины его закладки в наихудший с точки зрения сопротивления ЗУ период года. Для приведенного примера – это февраль месяц. Кроме того, в программе на основе нечеткой климатической модели грунта рассчитывается изменение сопротивления заземляющего устройства в течение года с выводом графика изменения этого сопротивления на экран.

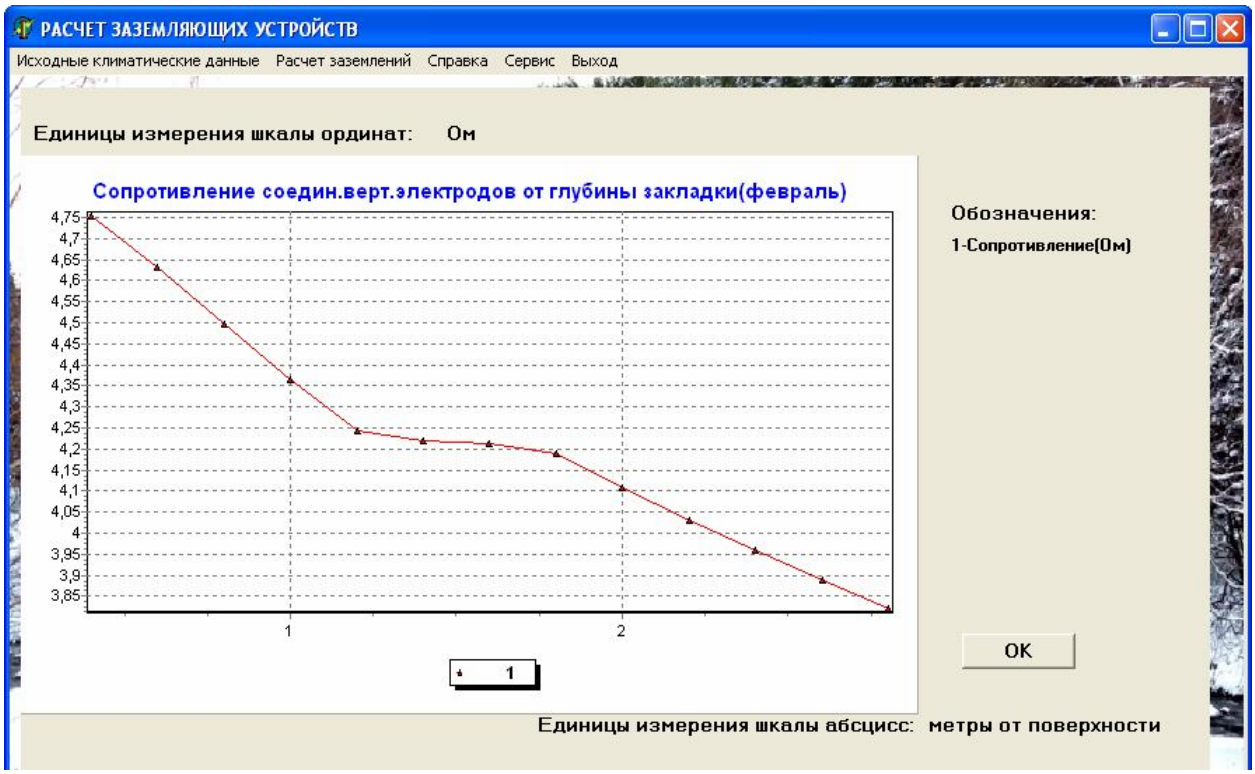


Рисунок 7.10 – График изменения сопротивления заземляющего устройства в зависимости от глубины установки

Рисунок 7.11 – Изменение сопротивления горизонтального заземлителя в течение года, установленного на глубинах 0.6м(—),1м(—), 2м(—)

На рисунке 7.11 проиллюстрировано изменение сопротивления горизонтального заземления в климатической зоне, где глубина промерзания грунта менее двух метров. Синей линией обозначен график изменения сопротивления ЗУ, установленного на глубине 2 метра, зеленой – на глубине 1м, а красной – на глубине 0.6м.

Алгоритм работы данной программы представлен на рисунке 7.12. Программа содержит следующие процедуры: «Расчет температуры на глубинах ЗУ», «Расчет влажности на глубинах ЗУ», «Расчет удельного электрического сопротивления слоев грунта» и «Расчет ЗУ». Алгоритмы этих процедур приведены на рисунках 7.13, 7.16, 7.17 и 7.18 соответственно.

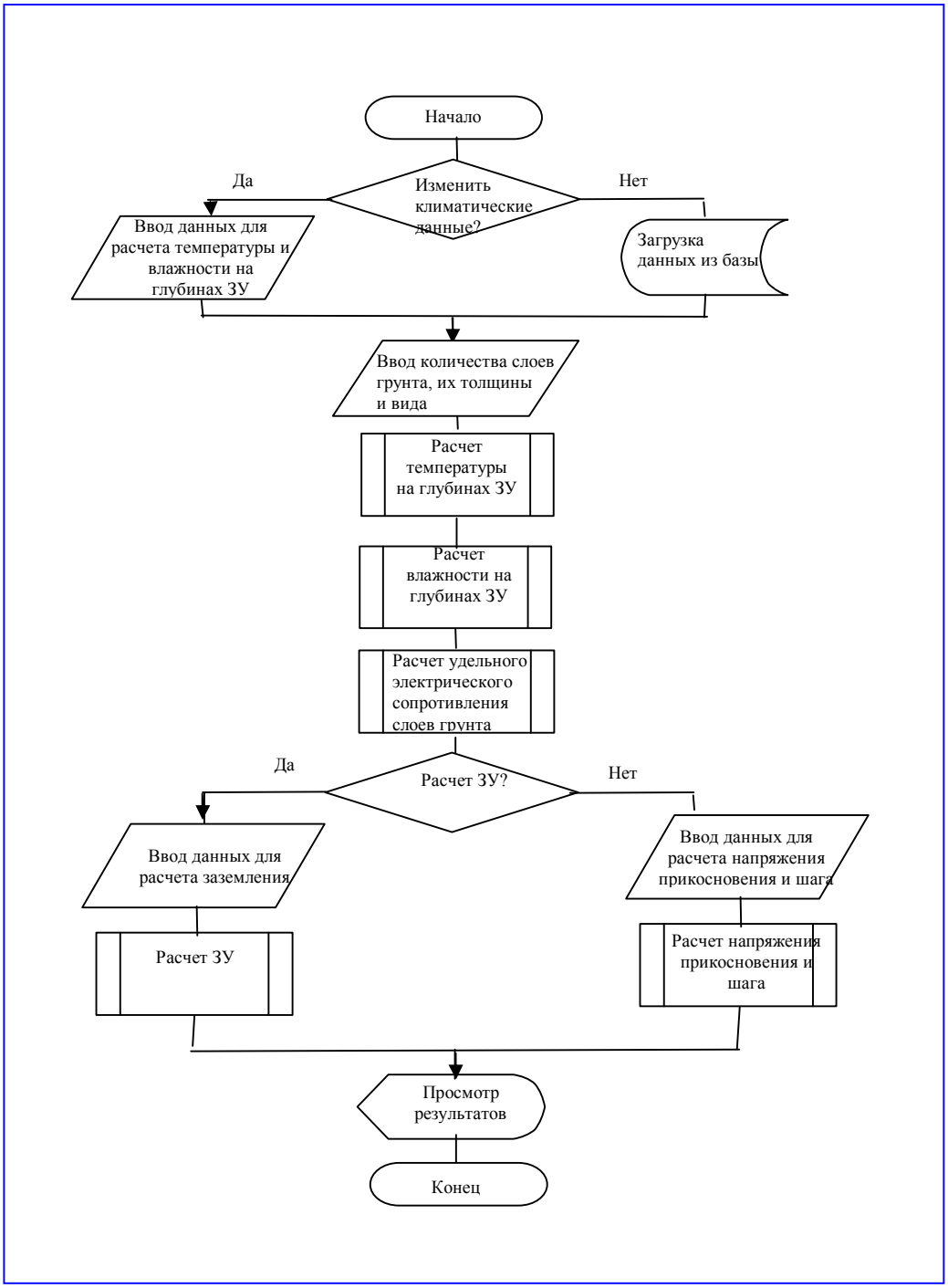


Рисунок 7.12 – Алгоритм работы программы расчета устройств заземления и напряжений прикосновения и шагового напряжения

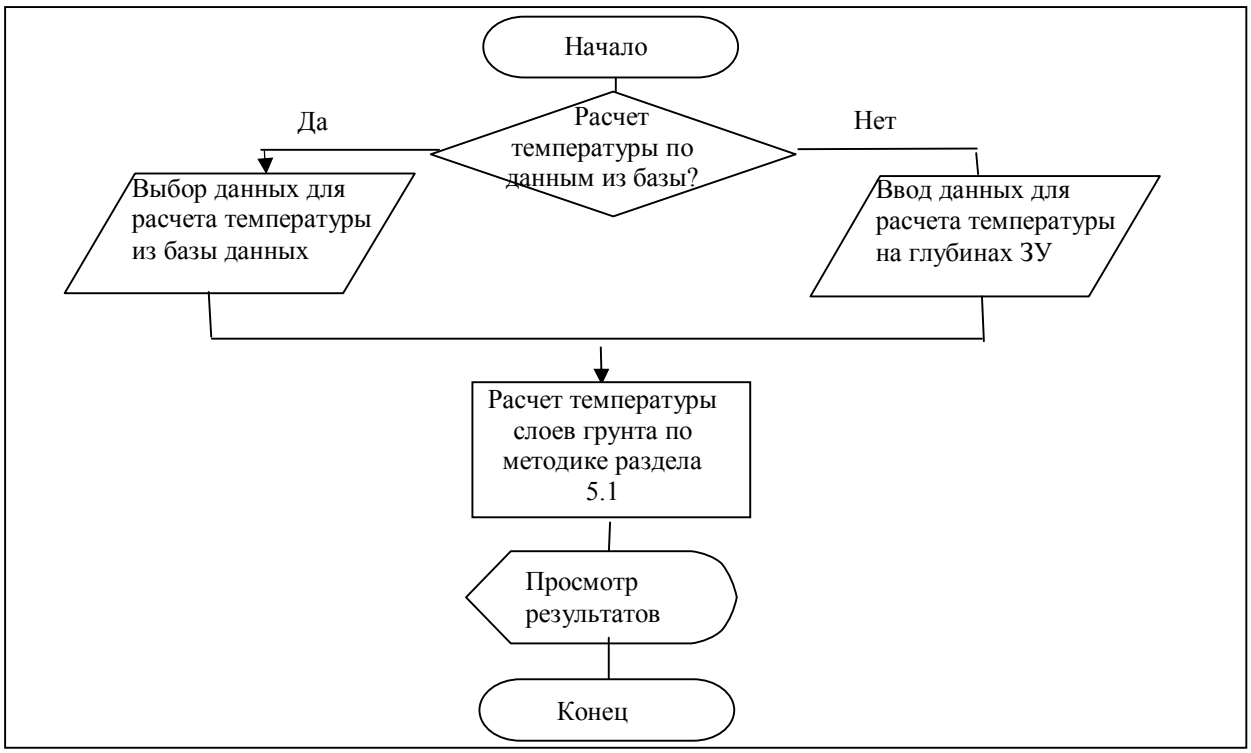


Рисунок 7.13 – Схема алгоритма процедуры расчета температуры на глубинах ЗУ

В программе используется следующий алгоритм (см. рисунок 7.12): непосредственный ввод исходных данных или выбор необходимого набора данных из ранее сохраненных в базу данных с возможностью необходимой корректировки, выполнение процедуры расчета t и *v* слоев грунта от поверхности земли вглубь (методы их определения представлены в разделе 5.3.2), процедура определения ρ от t и *v* по методике, описанной в разделе 5.3.1, графический вывод полученных значений температуры, влажности и удельного электрического сопротивления в течение года на экран, расчет заземляющего устройства при наихудших значениях ρ и вывод результата на экран.

При этом пользователь должен определить, помимо климатических данных, значения основных исходных параметров грунта: виды грунта, мощности слоев, количество слоев различного грунта (на рисунке 7.7: количество слоев грунта – 5, их вид: «супесь», «суглинок», «песок», «глина», «суглинок» и мощность слоев – 0.4м, 1м, 1.5м, 2.2м и 1,5м). Для моделирования температуры на глубинах ЗУ есть возможность упростить ввод данных: достаточно ввести среднемесячные максимальную и минимальную температуры и глубину слоя постоянной

температуры. Алгоритм расчета температуры представлен на рисунке 7.13.

Для расчета температуры грунта, который выполняется на основе теории теплопроводности Фурье, используются либо помесячные средние значения температуры, представленные на рисунке 7.14, или максимальная и минимальная среднемесячная температура в году (см. рисунок 7.7) и глубина слоя постоянной годовой температуры. Вычисление температуры грунта выполнено по методике раздела 5.3.2.

