

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор-проректор  
по научной работе СамГТУ

М.В. Ненашев



2022 г.

ОТЗВИВ

Ведущей организацией на диссертационную работу Н.М. Зайцевой на тему «Развитие теории моделирования электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств на основе методов искусственного интеллекта», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

### 1. Соответствие темы диссертационной работы паспорту специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Представленная диссертационная работа Н.М. Зайцевой посвящена развитию теории моделирования электротехнических комплексов и их подсистем непрерывных энергоемких производств на основе методов искусственного интеллекта. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы:

п.1.-Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

п.2 – Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем.

п.4 – Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

п.5.-Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса.

Что свидетельствует о соответствии темы диссертационной работы указанному паспорту специальности.

## **2. Актуальность темы исследования**

Требование повышения эффективности функционирования технических объектов продиктовано законами конкурентной экономики. В связи с ростом 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 повышения энергоэффективности рассматривающего промышленного производства к управлению 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 возможно осуществить только на основе моделирования.

В связи с интеллектуализацией управлений решений возникает необходимость разработки моделей, основанных на методах искусственного интеллекта, что нашло отражение в данной диссертационной работе.

Таким образом, актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

## **3. Научная новизна работы**

заключается в следующем:

1. Показано, что для рассматриваемого класса производств решения сложных производственных задач рассматриваемого класса производств целесообразно использовать детерминированное моделирование основных технологических процессов и математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики.

2. Определен критерий идентификации модели технологического процесса в статическом режиме, позволяющий осуществлять подстройку под реальные режимные параметры производства автоматически на основе методов: градиентного и случайного поиска.

3. Предложенная модель прогнозирования энергопотребления позволила впервые получить динамические характеристики выходных параметров рассматриваемого типа производства при скачкообразном изменении регулируемых параметров и параметров внешнего воздействия.

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

5. Для эффективной и безопасной эксплуатации электрооборудования непрерывных производств на основе экспериментов получены функции принадлежности и нечеткие интервалы для таких параметров как: вид грунта, влаж-

ность, температура, засоленность, определяющие нечеткую модель удельного электрического сопротивления, учитывающую воздействие климатических факторов конкретной местности.

6. 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. 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.

7. Получены экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления грунта от плотности, используемые при прогнозировании уменьшения сопротивления заземления после его ввода в эксплуатацию.

8. Разработанные алгоритмы и программы позволяют автоматизировать процесс расчета по предлагаемым моделям.

#### **4. 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.

## **5. Практическая значимость работы заключается в следующем:**

1. Разработанная методология моделирования компонентов электротехнических комплексов с непрерывным энергоемким производством с учетом системного видения позволяет осуществить ресурсо- и энергосбережение, повышая тем самым энергоэффективность производств.
2. Разработанные модели более точного расчета заземляющих устройств, напряжения прикосновения и шагового напряжения позволяют снизить стоимость заземляющих устройств и повысить безопасность обслуживания электротехнических комплексов.
3. Предложенная на основе генетического алгоритма оптимизационная модель управления непрерывным производством позволяет оперативно выбрать энергоэффективный технологический режим, в зависимости от существующих цен на энергоресурсы и сырье.
4. Созданные алгоритмы и программы существенно снижают трудоемкость решения задач по повышению качества функционирования, энергоэффективности и технологической безопасности эксплуатации электротехнических комплексов.

## **5. Результаты работы внедрены:**

- на Павлодарском алюминиевом заводе (Казахстан);
- в Новосибирской проектной организации ООО «Проект – 08» (Россия);
- в учебном процессе:
  - Новосибирского государственного технического университета (Россия);
  - Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (г. Павлодар, Казахстан);
  - Инновационного Евразийского университета (г. Павлодар, Казахстан).

## **6. Структура и общее содержание работы**

Работа состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка и приложения.

В введении представлены объект и предмет исследований, цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, соответствие паспорту специальности, а также ее апробация и публикации по диссертационной работе.

