

О Т З Ы В

Официального оппонента 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. Актуальность темы исследования

В связи с ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок, а также возрастанием цен на энергоносители, проблема энергосбережения электротехническими комплексами промышленных предприятий приобрела особую актуальность. Для решения этой проблемы требуется системный подход, учитывающий методы и средства регулирования на всех уровнях иерархии управления предприятием. А именно: планирование, технологический процесс, эффективность и безопасность эксплуатации оборудования и т.д. Благодаря такому подходу можно построить стратегию поиска, позволяющую выбрать наилучший вариант решения, что невозможно без применения моделирования.

Особо остро эта проблема стоит для энергоемких непрерывных производств, характеризующихся инерционностью и нелинейностью: к примеру, производства цветной металлургии и химической промышленности. Для таких производств прогнозирование электро- и энергопотребления является нетривиальной задачей при переходе на другие технологические режимы, которые могут вызываться, например, с изменением качества сырья. Для подобных производств модели прогнозирования электропотребления, основанные на статистике, мало пригодны из-за отсутствия прямой пропорциональности между

электропотреблением и объемом производимой продукции. В виду этого, прогнозирование энерго- и электропотребления требует разработки нового класса моделей, основанных на имитации основных технологических процессов с использованием уравнений материального баланса и применением хорошо зарекомендовавших себя в последнее время методов искусственного интеллекта.

Ввиду того, что подобные энергоемкие производства содержат на своей территории большое количество электрооборудования, в частности, открытых распределительств, необходимо решение задачи эффективной и безопасной эксплуатации их электротехнических комплексов. Что также требует применения методов искусственного интеллекта, базирующихся на теории нечетких множеств, так как удельное электрическое сопротивление грунта ρ , на основе которого ведется расчет устройств заземления энергостановок, напряжения прикосновения и шага, меняется в широких пределах в зависимости от вида грунта, его температуры t и влажности v , которые в свою очередь значительно изменяются в течение года, а известные формулы и рекомендуемые ПУЭ сезонные коэффициенты, по которым можно определить ρ , дают лишь приблизительную картину его изменения от выше перечисленных параметров. В виду этих существовавших ранее положений заземления проектировались с большим запасом, а расчеты напряжения прикосновения и шага в ряде случаев имели очень большие погрешности.

2. Научная новизна

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

- 2) Разработаны статическая и динамическая модели энергопотребления электротехнических комплексов с непрерывным инерционным производством, отличающиеся отсутствием необходимости использования длинных временных рядов ретроспективных данных.
- 3) Предложено решение многопараметрической оптимизационной задачи управления энергопотреблением непрерывного производства на основе генетического алгоритма с учетом значений технологических параметров и стоимостных факторов.
- 4) Впервые получены переходные характеристики параметров непрерывного нелинейного энергоемкого производства с помощью динамической модели энергопотребления технологического процесса, позволяющие прогнозировать аварийные ситуации и отчасти техногенные катастрофы.
- 5) Впервые на основе теории нечетких множеств созданы математическая и физическая модели удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от климатических параметров и глубины их залегания, позволяющие повысить безопасность обслуживания оборудования электротехнических комплексов.
- 6) Определены актуальные 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) Предложенные модели и методы и разработанные на их основе алгоритмы реализованы в комплексе программных продуктов, позволяющие повысить энергоэффективность работы

компонентов электротехнических комплексов и безопасность и эффективность их эксплуатации.

3. 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.

4. 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) 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.
- 3) Разработанные модели более точного расчета заземляющих устройств, напряжения прикосновения и шагового напряжения, позволяют снизить стоимость заземляющих устройств и повысить безопасность обслуживания электротехнических комплексов.
- 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) и 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).

5. Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследования и цель работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выделены актуальные проблемы и произведен анализ существующих моделей электротехнических комплексов непрерывных энергоемких производств и методов их решения, выполнена постановка задачи диссертационной работы.

За типовое непрерывное энергоемкое производство взято гидрохимическое производство глинозема (электролитического сырья алюминия), так как это производство обладает свойствами нелинейности (отсутствие пропорциональной зависимости между входом и выходом), инерционности и замкнутости, что препятствует применению статистических моделей энергопотребления. В производствах этого типа основное электропотребление идет на перемещение и преобразование материальных потоков и, следовательно, определяется их объемами, которые зависят от выбранного технологического режима.

Выделено три проблемы. **Первая проблема** – прогнозирование объема электропотребления (мощности) при переходе на иные технологические режимы производства, которые часто возникают при смене поставщиков сырья или изменении объема выпуска основного продукта. **Вторая** – поиск энергоэффективного режима работы рассматриваемого типа производства при существующем уровне цен на энергоресурсы и сырье без повышения себестоимости готовой продукции. **Третья** – повышение эффективности функционирования и электробезопасности ЭТК электрооборудования энергоемкого производства.

Постановка задачи. В виду сложности означенных выше задач разработать новый класс моделей на основе имитации всех значимых реальных процессов с применением методов искусственного интеллекта.

Вторая глава посвящена решению задачи разработки моделей электропотребления ЭТК электрооборудования рассматриваемого типа производств: статического и динамического характера. Модель статического характера описывает технологию переделов цикла Байера на основании материального баланса веществ с определением потребления электроэнергии двигателями, преобразующими или перемещающими материальные потоки. Модель имеет четыре контура управления, аналогично реально существующим в производстве, с помощью которых поддерживается концентрационный технологический режим. При этом скорость протекания основного процесса, описываемого дифференциальным уравнением, определяется с помощью теории нечетких множеств. Для модели разработан критерий идентификации.

Модель динамического характера разработана на основе статической модели с добавлением п дифференциальных уравнений, описывающих работу п аппаратов-декомпозеров и обобщенной буферной емкости.