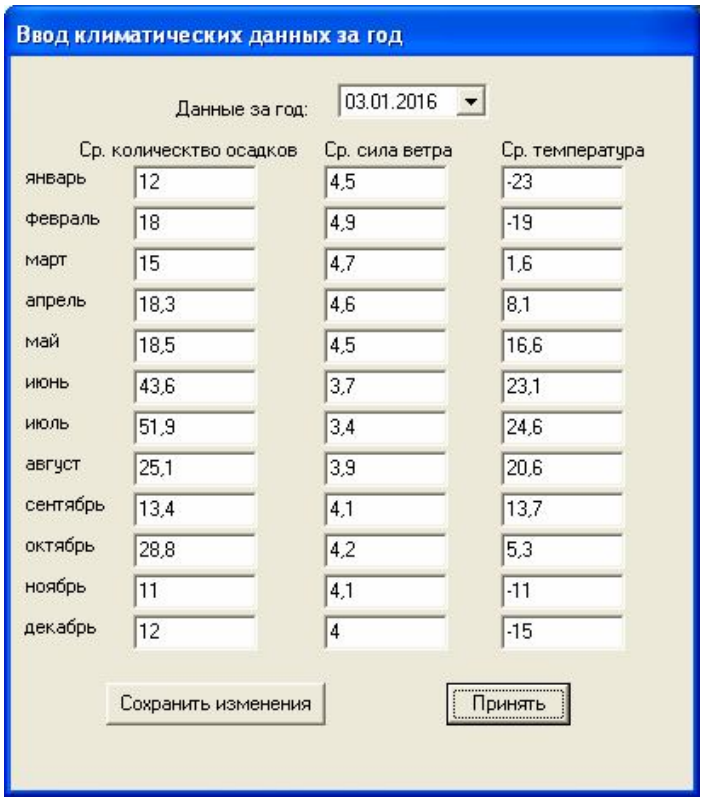


Рисунок 7.14 – Интерфейс ввода климатических данных для местности, где проектируется установка заземления

Рассчитается средняя температура для каждого слоя грунта. Зависимости годового хода t представлены на рисунке 7.15,а, где цифрами 1,2 и 3 обозначены графики годового изменения средней температуры первого, третьего и пятого слоя грунта, а на рисунке 7.15,б – представлено изменение температуры грунта для каждого месяца по глубине, цифрами обозначены номера месяцев.

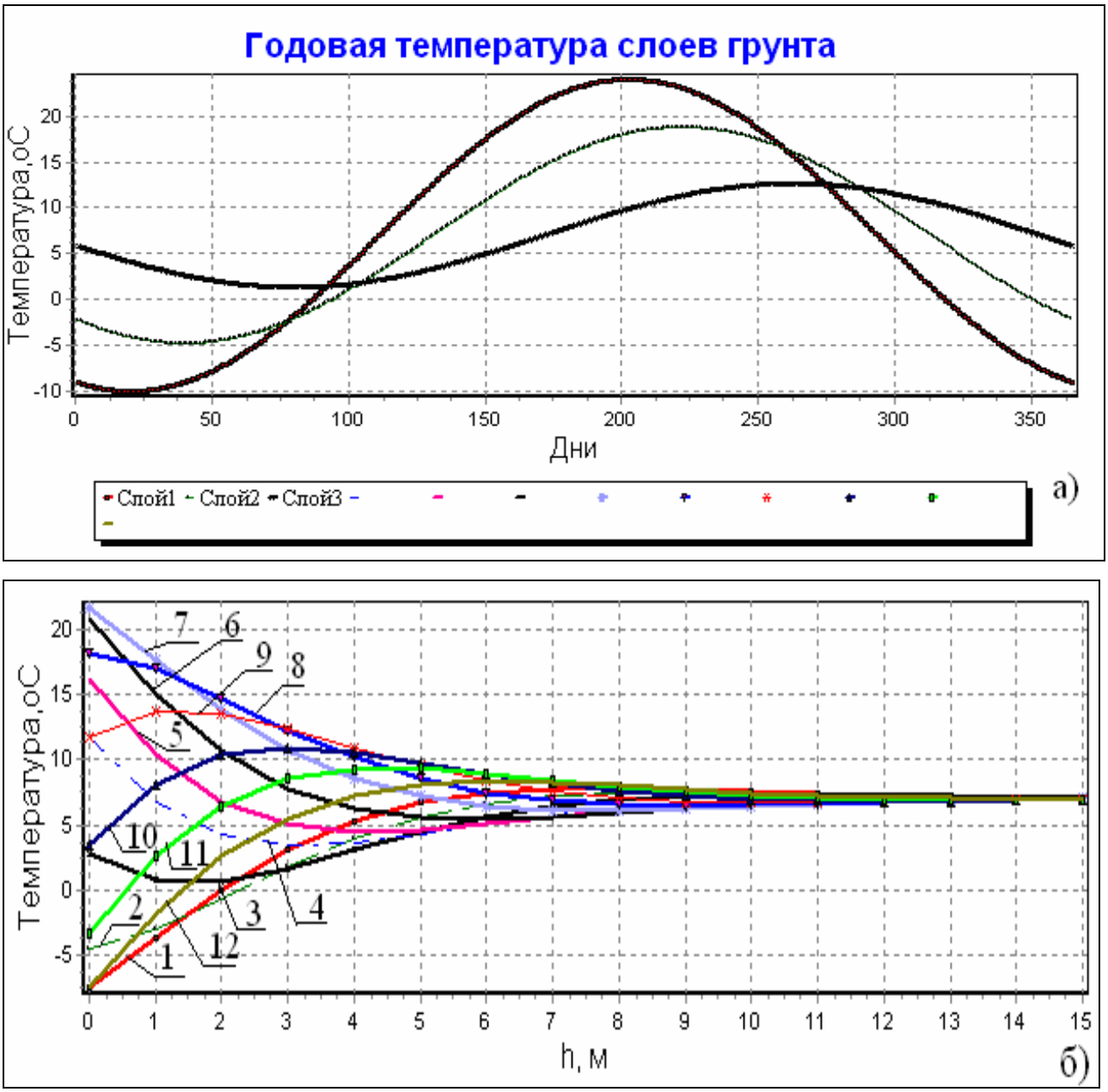


Рисунок 7.15 – Графики изменения t в течение года: а) для трех слоев грунта, б) по глубине

Для моделирования влажности слоев грунта, где будет располагаться заземляющее устройство, вводятся среднемесячные данные по температуре воздуха, количеству осадков, силе ветра (см. рисунок 7.14), а так же уровень грунтовых вод (см. рисунок 7.7). При желании выбирается интересующий исследователя временной диапазон года по названию месяца. Если временной диапазон не указан, то программа выбирает наихудший период, когда удельное сопротивление грунта максимально и переходит к расчету влажности слоев

грунта. Алгоритм этого расчета изображен на рисунке 7.16.

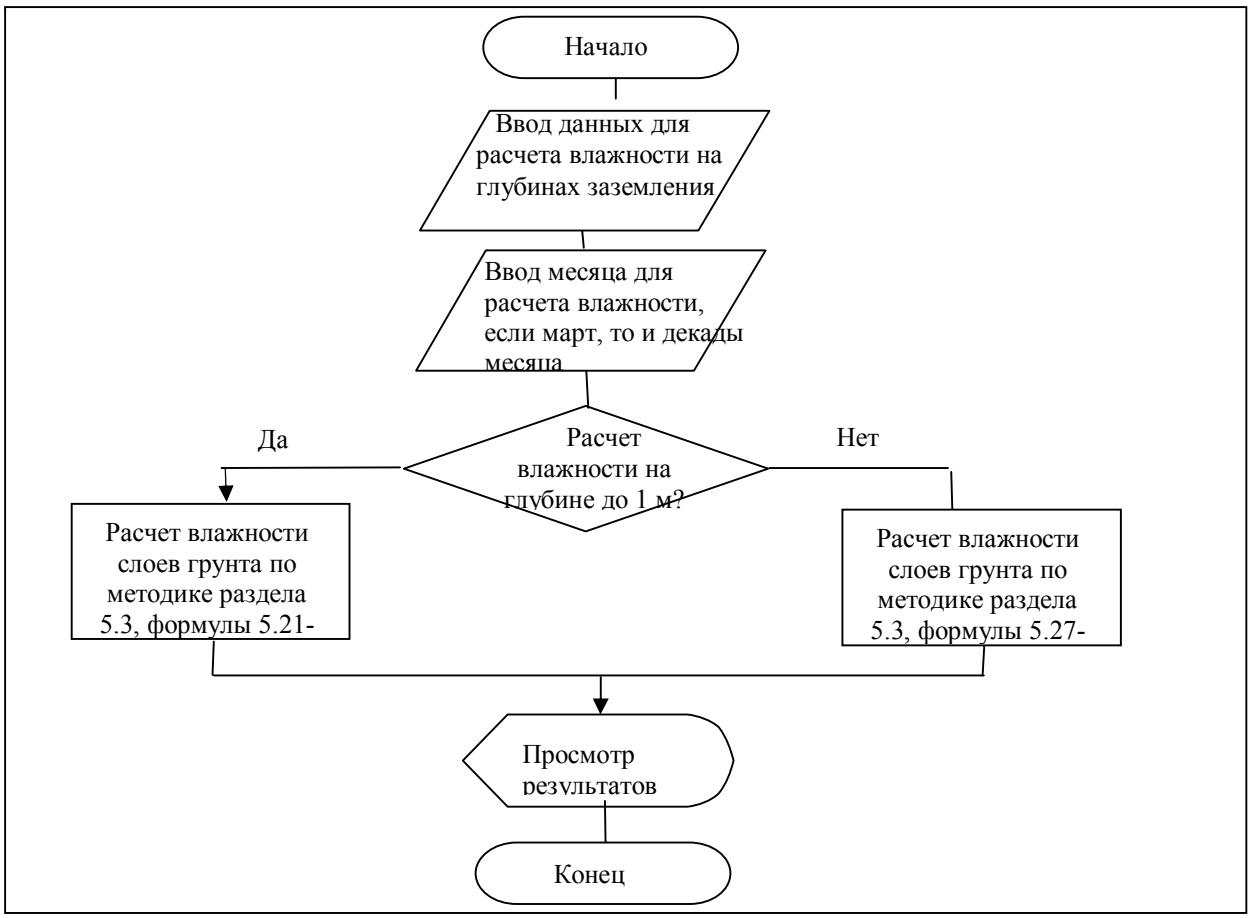


Рисунок 7.16 – Схема алгоритма процедуры расчета влажности на глубинах заземления

Расчет влажности слоев грунта (см. рисунок 7.16) выполняется по одной из двух ветвей: 1) если глубина грунта меньше 1м, то *v* рассчитывается по первому методу на основе данных метеостанций (выражения 5.21–5.26), 2) если глубина больше 1м, то – по второму методу (выражения 5.27–5.28), с использованием данных геологоразведочного центра, где указывается только уровень грунтовых вод.

После расчета температуры и влажности указанных пользователем слоев грунта происходит расчет удельного электрического сопротивления этих слоев, блок-схема алгоритма которого приведена на рисунке 7.17. Разработанная программа позволяет воспроизвести графики зависимости ρ каждого интересующего пользователя слоя грунта от влажности и температуры в любое

время года и выбрать или уточнить самый наихудший вариант значения ρ .

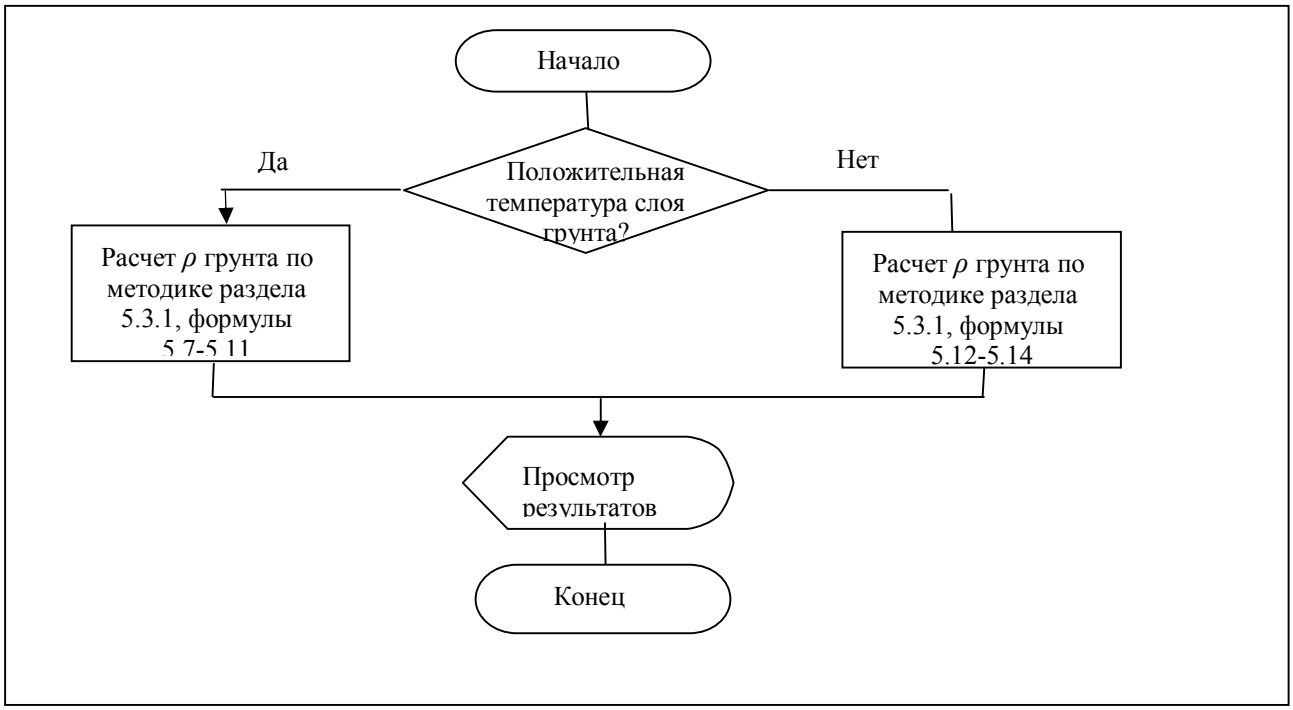


Рисунок 7.17 – Схема алгоритма процедуры расчета ρ грунта

Процедура определения сопротивлений заземлений в однородном и двухслойном грунтах. Алгоритм работы данной процедуры представлен на рисунке 7.18. В разработанной программе результатом программирования является определение сопротивления заземления с учетом расчета ρ в зависимости от изменения *v* и t грунта в любое время года без трудоемких измерений. Для определения сопротивления заземляющего устройства пользователь должен выбрать вид заземления, определить геометрические размеры его элементов и глубину заглубления.