**В первой главе** выделены актуальные проблемы и произведен анализ существующих моделей электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств и методов их решения, выполнена постановка задачи диссертационной работы. За типовое непрерывное энергоемкое производство взято гидрохимическое производство глинозема, обладающее свойствами нелинейности, инерционности и замкнутости. Производство содержит на своей территории большое количество электрооборудования: трансформаторы на 100/6 кВ, 6/0.4 кВ, реакторы, выключатели, предохранители, синхронные и асинхронные двигатели, заземляющие устройства. В рассматриваемом типе производств основное электропотребление идет на перемещение и преобразование потоков веществ, циркулирующих по технологическим участкам. Ввиду этого режимы работы всего комплекса электрооборудования предприятия подчиняются за-

данными технологией концентрациями растворов материальных потоков. Поэтому электропотребление подобных производств определяется объемами потоков веществ, на преобразование и перемещение которых и расходуется более 90% объема электрической энергии. Характер данного производства таков, что при переходе на иные концентрационные режимы, которые могут возникать из-за изменения качества сырья, могут наблюдаться резкие изменения потоков веществ, что, как следствие, может приводить к авариям электрооборудования.

**Постановка задачи.** В виду сложности поставленных задач разработать новый класс моделей интеллектуальных алгоритмов на основе имитации всех значимых реальных процессов, а именно: модели 1) энергопотребления электротехнического комплекса электрооборудования рассматриваемого типа производства; 2) поиска оптимальных технологических параметров, обеспечивающих энергоэффективность производства в целом; 3) удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от вида грунта, глубины его залегания и климатических условий для более точного расчета напряжения прикосновения и шагового напряжения, а также расчета заземлений.

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

Статическая модель представляет собой системы нелинейных уравнений материального баланса технологических переделов и одного дифференциального уравнения основного преобразования веществ в производстве. При этом коэффициент, характеризующий скорость протекания этого преобразования, зависящий от температуры, концентрации реагента и площади поверхности катализатора, которые не возможно измерить, определялся на основе теории нечетких множеств.

Для модели разработан идентификационный критерий, который позволил реализовать алгоритм ее автоматической идентификации методом градиентного спуска. После идентификации модели расхождение рассчитанных по модели значений с реальными значениями, наблюдаемыми в течение года, не превышало 2% модели:

Динамическая модель строилась на основе статической, но вместо одного дифференциального уравнения основного преобразования веществ в ней были описаны дифференциальные уравнения преобразований, проходящих в N аппаратах-декомпозерах, кроме того, модель была дополнена дифференциальным уравнением работы буферной емкости. После идентификации модели на ней проводились исследования, и впервые были получены динамические характеристики производства.

**Третья глава** посвящена разработке оптимизационной модели управления непрерывным производством при изменяющейся конъюнктуре цен на энергоносители и сырье, позволяющей повысить его энергоэффективность. В качестве критерия было взято сведение к минимуму потребления пара и электроэнергии. Для сведения многокритериальной оптимизационной задачи к однокритериальной использовано определение себестоимости 1 тонны готовой продукции (поток  $F_{10}$ ), где учитывается расход электроэнергии, пара и сырья:

$S = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Q}(\mathbf{X}) / F_{10} \rightarrow \min$ , где  $\mathbf{Q}(\mathbf{X}) = (K_1 \cdot W(\mathbf{X}), K_2 \cdot Q_n(\mathbf{X}), K_3 \cdot F_1(\mathbf{X}), K_4 \cdot F_{13}(\mathbf{X}))$  - вектор расходных коэффициентов производства:  $W(\mathbf{X})$  – расход электроэнергии,  $Q(\mathbf{X})$  – пара,  $F_1$  и  $F_{13}$  – и сырья при значении режимных параметров, определяемых вектором  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{C}$  – вектор цен на электроэнергию, пар и сырье соответственно,  $K_1 \div K_4$  – коэффициенты, определяющие долю неучтенных затрат.

Ввиду отсутствия аналитического выражения целевой функции, задача оптимизации решалась с помощью одного из методов искусственного интеллекта: генетического алгоритма по 4-м управляемым режимным параметрам технологического процесса производства. В результате были найдены режимные параметры, позволяющие повысить энергоэффективность производства. Произведенные исследования позволили разработать модель энергоэффективного управления непрерывным производством рассматриваемого типа.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальной разработке моделей удельного электрического сопротивлений грунта  $\rho$  для расчетов заземлений, обеспечивающих эффективную и безопасную эксплуатацию электротехнических комплексов. Для решения поставленных задач было разработано три лабораторных установки, одна из которых запатентована. Эксперименты проводились для различного вида грунтов с изменением их влажности, температуры, засоленности и уплотненности. В качестве основного математического аппарата моделирования удельного сопротивления грунта был использован аппарат нечеткой логики. Построение эмпирических зависимостей для нечетких интервалов выполнено на основе регрессионного моделирования для каждого такого интервала в отдельности с объединением в одно математическое выражение с помощью инструмента нечеткой логики: системы размытых правил. Для определения функций принадлежности использовался прямой метод (непосредственное измерение и построение зависимостей).