Обе модели были идентифицированы, и с помощью моделей получены статические зависимости энергопотребления от всех параметров производства и динамические характеристики электропотребления ЭТК при скачкообразном изменении этих же параметров.

Третья глава посвящена разработке оптимизационной модели управления непрерывным производством при изменяющейся конъюнктуре цен на энергоносители и сырье, позволяющей повысить его энергоэффективность. Для решения этой задачи введены критерии: 1) минимизация электропотребления и 2) расхода пара, при ограничениях на цены, объемы сырья и энергии и без увеличения себестоимости готовой продукции и производительности. Для сведения многокритериальной оптимизационной задачи к однокритериальной использовано определение себестоимости 1 тонны готовой продукции. Поиск энергоэффективного режима работы производства строился по 4-м (реально существующим) управляемым параметрам технологического процесса производства. В

основу многопараметрической целевой функции положена детерминированная статическая модель. Оптимизационная задача была решена с помощью одного из методов искусственного интеллекта: генетического алгоритма.

В результате исследований предлагается структура модели энергоэффективного управления непрерывным энергоемким производством.

Четвертая глава посвящена экспериментальной разработке моделей удельного электрического сопротивлений грунта ρ 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 грунта был использован аппарат нечеткой логики.

Полученная экспериментальная (Пат. № 20839 РК) модель удельного электрического сопротивления грунта от плотности позволила определять динамику изменения ρ после установки заземляющих устройств.

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 и для различных глубин по разным районам СНГ, исключая районы вечной мерзлоты. Анализ влажности грунта на различных глубинах выполнялся по данным

метеостанций г.Павлодара, г.Новосибирска и взятых из литературы. Основной математический аппарат – нечеткая логика. Адекватность моделей ρ грунта доказана с помощью критерия Фишера.

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

Экономический эффект применения статической и динамической моделей прогнозирования электропотребления ЭТК предприятий основан на том, что данные модели позволяют заранее рассчитать как величину энергопотребления при переходе на иные режимы, так и динамику его изменения, что позволит во время представить графики почасового потребления электроэнергии и тем самым уменьшить оплату.

Расчет экономического эффекта применения модели оперативного оптимального управления выполнен исходя из уменьшения потребления электроэнергии и пара на 1 тонну готовой продукции без увеличения ее себестоимости.

Экономический эффект от внедрения методики определения ρ основывался на уменьшении затрат на изготовление устройств заземлений и регулярно производимых замеров удельного электрического сопротивления грунта в различные периоды года.

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.

6. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

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.

7. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждаются корректным использованием основных положений теоретической электротехники, методов многокритериальной оптимизации, в том числе основанных на методах искусственного интеллекта, а также незначительным отклонением данных, полученных экспериментальным путем, от результатов, обоснованных теоретически. Так, результаты моделирования объемов потоков вещества в рассматриваемом производстве, а также электропотребление его электротехнического комплекса отличались от наблюдаемых в реальности не более, чем на 3%, а результаты моделирования удельного электрического сопротивления многослойного грунта при расчете

заземляющих устройств – не более, чем на 10%. Это свидетельствует о корректности принятых исходных допущений.

8. Апробация и публикации по работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 20-ти международных и всероссийских конференциях

По материалам диссертации опубликовано 67 печатных работ. Статей в изданиях из перечня ВАК РФ – 14, 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, 42 прочие работы.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы, ее результаты и выводы.

9. Основные замечания по диссертационной работе

Основное содержание и выводы возражений не вызывают, однако можно сделать следующие замечания:

1. Отсутствуют концепция и технология прогнозного определения параметров электропотребления и получасового максимума мощности конкретного предприятия с учетом ценологических ограничений.
2. Нет обоснованного подхода к электроснабжению малых предприятий, основанного на ценологическом определении и управлении электропотреблением, а также на применении кадастровой информационной базы данных.
3. Не сформулированы теоретические основы надежности электрооборудования, развивающие представления теории надежности и ценологический анализ длинных временных рядов эксплуатируемого электрооборудования.

4. Слабо представлена область применения статики гиперболических Н-распределений состава электрооборудования и электропотребления электротехническими комплексами предприятий региона.
5. Отсутствуют теоретические основы динамики видовых для электрооборудования и ранговых для параметров электропотребления негауссовых распределений.
6. Не полностью на примере отрасли (цветная металлургия) и региона (Казахстан) разработана научная концепция формирования системы электромонтажа и электроремонта подразделений разной степени централизации объема работ.
7. Раздел «Научная новизна» в автореферате содержит пять пунктов, три из которых начинаются со слова «впервые», а остальные два – с этого слова не начинаются. Считаю, что это некорректно.

Заключение по диссертационной работе

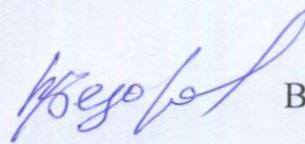
В диссертационной работе дано решение крупной научно-технической проблемы энергоэффективного управления электротехническими комплексами непрерывных энергоемких производств, обладающих свойствами нелинейности, инерционности и замкнутостью цикла. На основании выполненных исследований, автором предложена 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.

Диссертация является в достаточной мере законченной научно-квалификационной 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, а ее автор, Зайцева Наталья Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

Д.т.н., профессор, профессор кафедры
«Электроснабжение промышленных
предприятий»

ФГАОУ ВО «Омский государственный
технический университет»


V.K. Федоров
12.09.2022

Федоров Владимир Кузьмич

Телефон (3812) 65-34-07
Эл. почта: info@omgtu.ru
ФГАОУ ВО «Омский государственный
технический университет»
644050, г. Омск, Пр. Мира, д. 11