Окно расчета заземлений представлено на рисунке 7.9. На этом рисунке приведен пример расчета сложного заземления в виде вертикальных электродов, соединенных между собой металлической полосой. Количество электродов – 8 штук, длина каждого – 5м, глубина размещения в земле от поверхности – 0,6м. При нажатии кнопки «Расчет сопротивления ЗУ» получено значение сопротивления: 4,5Ом. После получения решения можно просмотреть справочные данные по нормативным значениями сопротивления заземления [82] и выполнить

корректировку параметров заземления.

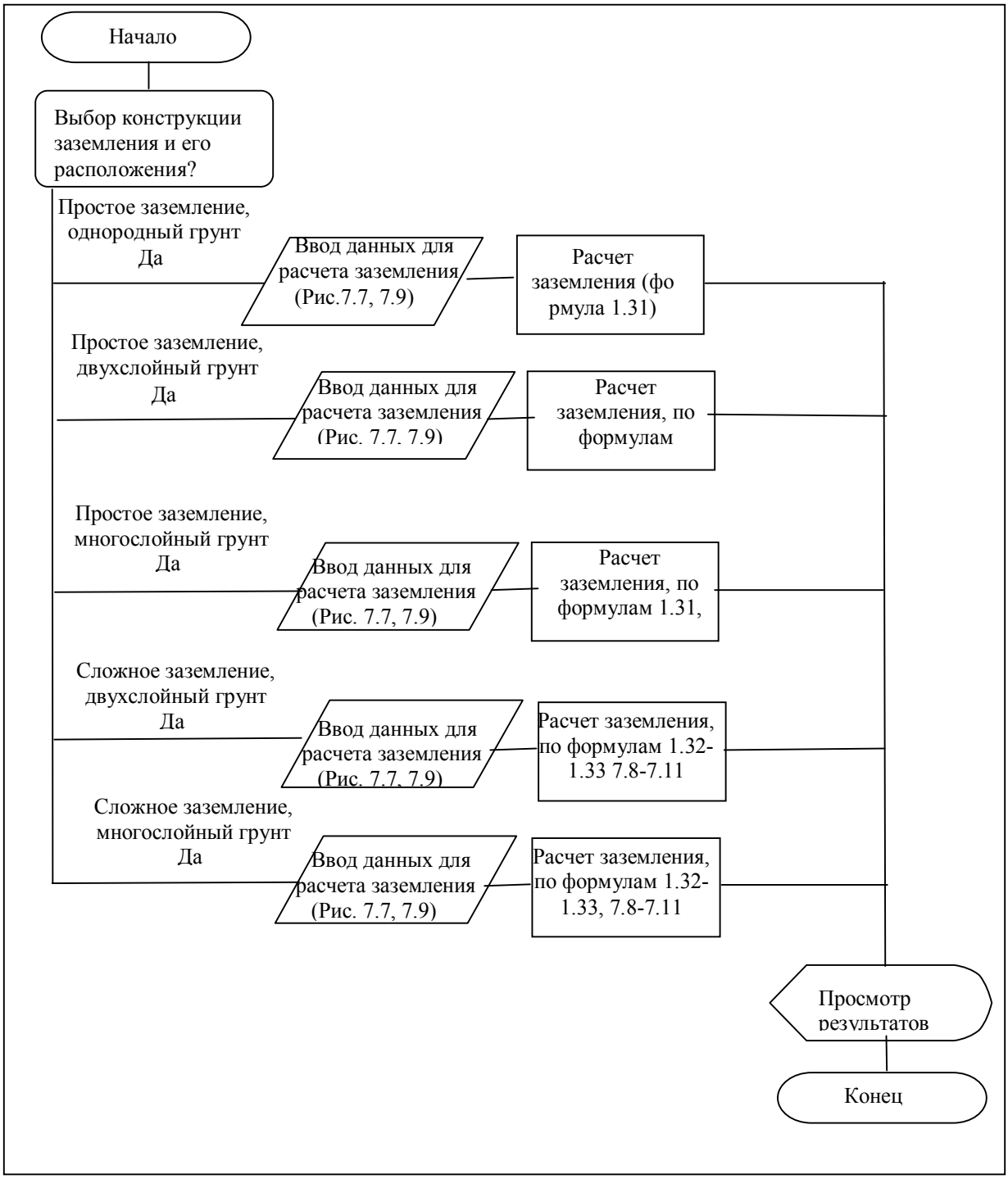


Рисунок 7.18 – Схема алгоритма процедуры расчета заземляющего устройства

Применяется следующая методика: если простой заземлитель находится в двухслойном грунте, то их расчет основывается на решении задачи об электрическом поле точечного источника тока в земле [85]. Сопротивление R вертикального электрода, расположенного в верхнем слое, рассчитывается по

формуле [85]:

$$R = \frac{\rho_1}{4\pi \cdot l}\cdot\left[2\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{2h+1.5l}{2h+0.5l} + \right.$$
$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2.1}^{n} \ln\frac{(2nh_1+0.5l)^2(2nh_1+1.5l+2h)(2nh_1-0.5l-2h)}{(2nh_1-0.5l)^2(2nh_1-1.5l-2h)(2nh_1+0.5l+2h)}\right], \quad (7.8)$$

где ρ_1, h_1 – удельное сопротивление и глубина первого слоя грунта;

$k_{2.1}$ – коэффициент, учитывающий многослойность грунта и равный $k_{2.1} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_1 + \rho_2)}$, n – количество слоев грунта;

l и d – длина и диаметр электрода;

h – расстояние от верхнего конца заземлителя до поверхности грунта.

Если вертикальный электрод пересекает границу раздела между слоями, то его R рассчитывается по формулам [85]

при $L + 0.5l \le h$

$$R = \frac{\rho_1 C}{4\pi \cdot l}\cdot\left[2\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{2h+1.5l}{2h+0.5l} + \right.$$
$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2.1}^{n} \ln\frac{(2nh_1+0.5l)^2(2nh_1+1.5l+2h)(2nh_1-0.5l-2h)}{(2nh_1-0.5l)(2(n-1)h_1+0.5l)(2nh_1+0.5l+2h)\cdot(2(n-1)h_1+1.5l+2t)}\right], \quad (7.9)$$

при $t + 0.5l \ge h$

$$R = \frac{\rho_1 C}{4\pi \cdot l}\cdot\left[2\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{2h+1.5l}{2h+0.5l} + \right.$$
$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2.1}^{n} \ln\frac{(2nh_1+0.5l)(2nh_1+1.5l+2h)(2(n-1)h_1+0.5l)}{(2nh_1+0.5l+2t)(2(n-1)h_1+0.5l+2t)(2(n-2)h_1+1.5l+2h)}\right], \quad (7.10)$$

где $C = \rho_2 l / [\rho_1(h+l-h_1+\rho_2(h_1-h)]$.

Если вертикальный электрод расположен во втором слое, тогда [85]:

$$R = \frac{\rho_2}{4\pi \cdot l} \cdot \left[2\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{2h + 1.5l}{2h + 0.5l} + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2.1}^{n} \ln\frac{(2nh_1 + 1.5l + 2t)(2(n-2)h_1 + 2t + 0.5l)}{(2nh_1 + 0.5l + 2t)(2(n-2)h_1 + 2t + 1.5l)} \right]. \quad (7.11)$$

Предлагаемая программа позволяет рассчитывать сопротивление простых и сложных заземлений в двухслойном и многослойных грунтах, а так же построить графики изменения сопротивления этих заземлений в зависимости от климатических условий. Графический результат расчета R для горизонтального электрода представлен на рисунках 7.10–7.11. На рисунке 7.11 показано изменение сопротивления горизонтального заземлителя, расположенного на глубинах 0.6м, 1м и 2м при изменении t в течение года, вид грунта песок при неизменной влажности v=5%. График наглядно иллюстрирует, что сопротивление горизонтального заземлителя существенно меняется в течение года, если он расположен в замерзающем слое и остается практически постоянным, если данный вид ЗУ располагается в незамерзающем слое грунта [179].

7.5 Программа расчета напряжения прикосновения и шага в случае аварийных ситуаций на энергоустановках

Расчет напряжений прикосновения и шага ведется с учетом неоднородности земли и различных значений удельного электрического сопротивления ее слоев в различное время года и при различных климатических условиях. Эту задачу выполняет ряд процедур, алгоритм которых изображен на рисунках 7.13 и 7.16–7.17.

Напряжения прикосновения. Для вертикального заземлителя при условии, что его диаметр d много меньше его длины l, потенциал на его поверхности может быть вычислен с помощью выражения [84]:

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln\frac{4l}{d}. \quad (7.12)$$

Уравнение для определения потенциала поверхности земли, для удаленной на расстояние x метров точки от вертикального заземлителя [84]:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}. \qquad (7.13)$$

Уравнение для определения потенциала вдоль заземлителя, где x – расстояние в метрах (рисунок 1.7,а) [84]:

$$\varphi_X = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x + l}{2x - l}. \qquad (7.14)$$

Уравнение для определения потенциала поперек заземлителя в зависимости от расстояния y (рисунок 1.7,б) [84]:

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{\sqrt{4y^2 + l^2} + l}{2y}. \qquad (7.15)$$

В области защитных заземлений, занулений одна из этих точек имеет потенциал заземления $\varphi_З$(В), а другая – потенциал поверхности, на которой стоит человек $\varphi_{ОСН}$(В). Напряжение прикосновения в этом случае вычисляется с помощью выражения $U_{пр} = \varphi_З \alpha_1$,

где α_1 – коэффициент прикосновения, учитывающий форму потенциальной кривой:

$$\alpha_1 = (1 - \frac{\varphi_{ОСН}}{\varphi_З}). \qquad (7.16)$$

При шаровом заземлении, к чему может быть сведен, например, фундамент опоры воздушной линии электропередач коэффициент прикосновения:

$$\alpha_1 = (1 - \frac{r}{x}). \qquad (7.17)$$

При одиночном стержневом вертикальном заземлителе:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\ln\frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln\frac{4l}{d}}. \qquad (7.18)$$

Максимальное значение $\alpha_1=1$ будет при удалении от заземления на расстоянии $x \geq 20$м.

Выбор параметров сложного заземления представлен на рисунке 7.19.

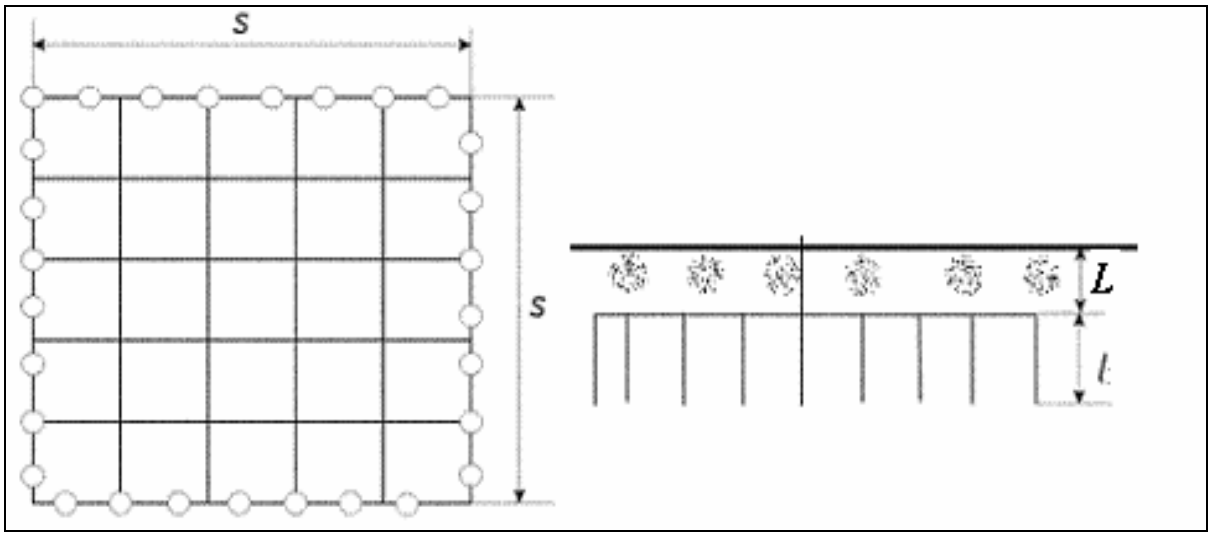


Рисунок 7.19 – Схема сложного заземления, состоящего из горизонтальной сетки с равномерно размещенным по периметру вертикальными электродами длиной l и заглублением от поверхности земли L

Для сложного заземления, выполненного в виде квадратной сетки со стороной S с равномерным размещением вертикальных электродов по периметру заземления (рисунок 7.19) коэффициент напряжения прикосновения может быть вычислен следующим образом:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{S}{n \cdot l \cdot L_\Gamma}}, \qquad (7.19)$$

где n – количество, а l – длина вертикальных электродов, L_Γ – суммарная длина горизонтальных электродов.

Напряжение шага. При одиночном заземлителе в виде полушара, к которому может быть сведен фундамент опоры воздушной линии электропередач, напряжение шага:

$$U_{Ш} = \varphi_З \cdot \frac{r}{x} - \varphi_З \frac{r}{x+a} = \varphi_З \cdot \beta_1, \qquad (7.20)$$

где а – коэффициент напряжения шага:

$$\beta_1 = \frac{r \cdot a}{x(x+a)}, \qquad (7.21)$$

здесь а – длина шага человека, х – расстояние до центра заземлителя, r – радиус шара.

При одиночном вертикальном заземлителе максимальное напряжение шага:

$$U_{Ш\ max} = \frac{I_З \rho}{2\pi l} \ln \frac{a}{r}. \qquad (7.22)$$

При горизонтальном заземлителе круглого сечения максимальное напряжение шага:

а) вдоль оси – $U_{Ш\ max} = \frac{I_З \rho}{2\pi l} \ln \frac{a \cdot l}{r^2}$ б) поперёк оси – $U_{Ш\ max} = \frac{I_З \rho}{\pi l} \ln \frac{a}{r}$. (7.23)

При расчете напряжений шага вблизи устройств заземления сложной формы в программе используются данные из таблицы 1.12.