Анализ значений  $\rho$ , полученных с помощью разработанных моделей, с экспериментальными данными и справочниками, а также проверка по критерию Фишера показывает, что модели адекватны.

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

Для построения климатической модели грунта был выполнен анализ годового хода температуры на поверхности земли, на различных глубинах для различных районов СНГ, исключая районы вечной мерзлоты. Моделирование температуры слоев грунта выполнялось на основе закона теплопроводности Фурье, годового колебания температуры поверхности земли и нечеткой логики. Моделирование влажности грунта выполнялось на основании данных, полученных от метеостанций г.Павлодара, г.Новосибирска, данных взятых из литературы и нечеткой логики.

В результате исследований была получена модель удельного сопротивления грунта  $\rho$ , позволяющая определять температуру и влажность грунта в зави-

симости климатических условий на различных глубинах от поверхности земли. Адекватность полученной подтверждается с помощью критерия Фишера.

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

Экономический эффект предлагаемых моделей электропотребления производством рассматриваемого типа рассчитывается на основании правил расчета потребителей 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 оплачивается помимо стоимости планового потребления и штрафная стоимость замеренных отклонений. Применение предлагаемых моделей позволит заранее определить потребление электроэнергии и откорректировать заявку, тем самым, уменьшая штрафную оплату.

Расчет экономического эффекта от применения модели оперативного оптимального управления рассматриваемым производством выполнялся, исходя из уменьшения затрат на 1т готовой продукции при найденном режиме по сравнению с режимом, когда управляемые параметры поддерживаются на уровне их среднего допустимого значения.

Экономический эффект от внедрения предлагаемой методики определения  $\rho$  рассчитывался на основании экономии металла при изготовлении заземляющих устройств.

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

Перечисленные выше программы реализуют работу предлагаемых моделей, описанных в главах второй, третьей, четвертой и пятой.

Представленное изложение структуры и содержания диссертационной работы свидетельствует о ее единстве внутреннего содержания и последовательном и объективном изложении полученных результатов.

## **7. Апробация и публикация результатов диссертационной работы**

Результаты, полученные Н.М.Зайцевой докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях: 21 доклад.

Исследования, выполненные в диссертационной работе опубликованы в 14 печатных работах в изданиях из перечня ВАК РФ, 8 статей проиндексированы в международных научометрических системах SCOPUS и Web of Science, 1 монография, 1 патент Республики Казахстан, 1 авторское свидетельство РФ на программный продукт, 43 прочие работы.

Автореферат в достаточно полной мере отражает сущность диссертационной работы Н.М. Зайцевой.

## **8. Замечания по диссертационной работе**

В целом содержание и результаты, полученные в диссертационной работе, возражений не вызывают, однако можно сделать следующие замечания:

1. Автором решается задача создания модели электропотребления электротехническим комплексом электрооборудования рассматриваемого типа производства и предлагается идентификация этой модели с помощью разработанного критерия, однако не пояснено, на основании каких положений этот критерий разрабатывался и почему идентификацию модели можно реализовать с помощью метода градиентного спуска.

2. При решении автором некоторого круга оптимизационных задач не были рассмотрены методы решения этих задач на основе градиентных методов и методов случайного поиска.

3. В качестве метода оптимизационных задач решения автором выбран генетический алгоритм, однако не приведено достаточного рассуждения и обоснования преимуществ этого метода относительно методов роевого интеллекта.

4. При разработке фитнес-функции, являющейся в генетическом алгоритме критерием отбора хромосом для формирования следующего поколения, не приведено достаточного пояснения полученного выражения.

5. Разработка нечетких моделей удельного электрического сопротивления грунта от влажности и засоленности грунтов велась с помощью метода Такаги-Сугено, однако в работе не было достаточного пояснения, почему в качестве функций принадлежности приняты экспоненциальные зависимости.

## **9. Общее заключение**

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

Диссертационная работа является в достаточной мере законченной работой и отвечает требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

На основании выше сказанного можно заключить, что представленная диссертационная работа в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее автор, Зайцева Наталья Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

Зав кафедрой  
Электрические станции  
Доцент, к.т.н.

Профессор кафедры  
Электрические станции  
Доцент, д.т.н.

Веденников Александр Сергеевич

Кубарьков Юрий Петрович

Самарский государственный технический университет  
Адрес, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус  
E-mailrector@samgtu.ru  
Телефон 8 (846) 278-43-11