7.6 Выводы

1. Разработанная программная реализация модели прогнозирования энергопотребления непрерывного нелинейного производства, имитирующая основные его технологические преобразования, позволяет автоматизировать

расчет энергопотребления его ЭТК при любых режимах функционирования, не прибегая к накоплению статистических данных.

2. Предлагаемая программная реализация модели, имитирующая функционирование рассматриваемого производства в динамическом режиме, позволяет автоматизировать процесс расчета изменения во времени его энергопотребления при переходе к иным технологическим режимам и может служить инструментарием для задач прогнозирования динамики изменения электропотребления ЭТК рассматриваемого производства, а также решения проблемы выравнивания нагрузки. Данная программа может прогнозировать возникновение техногенных катастроф при изменении технологических параметров рассматриваемого типа производств.

3. Разработанный алгоритм, имитирующий работу непрерывного инерционного энергоемкого производства, позволяет получить результат моделирования исследуемого процесса менее чем за 1 секунду и с погрешностью не более 3% на временном отрезке моделирования в 5 суток.

4. Вышеупомянутые программные модели, основанные на имитации основных производственных процессов, имеют алгоритмы автоматической идентификации и графического представления моделируемых величин.

5. Разработанная на основе методов искусственного интеллекта программная модель оптимального управления глиноземным производством с учетом изменения цен на энергоресурсы и сырье позволяет определить его наилучшие режимные параметры с точки зрения уменьшения энергопотребления, а так же себестоимости готовой продукции.

6. Предлагаемый алгоритм, использующий разработанные нечеткие модели определения ρ грунтов на основе их влажности и температуры, дает возможность автоматизировать их расчет с погрешностью до 30% без трудоемких измерений. Разработанная на данном алгоритме программа рассчитывает напряжение прикосновения и шаговое напряжение с учетом климатических условий, что позволит при своевременном оповещении работающего персонала предотвратить его электротравматизм в случае возникновения аварий на

электрооборудовании.

7. Программа, основанная на предлагаемой модели удельного электрического сопротивления слоев грунта, позволяет рассчитать сопротивления простых и сложных ЗУ в течение года в однородном и многослойном грунтах.

8. Разработанная программа расчета заземляющих устройств внедрена в проектной организации ООО «Проект-08» (г. Новосибирск) и в учебном процессе Новосибирского государственного технического факультета на кафедре Систем электроснабжения предприятий. Предполагается ее внедрение на Павлодарском алюминиевом заводе.

9. Получено авторское свидетельство РФ № 2018615950 на программу «Расчет заземляющих устройств и удельного электрического сопротивления грунта в конкретных климатических условиях на основе нечеткой логики».

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 стохастичекого 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 ЭТК 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 составление договора на поставку электроэнергии и позволяет избежать штрафов при отклонениях от оговоренной величины энергопотребления.

10.2. Проектирование устройств заземления с помощью предлагаемых моделей удельного электрического сопротивления грунта дает экономию по металлу около 50%.

Разработанные теоретические положения в совокупности с практическими 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. Разработанных 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 N 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://base.garant.ru/12171109/.

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 года № 2446-р. Государственная программа по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55070341/.

3. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»: механизмы реализации и финансирования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/902256884.

4. Постановление Правительства РФ от 24 октября 2003 г. № 643 «О правилах оптового рынка электрической энергии (мощности) переходного периода». [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://base.garant.ru/186416/.

5. Постановление Правительства от 27 декабря 2010г. № 1172 «Об утверждении правил оптового рынка энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://base.garant.ru/12184415/.

6. Приказ Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) от 30 ноября 2010 г. № 364-э/4 г. Москва Зарегистрирован в Минюсте РФ 27 января 2011 г. Регистрационный № 19594. «Правила применения цен (тарифов), определения стоимости электрической энергии (мощности), реализуемой на розничных рынках по регулируемым ценам (тарифам), оплаты отклонений фактических объемов потребления электрической энергии (мощности) от договорных, а также возмещения расходов в связи с изменением договорного объема потребления электрической энергии (мощности) на территориях, не объединенных в ценовые зоны оптового рынка». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://base.garant.ru/12182314/.

7. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/branch/ (дата обращения 12.06.2016).

8. Забелло, Е.П. О тарифной политике в электроэнергетике на современном этапе и на ближайшую перспективу/ Е.П. Забелло // Промышленная энергетика. – 2005. – №11. – С. 2-10.

9. Максимов, Б. К. Теоретические и практические основы рынка электроэнергии: учебное пособие/ Б.К. Максимов, В.В. Молодюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 292 с.

10. Злобин, А.А. Энергетические обследования. Проблемы и решения./ А.А. Злобин, В. Н. Курятов, А. П. Мальцев, Г. А. Романов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ite-audit.ru/working_out_bases.pdf.

11. Аюев, Б.И. Управление электропотреблением: административные и экономические методы/ Б.И. Аюев // Энергорынок. – 2007. – №4 . – 12с.

12. Карпов, И.В. Эффективность суточного регулирования нагрузки на рынке электроэнергии / И.В. Карпов, В.П. Обоскалов, Т.Ю. Паниковская // Электрические станции. – 2013. – №6. – С. 31 – 35.

13. Электротехнический справочник: В 4 Т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы /Под общей ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: МЭИ, 2003. – 440 с.

14. Алиев, И.И. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / И.И. Алиев. – Ростов н/Д.: Феникс, 2004. – 480с.

15. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений/ Б.И. Кудрин. – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

16. Волобринский, С.Д. Электрические нагрузки промышленных предприятий/ С.Д. Волобринский [и др]. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.

17. Малафеев, А.В. Математическое представление электрических нагрузок промышленных предприятий в задаче определения потерь электроэнергии с использованием аппарата теории нечетких множеств/ А.В. Малафеев, А.А. Антоненко// Промышленная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 9-13.

18. Дзевенецкий, А.Я. Метод нормирования электроэнергии на предприятиях с изменяющимися режимами потребления мощности/ А.Я. Дзевенецкий, Ф.А. Хашимов, А.З. Шукуров // Промышленная энергетика. – 1996. – №5. – С. 4-6.

19. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

20. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике для вузов и втузов / М.Я. Выгодский. – М.: «Джангар», ООО «Большая медведица», 1998. – 864с.

21. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей/ Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1969. – 400с.

22. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование. Учебник / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 228 с.

23. Белан, А.В. Пути и результаты совершенствования методов прогнозирования электропотребления / А.В. Белан, В.И. Гордеев, А.В. Демура, И.И. Надтока // Промышленная энергетика. – 1993. – № 9-10. – С. 23-26.

24. Головкин, Б. Н. Прогноз электропотребления промышленного предприятия в условиях нестабильной экономики/ Б.Н. Головкин, В.Н. Пирогов, А.П. Старцев // Промышленная энергетика. – 1996. – № 2. – С. 8-12.

25. Бабинович, Д.Е. Особенности прогнозирования потребления электроэнергии для промышленных предприятий/ Д.Е. Бабинович // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Томск. – 2012. – С. 99-101.

26. Барыкин, Е.Е. Исследование динамики удельных показателей электроэнергии промышленных предприятий / Е.Е. Барыкин, А.В. Витушко, Э.М. Косматов, Л.И. Малькова // Промышленная энергетика. – 1998. – №8. – С. 2-8.

27. Грачева, Е.И. Определение расхода электроэнергии на основе математической модели/ Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова // Промышленная энергетика. –1999. – №4. – С. 24-26.

28. Борцов, Ю. А. Использование современных подходов и методов для прогнозирования электропотребления / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, Е. С Анушина // Электротехника. – 2006. – № 8. – С. 30-35.

29. Гамбаров, Г.М. Статистическое моделирование и прогнозирование / Г.М. Гамбаров, Н.М. Журавель, Ю.Г. Королев и др.; под ред. А.Г. Гранберга. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 383 с.

30. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

31. Бранд, 3. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / 3. Бранд. – пер. с англ. – М.: Мир, ООО Издательство АСТ, 2003. – 686 с.

32. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.

33. Кендэл, М. Временные ряды. / М. Кендэл – Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1981 г. – 199с.

34. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 520 с.

35. Никифоров, Г.В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве / Г.В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 1999. – №3. – С. 27-29.

36. Токочакова, Н.В. Структурное моделирование суточного электропотребления промышленных предприятий энергосистемы для быстрой оценки электросбережения / Н. В. Токочакова, В. И. Токочаков, Т.В. Алферова // Энергоэффективность. – 2001. – № 2. – С.18–21.

37. Кистенев, В.К. Прогнозирование электропотребления Забайкальской железной дороги на основе устойчивого Н-распределения / В.К. Кистенев, П.Ю. Лукьянов // Электрика. – № 7. – 2005. – С. 19-22.

38. Надтока, И.И. Многофакторные регрессионные модели электропотребления промышленного предприятия /И.И. Надтока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1998. – № 2-3. – С. 72-74.

39. Токочакова, Н. В. Нормирование и прогнозирование расхода электрической энергии предприятий транспорта нефти в заданных условиях функционирования / Н. В. Токочакова // Вестник Гомелевского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2006. – №4. – С. 67-77.

40. Родина, Л. С. Разработка универсальных структурных моделей суточного электропотребления промышленных предприятий / Л.С. Родина, Н.В. Токочакова, В. И. Токочаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1992. – № 2. – С. 101-104.

41. Родина, Л.С. Моделирование режимов электропотребления предприятий транспорта нефти / Л. С. Родина, Н. В. Токочакова, Ю.Н. Колесник // Вестник МЭИ. – 2002. – № 3. – С. 71-76.

42. Кудрин, Б.И. Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов / Б.И. Кудрин, А. В. Мозгалин // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С. 105-108.

43. Токочакова, Н.В. Разработка математических моделей режимов электропотребления промышленных потребителей на примере предприятий трубопроводного транспорта нефти / Н. В. Токочакова, А. С. Фиков //

Вестник Гомелевского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2007. – № 1. – С. 71-84.

44. Хачатурова, С.М. Математические модели системного анализа. Электронный учебник. /Под ред. Л.Г. Макаревича / С.М. Хачатурова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ermak.cs.nstu.ru/mmsa/main/proba.htm

45. Дэниел, Н. Применение статистики в промышленном эксперименте. Пер. Э.К. Лецкий; под ред. Э.К. Лецкого / Н. Дэниел. – М: Мир, 1979. – 299 с.

46. Бородич, С. А. Вводный курс эконометрики: Учебное пособие. / С.А.Бородич. – Мн.: БГУ, 2000. – 354 с.

47. Заенцев, И. В. Нейронные сети. Основные модели. / И.В. Заенцев. – Воронежский государственный университет, 1999. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nncourse.chat.ru/course.pdf.

48. Кулбараков, М.А. К задаче прогнозирования энергопотребления с помощью нейронных сетей / М.А. Кулбараков // Молодой ученый. – 2014. – №11. – С. 22-25.

49. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ./ Р. Каллан. – М.: Издательский дом Вильямс, 2001. – 287 с.

50. Божков, М.И. Эвристический анализ данных АИИС КУЭ для краткосрочного прогнозирования электропотребления предприятия / М.И. Божков, С.Л. Пущин // Промышленная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 8-11.

51. Melamed, A.M. Improvement of electric power system load forecasting and operational planning for control automation / A.M. Melamed, Y.I. Morzhin, V.F. Timchenko, E.V. Tsvetkov // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 1989. Vol. 11. – №3. – P. 218-222.

52. Tzafestas, S. Computational intelligence techniques for short-term electric load forecasting / S.Tzafestas, E. Tzafestas // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2001. Vol. 31. – №1-3. – P. 57-68.

53. Weinert, Nils. Methodology for planning and operating energy-efficient production systems / Nils Weinert, Stylianos Chiotellis, Günther Seliger //CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, N 1. – 2011. – P. 41–44.

54. Seow, Y. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. / Y. Seow, S. Rahimifard // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 4, N 3. – 2011. – P. 258–264

55. Verl, A. Modular Modeling of Energy Consumption for Monitoring and Control. / A. Verl, E. Abele, U. Heisel, A. Dietmair, Ph. Eberspächer, R. Rahäuser, S Schrems, St. Braun // Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd-4th. – 2011. 9p.

56. Ицкович, Э.Л. Автоматизация оперативного управления непрерывным производством. Задача линейной статической оптимизации / Э.Л. Ицкович, Л.Р. Сорокин. – М.: ИПУ, 1985. – 50с.

57. Щербаков, О.В. Оперативно-диспетчерское управление крупным нефтехимическим предприятием / О.В. Щербаков, Ю.З. Шапиро, Т.М. Шелоумова, В.И. Шувалова // Приборы и системы управления. – 1993. – №12. – С. 19-21.

58. Пиггот, С.Г. Интегрированные АСУ химическими производствами / С.Г. Пиггот. – М.: Химия, 1985. – 120с.

59. Прангишвили, И.В. Основы построения АСУ сложными технологическими процессами / И.В. Прангишвили, А.А. Амбарцумян. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 304с.

60. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер. – М.:Металлургия, 1978. – 344с.

61. Еремин, Н.И. Процессы и аппараты глиноземного производства / Н.И. Еремин, А.Н. Наумчик, В.Г. Казаков. – М.: Металлургия, 1980. – 360с.

62. Троицкий, М.А. Металлургия алюминия / М.А. Троицкий, В.А. Железнов. – М.: Металлургия, 1977. – 392с.

63. Самарянова, Л.Б. Технологические расчеты в производстве глинозема / Л.Б. Самарянова, А.И. Лайнер. – М.: Металлургия, 1981. – 280с

64. Розин, Б.Б. Оптимизация конечных показателей работы предприятия на основе анализа взаимодействия технологических переделов (на примере цветной металлургии) / Б.Б. Розин, В.М. Соколов, Н.П. Чурляева // Модели предприятия в экономике, анализе и управлении производством. – Новосибирск: СОАН СССР. – 1986. – С.3-18.

65. Параска, В.И. Система оперативной экономической оптимизации процессов глиноземного производства / В.И. Параска, М.Я. Фитерман // Цветные металлы. – 2007. – №4. – С.93-95.

66. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 283с.

67. Николаев, И.В. К вопросу об эффективности использования оптимизационной модели глиноземного завода для технико-экономического анализа производственной ситуации / И.В. Николаев, Д.А. Савельев // Цветные металлы. - 2007. - № 5.-С. 59-63.

68. Klein, R.A. Total Quality Management in Bauxite Processing. The Role of MVC / R.A. Klein // Light Metals. – 1992. – P. 35-38.

69. Melntosh, P. Optimum control of bauxite charge to high temperature. Digestion units at QAL / P. Melntosh // Light Metals. – 1984. – P. 27- 38.

70. Dewhurst, L. Development of a Bayer plant model. / L. Dewhurst // Light metals. – 1994. – P. 231-236.

71. Sidrak, Y. L. Dynamic simulation and control of the Bayer process. A review //Industrial & engineering chemistry research. – 2001. – Т. 40. – №. 4. – P. 1146-1156.

72. Kumar R. et al. Mechanochemistry and the Bayer process of alumina production //Light Metals-Warrendale-Proceedings. – TMS, 2004. – P. 31-34.

73. Chelgani, S. C., Jorjani, E. Artificial neural network prediction of Al2O3 leaching recovery in the Bayer process—Jajarm alumina plant (Iran) //Hydrometallurgy. – 2009. – Т. 97. – №. 1-2. – С. 105-110

74. Библия электрика: справочник / авт.-сост. Н. В. Белов. – Минск: Харвест, 2011. – 640с.

75. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М: НГТУ, МЭИ ТУ, НПФ ЭЛНАП и АО Фирма ОРГРЭС, 2000. – 54с.

76. Бухаров, А.И. Основы безопасной эксплуатации электроустановок / А.И. Бухаров, В.В. Петунин. – М.: Военное издательство, 1989. – 272 с.

77. Цапенко, Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

78. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства промышленных электроустановок: Справочник электромонтажника. Под ред. Смирнова А.Д. и др. / Р.Н. Карякин, В.И. Солнцев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 191с.

79. Целебровский, Ю.В. Измерение сопротивлений заземления опор ВЛ / Ю.В. Целебровский, М.Ш. Микитинский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 48с.

80. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002. – 218с.

81. Карякин, Р.Н. Нормы устройства сетей заземлений / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002. – 234с.

82. Сибикин, Ю.Д. Электрические подстанции: Учеб. пособие высшего и среднего профиссионального образования / Ю.Д. Сибикин. – М.:ИП РадиоСофт, 2012.- 416с.

83. Усов, С.В. Электрическая часть электростанций. Учебник для вузов / С.В. Усов.– Л: Энергия, 1977. – 556с.

84. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов./ П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448с.

85. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

86. Güemes, J.A. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM / J.A. Güemes, F.E. Hernando // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – N 2. – P. 595-600.

87. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. – М: МЭИ ТУ и НПФ ЭЛНАП, 2004. – 60 с.

88. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л.А. Бессонов. – М.: ЮРАЙТ, 2012. – 752с.

89. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. 5-е изд. Т. 1./ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.

90. Найфельд, М.Р. Заземление и другие защитные меры / М.Р. Найфельд. – М.:Энергия, 1975. – 104 с.

91. Безрук, В.М. Геология и грунтоведение / В.М. Безрук. – М.: Недра, 1977. – 256с.

92. Ковды, В. А. Почвоведение. Учеб. для ун-тов / В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. – М.: Высшая школа, 1988. – 400 с.

93. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов: Учеб.пособие для автом.-дор.спец.вузов. – 2-е изд., перераб. и доп / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1986. - 239 с.

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

95. Zadeh, L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P.338-353.

96. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165с.

97. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы /Пер. с пол. И.Д. Рудинского. /Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 452с.

98. Яхъяева, Г.Э. Нечетки множества и нейронные сети: учебное пособие / Г.Э. Яхъяева. – М.: БИНОМ, 2006. – 316 с.

99. Круглов, В.В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода / В.В. Круглов, М.И. Дли. – М.: Физматлит, 2002. – 256с.

100. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.:Мир, 1982. – 432с.

101. Богатырев, Л.Л. Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем в условиях неопределенности / Л.Л. Богатырев, В.З. Манусов, Д. Содномдорж.– Улан-Батор: Изд-во Типографии МГТУ, 1999. – 348с.

102. Гуц, А.К. Математическая логика и теория алгоритмов: Учебное пособие / А.К. Гуц. – Омск: издательство Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. -108с.

103. Пивкин, В. Я. Нечеткие множества в системах управления / В.Я.Пивкин, Е.П. Бакулин, Д.И. Кореньков. – Н.: НГУ, 2006. – 40 с.

104. Попов, А.А. Регрессионное моделирование на основе нечетких правил / А.А. Попов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2000. – №2(19) – С. 49-57.

105. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учеб пособие / В.В.Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 224с.

106. Берх, В.И. Математическое описание кинетики разложения алюминатного раствора / В.И. Берх, Е.Д. Краснопольский // Цветные металлы. – 1971. – №11. – С.34-37.

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

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

109. Зайцева, Н.М. Прогнозирование энергопотребления узла нагрузки с энергоемким нелинейным производством / Н.М. Зайцева // Материалы докладов XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность». Томск, 4-6 декабря 2013. – С. 62-65.

110. Zaytseva,N.M. Modeling of power consumption by nonlinear inertial production / Z.N Mikhaylovna // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, (MEACS), Russia, Tomsk. 4 p.

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

112. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1988. – 549 с.

113. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. Пособие / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.

114. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука. – 1973. – 632с.

115. Турчак, Л.И. Основы численных методов. Учебное пособие / Л.И. Турчак. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

116. Самарский А.А. Численные методы. Учебное пособие для вузов по специальности Прикладная математика / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 429с.

117. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров состояния.: Пер. с англ / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 683 с.

118. Куропаткин, П.В. Теория автоматического управления. Учебное пособие для электротехнических специальностей вузов / П.В. Куропаткин. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.

119. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: Учеб. Пособие для вузов/ А.С. Востриков, Г.А.Французова. – М.: Высшая школа, 2006. – 365с.

120. Перельман, И.И. Оперативная идентификация объектов управления / И.И. Перельман. – М.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.

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

122. 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.

123. 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.

124. Зайцева, Н.М. Современное состояние технологии спекания и исследование моделей приготовления шихт в производстве глинозема / Н.М. Зайцева, Е.К. Каулина //Сборник научных трудов ИнЕУ. – 2010. – №1. – С. 82-84.

125. Воронов, А.Л. Основы теории автоматического управления: Особые линейные и нелинейные системы / А.Л. Воронов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.

126. Роточ, В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Роточ. – М.: Энергоиздат, 1985. – 286 с.

127. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть 2. Динамика / А.А. Яблонский. – М.: Высш. шк., 1966. – 412 с.

128. 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.

129. Гуртовцев, А. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика / А. Гуртовцев, Е. Забелло // Новости Электротехники. – 2008. – №5. С. 15-20.

130. Лукутин, Б.В. Исследование закономерностей формирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей Республики Саха (Якутия) / Б.В. Лукутин, Г.Н. Климова, С.Г.Обухов, Е.А.Шутов, Н.М.Парников //Электрические станции. – 2008. – № 9. – С. 53-58.

131. Зайцева, Н.М. Автоколебания в нелинейной системе, генерируемые математической моделью непрерывного производственного комплекса / Н.М. Зайцева, Т.Б. Потапова // Труды третьей межд. научно-техн. конф. АПЭП-96. Новосибирск. – 1996. – С. 45-47.

132. 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.1-5.

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

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

135. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В Курейчик, В.М. Курейчик /Под ред. В.М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 320с.

136. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence/J.H. Holland. – The MIT Press, Cambridge, 1992. – 225 p.

137. Пупков К.А. Интеллектуальные системы./ К.А. Пупков, В.Г Коньков. – М.: МГТУ им. Баумана, 2003. – 348 с

138. Панченко, Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю. Ю. Тарасевича./Т.В Панченко. – Астрахань: Издательский дом Астраханский университет, 2007. – 87с.

139. Крапухина Н.В. Методы искусственного интеллекта в задачах оперативного управления и оптимизации сложных технологических комплексов /Н.В. Крапухина, К. М. Пастухова, П.А. Свиридов //Проблемы управления. – 2003. – № 3. – С.21-24.

140. Матренин, П.В. Методы стохастической оптимизации: учебное пособие /П.В. Матренин, М.Г. Гриф, В.Г. Секаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 63 с.

141. Dorigo, M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents./ M.Dorigo. // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. 1996. – Vol. 26. – N 1. – P 29-41.

142. Pham, D.T. The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems / D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi [Электронный ресурс] //Technical Note. Manufacturing Engineering Centre. Cardiff University. UK. 2005. URL: https://svn-d1.mpi-inf.mpg.de/AG1/MultiCoreLab/papers/Pham06%20-%20The%20Bee%20Algorithm.pdf.

143. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. / А.П. Карпенко // Приложение к журналу Информационные технологии. – 2012. – №7. – С.1-32.

144. Зайцева, Н.М. Математическая модель оценивания целесообразности оптимизации режимов АСУТП глиноземного производства / Н.М. Зайцева, Т.Б. Потапова // Труды второй межд. научно-техн. конф. АПЭП-94. Новосибирск. – 1994. – Том 2. – С.115-117.

145. Зайцева, Н.М. Модель оперативного управления замкнутым инерционным производством / Н.М. Зайцева // Сборник научных трудов ИнЕУ. – 2007 г. – №2. – С. 45-53.

146. Зайцева, Н.М. Моделирование оперативного управления замкнутым инерционным производством в современных условиях / Н.М. Зайцева // Сборник научных докладов Всероссийской научно-практ. конф. «Математические модели и методы в управлении, экономике и социологии» Тюмень. – 2008. – С. 144-152.

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

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

149. Зайцева, Н.М. Оптимальное управление энергоемким нелинейным производством на основе себестоимости его продукции / Н.М. Зайцева // Материалы IX Междунар. научно-техн. конф. «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования». Вологда. – 2014г. – С. 81-85.

150. Зайцева, Н.М. Эффективность детерминированной модели энергопотребления нелинейного замкнутого производства / Н.М. Зайцева // Материалы трудов научно-техн. конф. «Состояние и пути развития российской энергетики». – Томск. – 2014 г. – С. 340-344.

151. Takagi Tomohiro. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control./ Tomohiro Takagi, Michio Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, N 1. 1985. – P. 116-132.

152. Piegat Andrzey. Fuzzy Modeling and Control./ Andrzey Piegat. – Phisyca-Verlag, 2008. – 687 p.

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

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

155. 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.

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

157. Зайцева, Н.М. Методология построения модели электропроводности грунтов на основе нечеткой логики / Н.М. Зайцева // Сборник научных трудов ИнЕУ. – 2007. – №2. – С. 45-53.

158. Зайцева, Н.М. Разработка температурно-влажностной модели однородного грунта / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова //Сборник научных трудов ИнЕУ. - 2008. – №1. – С. 45-53.

159. 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.

160. Зайцева, Н.М. Определение удельного электрического сопротивления грунта на основе использования нечеткой логики: Монография / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель. – Павлодар: Инновационный Евразийский университет, 2014. – 151 с.

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

162. 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.

163. Зайцева, Н.М. Влияние уплотнения грунта на его удельное электрическое сопротивление / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Сборник научных трудов ИнЕУ. – 2009. – №1. – С. 177-180.

164. СН РК 1.02-18-2007. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Технические требования к производству работ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30399982#pos=0;0.

165. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов: Учеб.пособие для автом.-дор.спец.вузов. – 2-е изд., перераб. и доп / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высш.шк, 1986. – 239 с.

166. Ю. И. Жуков Аналитический отчет. Международная Конференция по безопасности и охране труда в энергетике. SAPE. 2010. – 5с.

167. Демин, В.И. К вопросу оценки состояния электробезопасности на предприятиях./ В.И. Демин, Ю.Н. Седой, Д.С. Гром. //Научные труды КубГТУ. – 2015. – №3. – 20с.

168. Хромов, С.П. Метрология и климатология: Учебник / С.П. Хромов, М.А. Петросянц – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 528 с.

169. Лосев, А.П. Агрометеорология / А.П. Лосев, Л.Л. Журина. – М.:Колос. - 2004. – 301 с.

170. Кідрук, М.І. Моделювання та оптимізація систем теплопостачання будівель з використанням відновних джерел енергії. Частина 1: Моделювання теплового режиму будинку. / М.І. Кідрук // Нова тема. – 2007. – №4. – С.13-16.

171. Kavanaugh, P.K. Ground-source Heat Pumps – Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings / P.K. Kavanaugh and K. Rafferty // Publishing of American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA, 1997. - 223 p.

172. Васильев, Г.П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России / Г.П. Васильев // АВОК. Отопление, Вентиляция, Кондиционирование Воздуха, Теплоснабжение и Строительная Теплофизика. – 2007. – №5. – С.58-74.

173. Большая советская энциклопедия. Т11 – М: Советская энциклопедия, 1973. – 607 с.

174. Муха, В.Д. Агропочвоведение / В.Д. Муха, Н.И. Картамышев. – М.: КолосС, 2003.– 528 с.

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

176. 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.

177. 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.

178. 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.

179. Zaytseva, N.M. Automation of Calculation of Resistances of Grounds/ N.M. Zaytseva, M.Y. Kletsel, B.B. Issabekova // World Applied Sciences Journal (WASI) International Digital Organization for Scientific Information, Pakistan. – 2013. – N 25(6). – P. 921-926.

180. 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.

181. 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.

182. 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. – С.48-52.

183. 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.

184. Зайцева, Н.М. Эффективность детерминированной модели энергопотребления нелинейного замкнутого производства / Н.М.Зайцева // Материалы трудов «Состояние и пути развития российской энергетики». Всероссийская молодежная научная школа-конференция. – Томск. – 2014. – С. 340-344.

185. Методические указания для расчета экономической части дипломного проекта: методическая разработка. – Павлодар: ПГУ, 2003. – 21 с.

186. Водянников, В.Т. Экономическая эффективность информационных технологий: проблемы и решения / В.Т. Водянников // Финансовая газета. Региональный выпуск. – 2003. – №27, 28. –14 с.

187. Поляков, Д.Б. Программирование в среде ТУРБО ПАСКАЛЬ (версия 5.5). Справочно-методическое пособие / Д.Б. Поляков, И.Ю. Круглов. – М.: изд-во МАИ, 1992. – 576 с.

188. Архангельский, А.Я. Программирование в Delphi 6 / А.Я. Архангельский. – М.: ЗАО Издательство БИНОМ, 2002. – 1120 с.

189. Александров, П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / П.С. Александров. – М.: Наука, 1979. – 511 с.

190. Бугров, Я.С. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Наука, 1988. – 222 с.

191. 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. – 18-19th February 2013. – Vol. 3. – P.28-31.

192. Zaytseva, N.M. Efficiency of the determined model of power consumption by nonlinear closed slow-response production / N.M. Zaytseva //Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 561-565.

193. Зайцева, Н.М. Решение ряда электроэнергетических задач с использованием методов искусственного интеллекта / Н.М. Зайцева //Омский научный вестник. – 2017. – №4 – С55-59

194. 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.

195. Зайцева,Н.М. Управление технологическим процессом сложного непрерывного производства на основе построения его энергоэффективной модели. //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

196. Зайцева, Н.М. Автоматизация расчета электрических характеристик заземлителей / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Вестник ПГУ. – 2013. – №1. – С. 46-49.

197. Зайцева, Н.М. Программа для расчета сопротивлений заземлителей / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Труды Всероссийской научно-техн. конф. с междун. участием «Надежность функционирования и информационная

безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта». – Омск. – 14-15 ноября 2013. – С. 39-44.

198. 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.

199. 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.

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

201. 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. – С. 1-6.

Приложение А. Таблицы для расчета энергопотребления производств

Таблица А.1 – Показатели электрических нагрузок приемников и потребителей электроэнергии в машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности

Потребители электроэнергии	Коэффициенты			
	$К_и$	cosφ	$К_с$	$К_в$
Металлорежущие станки:				
мелкосерийного производства с нормальным режимом работы: мелкие токарные, строгальные, долбежные, фрезерные, сверлильные, карусельные, точильные и т. п.	0.12	0.4	0.14	0.56
крупносерийного производства	0.16	0.5	0.2	0.57
при тяжелом режиме работы: штамповочные прессы, автоматы револьверные, обдирочные, зубофрезерные, а также крупные токарные, строгальные, фрезерные, карусельные и расточные станки	0.17	0.65	0.25	—
с особо тяжелым режимом работы: приводы молотов, ковочных машин, волочильных станков, очистных барабанов, бегунов и др.	0.2	0.65	0.35	—
Многошпиндельные автоматы для изготовления деталей из прутков	0.2	0.5	0.23	0.88
Шлифовальные станки шарикоподшипниковых заводов	0.2-0.35	0.65	0.25-0.4	
Автоматические поточные линии обработки металлов	0.5-0.6	0.7	0.5-0.6	—
Переносный электроинструмент	0.06	0.5	0.1	—
Подъемно-транспортные механизмы:				
элеваторы, транспортеры, шнеки, конвейеры несблокированные	0.4	0.75	0.5	—
то же сблокированные	0.55	0.75	0.65	—
краны, тельферы при ПВ 25 %	0.05	0.5	0.1	—
то же при ПВ 40%	0.1	0.5	0.2	—
Сварочное оборудование:				
трансформаторы для ручной сварки	0.3	0.35	0.35	—
трансформаторы для автоматической и полуавтоматической сварки машины:	0.35	0.5	0.5	—
шовные	0.25	0.7	0.35	—
стыковые и точечные	0.35	0.6	0.6	—
дуговые сталеплавильные емкость 0,5 -1.5 т для фасонного литья (в цехах с автоматическим регулированием электродов)	0.5	0.8	0.55	0.6
Насосы, компрессоры, двигатели-генераторы	0.7	0.8	0.75	—
Вентиляторы, эксгаустеры, вентиляционное оборудование	0.65	0.8	0.7	—
Литейные машины, очистные и кантовочные барабаны, бегуны, шаровые мельницы и т. п.	0.3	—	0.4	—

Однопостовые двигатели-генераторы	0.3	0.6	9.35	—

Продолжение таблицы А.1

То же многопостовые	0.5	0.7	0,7	—
Однопостовые двигатели-генераторы	0.3	0.6	9.35	—
То же многопостовые	0.5	0.7	0,7	—
Однопостовые двигатели-генераторы	0.3	0.6	9.35	—
То же многопостовые	0.5	0.7	0,7	—
Электрические печи:				
сопротивления с непрерывной (автоматической) загрузкой,	0.7	0.95	0.8	—
сушильные шкафы с периодической загрузкой	0.5	0.85	0.6	0.6
индукционные низкой частоты	0.7	0.35	0.8	—
дуговые сталеплавильные емкостью 3-10т с автоматическим регулированием электроприводов:				
для качественных сталей с механизированной загрузкой	0.75	0.9	0.8	0.85
для качественных сталей без механизированной загрузки	0.6	0.87	0.65	0.7
для фасонного литья с механизированной загрузкой	0.75	0.9	0.8	0.85
Механизмы непрерывного транспорта:				
Питатели пластинчатые, барабанные, дисковые и т.п.	0.3-0.4	—	0,6	—
Конвейеры легкие мощностью до 10 кВт	0.4-0.5	—	0.6	—
То же мощностью свыше 10 кВт	0.55-0.75	—	0.6-0.8	—
Транспортеры ленточные	0.5-0.6	—	0.6-0.8	—
Транспортеры винтовые	0.65	—	0.7	—
Элеваторы ковшовые, вертикальные и наклонные, шнеки, конвейеры и т. п. несблокированные	0.4	—	0.5	—
То же сблокированные	0.55	—	0.65	—
Механизмы дробления и измельчения:				
Дробилки шнековые и конусные для крупного дробления	0.4	—	0.5	—
То же для среднего дробления	0.6-0.7	—	0.7-0.8	-
Дробилки конусные для мелкого дробления, валковые и молотковые мощностью до 100 кВт	0.75-0.8	—	0.85	—
То же мощностью свыше 100 кВт	0.75-0.85	—	0.9	—
Грохоты	0.5-0.6	—	0.6-0.7	—
Мельницы шаровые	0.75-0.9	—	0.85	—
Краны, тельферы, подъемники:				
Грейферные	0.35	—	0.4	—
Магнитные	0.5	—	0.55	—
Штабелеры	0.16	—	0.35	—
Скиповой подъемник	0.05	—	0.1	—
Электротележки	0.1	—	0.2	—
Дымососы	0.9	—	0.95	—
Газодувки	0.8	—	0.95	—
Воздуходувки	0.5-0.7	—	0.75	—
Компрессоры	0.65	—	0.8	—

Таблица А.2 – Значения технологических параметров трех режимов работы глиноземного производства для расчета энергопотребления

Параметры режима производства	HP1	HP2	HP3
A1	0.437	0.44	0.483
Извлечение	0.7299	0.6909	0.903
B2	0.2256	0.1937	0.2058
A2	0.1272	0.1094	0.1185
M2	2.92	2.91	2.86
B3	0.1779	0.1534	0.2137
A3	0.1816	0.1603	0.2431
M3	1.61	1.57	1.45
B5	0.1242	0.1176	0.1455
A5	0.1215	0.1187	0.1570
M5	1.68	1.63	1.52
B6	0.0580	0.0520	0.0527
A6	0.0538	0.0494	0.0501
M6	1.77	1.73	1.73
B11	0.1288	0.1193	0.137
A11	0.0709	0.0645	0.0804
M11	2.99	3.04	2.82
B16	0.0305	0.025	0.039
N/A	0.508	0.588	0.17
Кратность промывки	3	3.5	5.5
Ж/Т	3.57	3.32	2.4
Затравочное отношение (XZ)	1.12	2.6	3.56
Температура начала декомпозиции	61.6	62.9	62.1
Температура конца декомпозиции	51.0	52.8	55.6
Время декомпозиции	56.3	51.2	58.1

Приложение Б. Фрагмент листинга программы расчета энергопотребления ЭТК рассматриваемого типа производств

Процедура моделирования потоков вещества и энергии в цикле Байера

```
    procedure mainbloc (dalfa, b50, gam5, k5: real; VAR
fb,tb,f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,f9,f10,f11,f12,f13,f14,f16, a1,a2,a3,a4,a5,a6,a8,a9,a11,a16,

b2,b3,b4,b5,b6,b8,b9,b11,b16,g8,g9,gamma1,gamma5,gamma16,Rn,ap,a,b,c:real);
        var rab,df3,da3,db3:real;
          kl,f2n,rab1,rab2:real;
           pw,mpg,tp,eps,dt,r1,k1,ar,at,ltr:real;
           bol,bol1:boolean;
           i,j,k:integer;
        label cikl;
      // функция для решения дифференциального уравнения блока V
       function fa9(g8,a8,ar,at,k1,u,s:real):real;
       begin
           fa9:=-u*k1*(-0.96+29*s)*((g8/(1.529-0.629*g8)+a8)-at)*
          ((at-ar)/ar)*((at-ar)/ar);
      end;
      // функция для аппроксимации температуры декомпозиции
       function t(ltr,a,b,c:real):real;
       var x,y:real;
        begin
       y:=abs((-b-sqrt(b*b-4*a*(c-ltr)))/(2*a));t:=y;
       end;
        begin eps:=0.001;   kl:=0;f2n:=900;
        cikl:
      {********************** Блок 1 ******************************}
        f4:=f1*(1-a1*n1)+a1*f1*(1-n1)*h1;
        f13:=f1*a1*(1-n1)*h1+b16*f16;
        rab:=f1*a1*(n1-(1-n1)*h1)/gamma1;
        f2:=(f1*a1*(n1*alfa3/1.645+(1-n1)*h1)-f13)/(b2-a2*alfa3/1.645);
        f3:=(rab+f2);
        f3m:=(rab+f2)*(1+Ub);
        a3:=(f1*a1*n1+a2*f2)/f3;
        a3m:=(f1*a1*n1+a2*f2)/f3;
        b3:=(f2*b2+f13-f1*a1*(1-n1)*h1)/f3;
        b3m:=(f2*b2+f13-f1*a1*(1-n1)*h1)/f3;
        b4:=f1*a1*(1-n1)*h1/f4;
        a4:=f1*a1*(1-n1)/f4;
        {********************** Блоки  2-7 ******************************}
```

```
        gamma5:=gam5+k5*(b5-b50);
        df3:=f4*ap/gamma5;
                    if (b5>0.15)  then begin
      {*****     Решение системы нелинейных уравнений, первый вариант
**********}
       repeat
        if6:=ap*f4*b5*(1-beta)/(b6*gamma5);
        rri:=(f3+if6)*gamma5/(ap*f4);
        rab1:=ln(abs(rri));
        rab1:=exp((N+1)*rab1)-1;
        betai:=(rri-1)/rab1*Rn;
        ib6:=(if6*b5-f3*(b3-b5))/if6;
        if14:=f6-f4*(ap/gamma5-ap/gamma16);
        igamma16:=gam16+k16*(b16-b160);
        ib16:=igamma16*b5*betai/gamma5;
      {bol:=true;
        bol:=(abs(rri-rr)/10<eps)and(abs(betai-beta)/10<eps);
        bol:=bol and(abs(ib6-b6)<eps);
        bol:=bol and(abs(if6-f6)/2000<eps);
       until    bol;}
      bol1:=true;
        bol1:=(abs(if14-f14)/10<eps)and(abs(rri-rr)<eps)
             and(abs(betai-beta)/10<eps);
        bol1:=bol1 and(abs(ib6-b6)<eps)and(abs(ib16-b16)<eps);
        bol1:=bol1 and(abs(if6-f6)/100<eps)and(abs(gamma16-igamma16)<eps);
        rr:=rri;
        f14:=if14;
        b16:=ib16;
        beta:=betai;    f6:=if6;
        b6:=ib6;
        gamma16:=igamma16;gamma5:=gamma5;
       until    bol1;
       end else begin
      {*******     Второй вариант представления системы нелинейных ур-
ий**********}
      repeat
        if6:=(f3*(b3-b5))/(b5-b6);
        rri:=(f3+if6)*gamma5/(ap*f4)+f3*(b3-b5)/(b5-b6)-if6;
        rab1:=ln(abs(rri));
        rab1:=exp((N+1)*rab1)-1;
        betai:=(rri-1)/rab1*rn+f3*(b3-b5)/(b5-b6)-if6;
        if14:=f6-f4*(ap/gamma5-ap/gamma16);
        ib6:=ap*f4*b5*(1-betai)/(gamma5*if6)+f3*(b3-b5)/(b5-b6)-if6;
        igamma16:=gam16+k16*(b16-b160);
        ib16:=igamma16*b5*betai/gamma5;
```

```
bol:=true;
   bol:=(abs(rri-rr)<eps)and(abs(betai-beta)<eps)and(abs(if14-f14)/10<eps);
   bol:=bol and(abs(ib6-b6)<eps)and(abs(ib16-b16)<eps);
   bol:=bol and(abs(if6-f6)/10<eps)and(abs(gamma16-igamma16)<eps);
rr:=rri;
beta:=betai;  f14:=if14;  f6:=if6;
b6:=ib6;   b16:=ib16;
gamma16:=igamma16;gamma5:=gamma5;
 until     bol; end;
{************  решение оставшихся  уравнений ***************}
    alfa6:=alfa3+dalfa;
    a6:=1.645*b6/alfa6;
    f5:=f3+f6-df3;
    a5:=(f3*a3+a6*f6)/(f5+df3);         {-df3*a5.....????}
    f16:=f4*ap/gamma16;
    a16:=(f4*ap*a5/gamma5-a6*f6)/f16;
    alfa16:=1.645*b16/a16;
    alfa5:=1.645*b5/a5;
{********************** Блок  3 ******************************}
   f7:=z*a5*f5/kg;
   f8:=f5+f7/gammag;
   a8:=a5;
   b8:=b5;
   g8:=f7/f8;
   {********************** Блок  4 ******************************}
 {      основная ветвь расчета        }
   b8:=b8*1000;
    {  Решение дифференциального уравнения  }
    tp:=fb/f8*tb;    { Длительность процесса декомпозиции  }
    dt:=sqrt(eps);      {  Шаг интегрирования, точность }
    at:=a8;
   ltr:=0;
   repeat
      r1:=t(ltr,a,b,c);
   ar:=1.1*exp(2.3*(0.92-1.76e-2*r1+4.09e-4*b8*r1+0.29e-4
   *b8*b8-1.68e-6*b8*b8*r1))/1000;
   eps:=1;
   k1:=exp(2.3*(4.86+2.53e-2*b8-0.15e-4*b8*b8-0.22e-6
   *b8*b8*b8-30.15/(r1/100+2.73)));
   a9:=at+dt*fa9(g8,a8,ar,at,k1,u,s);
   ltr:=ltr+dt;
   at:=a9;
   until ltr>tp;
   b8:=b8/1000;
   b9:=b8*(1-k053*a9)/(1-k053*a8);
```

```
  pw:=1-b8*a9/(a8*b9);
  mpg:=f5*a8*pw/kg;
  f9:=f5*(1-k053*a8)/(1-k053*a9);
  f9:=f9+(mpg+F7)/gammag;
  g9:=(mpg+f7)/f9;
  f10:=f5*a8*pw/kg;
  g9:=(f10+f7)/f9;
  {********************** Блок 5 ******************************}
  f11:=f9-(f10+f7)/gammag;
  a11:=f9*(1-g9/gammag)*a9/f11;
  b11:=f9*(1-g9/gammag)*b9/f11;
  {********************** Блок 6 ******************************}
  f2:=f11*b11/b2;
  a2:=f11*a11/f2;
 f12:=f11-f2;
          alfa2:=1.645*b2/a2;
     gamma1:=(df3+f10/gammag+f12-f14-(rab+f2)*ub)/(f1*a1*(n1-(1-n1)*h1));
{writeln(gamma1);readln;}
  {***************Блок окончания итерации ************************}
 if (abs(f2-f2n)/100>0.001)and (kl=0) then begin f2n:=f2;goto cikl;end;
 if (abs(f2-f2n)/100<=0.001)and (kl=0) then begin kl:=1;goto cikl;end;
  {***************Блок расчета энергопотребления*******************}
 kg:=1.0/1.53;
 q1n:=f1/(f10*kg);
 q12n:=f12/(f10*kg);
 q13n:=f13/(f10*kg);
 qen:=(6*f1+2.1*f2+1.6*f3+2.4*f5+0.8*N*f4+0.8*(N+1)*
       f6+4.62*f7+0.65*f8+4.62*f9+1.38*f10+2.02*f11)/(f10*kg);
          son:=s1*q1n+s12*q12n+s13*q13n+stel*qen;
   end;
```

Процедура аппроксимации искомой функции методом наименьших квадратов

```
    procedure appr(kol:integer;var te,l:tmas;var a,b,c:real);
    var k,i,j:integer;r1:real;
    z: array[1..3,1..4] of real;
begin
    for i:=1 to 3 do
    for j:=1 to 4 do
    z[i,j]:=0;
{ Формирование матрицы коэффициентов для нахождения
коэффициентов уравнения Ax^2+Bx+C}
    for i:=1 to kol do
    begin r1:=l[i]*l[i];
    z[1,1]:=z[1,1]+r1*r1;
    z[1,2]:=z[1,2]+r1*l[i];
    z[1,3]:=z[1,3]+r1;
    z[1,4]:=z[1,4]+r1*te[i];
    z[2,3]:=z[2,3]+l[i];z[2,4]:=z[2,4]+l[i]*te[i];
    z[3,4]:=z[3,4]+te[i];
    z[2,1]:=z[1,2];z[2,2]:=z[1,3];z[3,1]:=z[1,3];
    z[3,2]:=z[2,3];z[3,3]:=kol;
    end;
  { Расчет коэффициентов методом Гаусса-Жордана}
  for i:=1 to 3 do begin
  r1:=z[i,i];
  for j:=1 to 4 do
  z[i,j]:=z[i,j]/r1;
  for k:=1 to 3 do
  if k<>i then begin r1:=z[k,i];
  for j:=1 to 4 do
  z[k,j]:=z[k,j]-z[i,j]*r1
  end end;
   a:=z[1,4];b:=z[2,4];c:=z[3,4];
     END;
```

Приложение В. Акты внедрения научных разработок

«Алюминий Казахстана»
акционерлік қоғамы

Акционерное общество
«Алюминий Казахстана»

У Т В Е Р Ж Д А Ю :
Вице президент
по металлургии и энергетике-
директор ПАЗ А.Р.Сабитов

«23» сентября 2015 года

АКТ

Мы, нижеподписавшиеся :

председатель комиссии Дубровких В.А. – начальник Департамента автоматизации производства и связи

члены комиссии:

Абикенова Г.К.- начальник Научно исследовательского Центра
Налепов А.В. – начальник Информационно-вычислительного центра
Тяжелов В.А. – и.о. Главного энергетика

составили настоящий акт о том, что результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательской работы Зайцевой Н.М. «Развитие теории моделирования электротехнического комплекса непрерывного энергоемкого нелинейного производства» использованы при совершенствовании математического и информационного обеспечения действующей на Павлодарском алюминиевом заводе автоматизированной системы.
Использование результатов НИР заключается в следующем:
- применены модели динамического и статического характера, основанные на балансовых уравнениях материальных потоков переделов и учете основных химических преобразований для прогнозирования ряда параметров производства, в том числе энергопотребления, ,
- выяснен ряд вопросов на основании полученных результатов моделирования динамики изменения параметров производства, не понимание которых ранее (в 90-е годы)приводило к аварийным ситуациям,
- результаты, касающиеся параметра заземляющих устройств ρ (удельного электрического сопротивления грунта), а также методики расчета заземляющих устройств с учетом предлагаемой модели ρ в зависимости от его климатического изменения проходят апробацию с целью использования.

Председатель комиссии: Дубровких В.А

Члены комиссии:

Абикенова Г.К.

Налепов А.В.

Тяжелов В.А.

АКТ

От 20.01.2016г.

Мы, нижеподписавшиеся:

председатель комиссии: Никифорова О. Д., главный архитектор проектов

члены комиссии: Таратута Е. А., главный инженер проектов

Белик Ю. С., инженер-электрик

составили настоящий акт о том, что результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательской работы Зайцевой Натальи Михайловны, использованы в ООО «Проект-08».

Использование результатов НИР «Определение сопротивления заземлителей на основе использования нечеткой логики» заключается в следующем:

- проектирование устройств заземления на основе расчета удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от его вида, температуры и влажности с применением полученных моделей и методик его определения на различных глубинах,
- определение изменения температуры слоев грунта в течение года по максимальному разбросу среднемесячных температур на поверхности почвы,
- определение изменения влажности грунта в течение года по среднемесячным значениям климатических параметров и уровню грунтовых вод.

Результатом внедрения явилось совершенствование расчета устройств заземления при проектировании.

Председатель комиссии: _____ /Никифорова О. Д./

Члены комиссии: _____ /Таратута Е.А./

_____ /Белик Ю.С./

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «Проект-08» РОССИЯ г. НОВОСИБИРСК

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. С.ТОРАЙГЫРОВА

СОГЛАСОВАНО
Проректор по научной работе
и инновациям
_____ Н. Ержанов
«29» февр 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по академической
работе
_____Г. Ахметова
«29» февр 2016 г.

АКТ

о внедрении методических указаний к проведению лабораторных работ в учебный процесс

Учебно-методический совет Энергетического факультета в составе председателя Амреновой Д.Т. – заместителя декана ЭФ и членов Кислова А.П. – декана, профессора, к.т.н.; Никифорова А.С. – заведующего кафедрой «Теплоэнергетика», д.т.н., профессора; Марковского В.П. – заведующего кафедрой «Электроэнергетика», к.т.н., профессора; Жумажанова С.К. – заведующего кафедрой «Электротехника и автоматизация», к.т.н., доцента составили настоящий акт о том, что в 2015-2016 учебном году на кафедре «Электроэнергетика» Энергетического факультета используются в учебном процессе результаты, полученные в ходе выполнения докторской диссертации Зайцевой Натальи Михайловны по теме «Развитие теории моделирования электротехнических комплексов непрерывного энергоемкого производства на основе методов искусственного интеллекта» под научным руководством д.т.н., профессора Клецель М.Я.

Форма внедрения (наименование нового курса, спецкурса, раздела лекций, лаб. работы, установки, учебного пособия, программное обеспечение и т.д.)	Объем (листов)	Наименование внедрения (краткое содержание внедренной работы, с указанием публикаций, заявок, докладов на конференциях)
«Определение сопротивления заземлителей на основе использования нечеткой логики», (монография, пособие для магистрантов и докторантов)	148	Пособие содержит разделы, раскрывающие элементы теории нечетких множеств, методику построения зависимостей удельного электрического сопротивления грунта на основе этой тории.

Материалы к настоящему акту о внедрении учебного пособия «Определение сопротивления заземлителей на основе использования нечеткой логики» в учебный процесс рассмотрены на заседании УМС Энергетического факультета, протокол № 7 от 26 февраля 2016 года.

К настоящему акту приложены:
1) выписка из протоколов заседания УМС Энергетического факультета;
2) учебное пособие.

Материалы к настоящему акту рассмотрены на заседании УМС факультета (протокол № 7 от 26 февраля 2016 года)

Председатель комиссии _____ Д.Т. Амренова

Члены комиссии _____ А.С. Никифоров

_____ В.П. Марковский

_____ С.К. Жумажанов

Декан ЭФ _____ А.П. Кислов

«26» февраля 2016 г.

Начальник отдела научных исследований и коммерциализации **М. Крыкбаева**

Начальник учебно-методического отдела **А. Темиргалиева**

Қазақстан Республикасының
Білім және ғылым министрлігі

ИННОВАЦИЯЛЫҚ ЕУРАЗИЯ УНИВЕРСИТЕТІ

Министерство образования и науки
Республики Казахстан

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

АКТ

16 сентября 2015 г. N 249

Павлодар қаласы

[О внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс]

АКТ

№ _____

город Павлодар

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор
по инновационному развитию

_____ Е.Б. Никитин

_____ 2015 г.

Мы, нижеподписавшиеся, председатель комиссии - **Комардина Л.С.,** проректор по учебно-методической работе и качеству образования,
члены комиссии: 1. **Абраменко А.П.,** начальник отдела научно-организационной работы,
2. **Омаров М.С.,** продекан по науке и инновациям Инженерной академии,
3. **Кинжибекова А.К.,** директор департамента «Энергетика, металлургия и информационные технологии»;

составили настоящий акт о том, что в департаменте «Энергетика, металлургия и информационные технологии» с 01 сентября 2014г. по настоящее время в учебном процессе специальности 070300 «Информационные системы» и 070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение» используются результаты, полученные в ходе работы над докторской диссертацией по теме «Развитие теории моделирования параметров электротехнического комплекса непрерывного энергоемкого производства» в соответствии с собственной инициативой и под руководством М.Я. Клецель, д.т.н., профессора-консультанта кафедры «Электроэнергетические системы» Национального исследовательского Томского политехнического университета исполнителем Зайцевой Натальей Михайловной, доцентом департамента «Энергетика, металлургия и информационные технологии» Инновационного Евразийского университета.

Использование результатов диссертационной работы заключается в следующем: выпущена монография, которая используется при составлении заданий по дисциплине «Экспертные и интеллектуальные системы» для специальностей 070300 «Информационные системы» и 070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение», а также в специальном разделе квалификационной работы специальностей 070300 «Информационные системы» и 070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение».

Результатом внедрения результатов диссертационной работы явилось: повышение уровня освоения изучаемого материала, качества преподавания дисциплины «Экспертные и интеллектуальные системы» для студентов по специальности 070300 «Информационные системы» и 070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение».

Настоящий акт составлен в 4 экз., и передан на хранение:

первый экз. - в департамент, второй экз. - в отдел образовательных программ, третий экз. - в отдел научно-организационной работы, четвертый экз. – соискателю ученой степени.

Приложение к третьему экземпляру акта: копия титульного листа монографии с листом с содержащим, выходные данные на3-х лист. в 1 экз.

Председатель комиссии — **Л.С. Комардина,** проректор по учебно-методической работе и качеству образования

Члены комиссии: — **Абраменко А.П.,** начальник отдела научно-организационной работы

М.С. Омаров, продекан по науке и инновациям Инженерной академии

А.К. Кинжибекова, директор департамента

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе НГТУ
Заслуженный деятель науки РФ,
д.т.н., профессор

А. Г. Вострецов

«17» января 2018 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Н.М. Зайцевой в учебном процессе

Результаты диссертационной работы, полученные Н.М. Зайцевой, используются в учебном процессе на факультете энергетики Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», и магистров по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (в лекционных курсах, а также при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Системы электроснабжения», «Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения»).

Декан факультета энергетики
к.э.н., доцент

С. С. Чернов

Приложение Г.Авторское свидетельство и инновационный патент

217

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018615950

Расчет заземляющих устройств и удельного электрического сопротивления грунта в конкретных климатических условиях на основе нечеткой логики

Правообладатель: ***ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (RU)***

Авторы: ***Зайцева Наталья Михайловна (KZ),***
Матренин Павел Викторович (RU)

Заявка № **2018613012**
Дата поступления **28 марта 2018 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***18 мая 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІ
ЗИЯТКЕРЛІК МЕНШІК ҚҰҚЫҒЫ КОМИТЕТІ

№ 59000

АВТОРДЫҢ КУӘЛІГІ

АСТАНА

Настоящим удостоверяется, что ЗАЙЦЕВА НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА

и Зайцев Дмитрий Сергеевич

является(ются) автором(ами) изобретения

(11) 20839

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

(73) Патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "Инновационный Евразийский Университет"

(21) 2007/0959.1

(22) 11.07.2007

Председатель Комитета по правам
интеллектуальной собственности
Министерства юстиции Республики Казахстан Н.Е.Абдрахим

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

(19) ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІ
ЗИЯТКЕРЛІК МЕНШІК ҚҰҚЫҒЫ КОМИТЕТІ

ӨНЕРТАБЫСҚА

(11) № 20839

(12) **ИННОВАЦИЯЛЫҚ ПАТЕНТ**

(54) АТАУЫ: ТОПЫРАҚТЫҢ ЭЛЕКТР ӨТКІЗГІШТІГІН АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ҚОНДЫРҒЫ

(73) ПАТЕНТ ИЕЛЕНУШІСІ: **"Инновациялық Еуразия Университеті" жауапкершілігі шектеулі серіктестігі**

(72) АВТОР (АВТОРЛАР): **Зайцева Наталья Михайловна; Зайцев Дмитрий Сергеевич**

(21) № Өтінім 2007/0959.1 (22) Өтінім берілген күн 11.07.2007

Қазақстан Республикасы Өнертабыстардың мемлекеттік тізімінде тіркелді 25.11.2008
Инновациялық патенттің күші Қазақстан Республикасының бүкіл аумағында, оны күшінде ұстау үшін ақы уақытылы төленген жағдайда сақталады.

Қазақстан Республикасы Әділет министрлігі
Зияткерлік меншік құқығы комитетінің
төрағасы Н.Е.Әбдірахым

Өзгерістер енгізу туралы мәліметтер осы инновациялық патентке қосымша түрінде жеке парақта келтіріледі

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

(12) **ИННОВАЦИОННЫЙ ПАТЕНТ**

(11) **№ 20839**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

(54) НАЗВАНИЕ: УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

(73) ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ: **Товарищество с ограниченной ответственностью "Инновационный Евразийский Университет"**

(72) АВТОР (АВТОРЫ): **Зайцева Наталья Михайловна; Зайцев Дмитрий Сергеевич**

(21) Заявка № 2007/0959.1 (22) Дата подачи заявки 11.07.2007

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан 25.11.2008

Действие инновационного патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан при условии своевременной оплаты поддержания инновационного патента в силе

Председатель Комитета по правам
интеллектуальной собственности
Министерства юстиции Республики Казахстан Н.Е.Абдрахим

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему инновационному патенту

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) **KZ** (13) **A4** (11) **20839**
(51) ***G01N 27/02*** (2006.01)
G01R 19/145 (2006.01)

КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ИННОВАЦИОННОМУ ПАТЕНТУ

(21) 2007/0959.1
(22) 11.07.2007
(45) 16.02.2009, бюл. № 2
(72) Зайцева Наталья Михайловна; Зайцев Дмитрий Сергеевич
(73) Товарищество с ограниченной ответственностью "Инновационный Евразийский Университет" (KZ)
(74) Абраменко Александр Павлович
(56) ГОСТ 9.602-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Приложение I «Методики определения удельного сопротивления грунта».

(54) **УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА**

(57) Изобретение относится к энергетике, а именно к устройству заземления в части определения электропроводности грунтов в лабораторных условиях.

Технический результат изобретения - определения электропроводности грунта с плотностью и структурой его естественного залегания, для переложенных и насыпных грунтов с плотностью восстановленной до естественной, а так же для получения данных о электропроводности грунтов в зависимости от их плотности.

Технический результат достигается тем, что в известную установку для определения электропроводности грунта, содержащей ячейку, выполненной из материала с диэлектрическими свойствами, внутри которой располагаются две пары электродов, при этом одна пара подключена к источника питания и амперметру, а вторая пара, располагаемая между первой парой, подключена к вольтметру, предлагается дополнительно снабдить установленной на упругих опорах с возбудителем колебаний рамой, на которой вертикально установлена ячейка. Ячейка выполняется в виде трубы с высотой большей ее поперечных размеров. Первая пара электродов располагается ближе к концам трубы, при этом один из них, располагается в верхней части трубы и выполнен с возможностью его съема и постоянного прижима к образцу грунта, электрод, располагаемый в нижней части трубы выполнен с возможностью плотной посадки. Вторая пара электродов выполняется в виде стержней с возможностью их введения и извлечения через боковые отверстия в стенках трубы. Электрод, располагаемый верхней части трубы, снабжен прижимным устройством, выполненного в виде пружины или силового цилиндра.

(19) KZ (13) A4 (11) 20839

Изобретение относится к энергетике, а именно к устройству заземления в части определения электропроводности грунтов.

Известно устройство определения электропроводности грунта непосредственно на местности [ГОСТ 9.602-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Приложение 1 «Методики определения удельного сопротивления грунта»], содержащее измеритель сопротивления и две пары электродов.

Недостатком такого устройства является невозможность определения электропроводности конкретного вида грунта, так как грунты залегают слоями,

Наиболее близким техническим решение, взятым за прототип является устройство измерения электропроводности грунтов [ГОСТ 9.602-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Приложение 1 «Методики определения удельного сопротивления грунта»], содержащее измерительную ячейку прямоугольной формы из материала с диэлектрическими свойствами в виде открытого сверху ящика, двух пар электродов, при этом одна пара электродов (внешних), подсоединяется к источнику питания и миллиамперметру, а вторая пара электродов (внутренних), располагаемая между первой парой, подсоединена к вольтметру. В ячейку помещается образец грунта и уплотняется вручную

Недостатком известного устройства является невозможность определения электропроводности грунтов с плотностью соответствующей естественного залегания.

В связи с этим поставлена задача: разработать установку, позволяющую обеспечить возможность уплотнения образцов конкретного вида грунта от переложенного до плотности естественного залегания, и измерение электропроводности грунта при различной степени его плотности.

Технический результат изобретения - получение достоверных данных электропроводности грунтов различной плотности.

Технический результат достигается тем, что известную установку для определения электропроводности грунта, содержащую ячейку, выполненную из материала с диэлектрическими свойствами, внутри которой располагаются две пары электродов, при этом одна пара подключена к источнику питания и амперметру, а вторая пара, располагаемая между первой парой, подключена к вольтметру, предлагается дополнительно снабдить установленной на упругих опорах с возбудителем колебаний рамой, на которой ячейка устанавливается вертикально. Ячейка выполняется в виде трубы с высотой большей ее поперечных размеров. Первая пара электродов (внешних) располагается ближе к концам трубы, при этом один из них, устанавливается в верхней части трубы и выполнен с возможностью его съема и постоянного прижима к образцу грунта, а электрод, располагаемый в нижней части трубы выполнен с возможностью плотной посадки; Вторая пара электродов (внутренних) выполняется в виде стержней с возможностью их введения и извлечения через боковые отверстия в стенках трубы. Электрод, располагаемый верхней части трубы, снабжен прижимным устройством, выполненного в виде пружины или силового цилиндра.

Изобретение поясняется чертежом.

Установка определения электропроводности грунтов различной степени уплотнения, далее установка, состоит из измерительной ячейки 1 в виде трубы из диэлектрика, закрепленной вертикально на раме 2, установленной на упругих опорах 3, с возбудителем колебаний 4, двух внутренних электродов 5 и 6, размещенных в двух радиальных отверстиях, выполненных в средней части ячейки, с уплотнением 7, а также нижнего внешнего электрода 8, закрепленного неподвижно внизу ячейки, и верхнего внешнего электрода 9, закрепленного вверху ячейки, с возможностью прижима к образцу грунта 10, помещенного в ячейку, например винтом 11. Внешние электроды присоединены к источнику питания 12 и амперметру 13 , а внутренние к полюсам вольтметра 14.

Установка работает следующим образом.

В ячейку 1 загружают образец грунта известной массы, включают вибратор 4 и подвергают виброобработке до достижения заданной плотности, величина которой определяется исходя из замеренной величины столба грунта в ячейки, диаметра ячейки и известной массы грунта. Устанавливается верхний внешний электрод 9 и плотно прижимается винтом 11 к поверхности грунта, в радиальные внутренние отверстия ячейки 1 забиваются внутренние электроды 5 и 6. На внешние электроды 8 и 9 подается электрический ток с заданной силой, контролируемой амперметром 13. Падение напряжения на внутренних электродах 5 и 6 измеряют вольтметром 14.

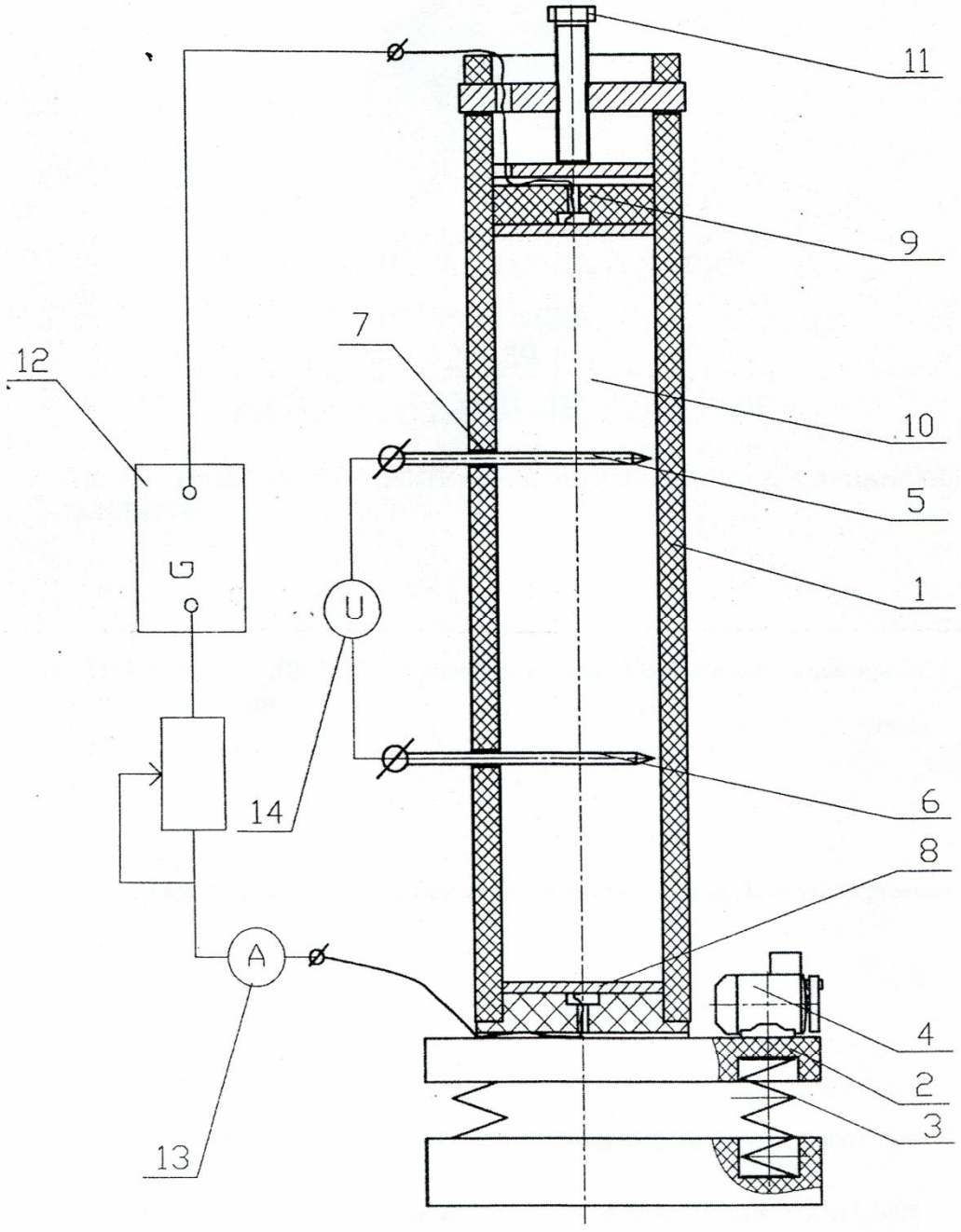
Применение предлагаемой установки, позволит получить данные об электропроводности грунта различной степени плотности.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Установка для определения электропроводности грунта, содержащая ячейку, выполненную из материала с диэлектрическими свойствами, внутри которой располагаются две пары электродов, при этом первая пара подключена к источнику питания и амперметру, а вторая пара, располагаемая между электродами первой пары, подключена к вольтметру, отличающаяся тем, что дополнительно содержит установленную на упругих опорах с возбудителем колебаний раму, на которой вертикально установлена ячейка, выполненная в виде трубы с высотой большей ее поперечных размеров, первая пара электродов располагается ближе к концам трубы, при этом один из них, располагается в верхней части трубы и выполнен с возможностью его съема и постоянного прижима к образцу грунта, помещенного в ячейку, с некоторым

усилием, а вторая пара электродов, выполненные в виде стержней с возможностью их введения и извлечения через боковые отверстия в стенках трубы.

2. Установка по пункту 1, отличающаяся тем, что электрод, располагаемый верхней части трубы, снабжен прижимным устройством, выполненным виде пружины или силового цилиндра.



Фиг.1

Верстка Молдахметова Д.А.
Корректор Хамзина Т.М.