

## АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071800 – Электроэнергетика»

МҰРАТ АЙБЕК ҚАЙРАТҰЛЫ

«Разработка и исследование управляемых реакторов трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током»

Энергетический сектор Казахстана, как и его развитие, играет важную роль в обеспечении энергетической безопасности и имеет стратегическое значение для развития Казахстана. В своем послании народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» от 1 сентября 2023 года Президент РК Касым-Жомарт Токаев определил цели по развитию сектора электроэнергетики. Необходимо повысить эффективность функционирования ЕЭС РК с обеспечением надежности и экологичности. Одной из задач является снижение ключевых показателей энергоемкости и энергопотребления на 15% [1].

Важнейшим параметром, определяющим энергетическую эффективность национальной экономики, является энергоемкость ВВП. Показатели национальной экономики РК указывают на кратное превышение удельной энергоемкости ВВП страны над аналогичным показателем развитых стран. Согласно концепции по переходу к «зелёной экономике» Правительству необходимо снизить показатели энергоёмкости ВВП РК не менее чем в два раза к 2050 году (от уровня 2008 года – 0,41 тнэ/тыс.долл. США в ценах 2015 г.). Энергоемкость ВВП в 2022 году составила 0,32 тнэ/тыс.долл. США в ценах 2015 г. и по сравнению с 2008 годом снизилась на 21,95 %, что указывает на необходимость дальнейшей работы в данном направлении [2].

Для обеспечения надежности функционирования и устойчивого развития энергетического комплекса, Правительством РК утвержден «Прогнозный баланс электрической энергии ЕЭС Казахстана до 2035 года». Согласно данным прогнозного баланса объемы выработки электроэнергии необходимо увеличить к 2035 году до 152,9 млрд кВт/ч в год [3]. Задачу увеличения производственных мощностей по выработке электроэнергии планируется решить путем восстановления имеющихся и строительства новых станций (ввод мощностей на Экибастузской ГРЭС-1 (500 МВт), Топарской ГРЭС (130 МВт), Атырауской ТЭЦ (65 МВт), АЭС (2,4 ГВт), 11 станций ВИЭ общей генерируемой мощностью 259 МВт).

Реализуются проекты сетевого инфраструктурного строительства - присоединение электрических сетей Западного Казахстана к ЕЭС РК (исполнение проекта позволит использовать мощности газовых станций Западного Казахстана в энергетическом балансе и повысить

энергобезопасность страны), усиление электрической сети Южной зоны ЕЭС Казахстана (строительство ВЛ 500 кВ Шу - Жамбыл – Шымкент).

Таким образом, для форсированного развития экономики РК и стимулирования продуктивных инноваций требуется обеспечение надежности работы энергетической системы и оптимизации потерь.

Выполнение задачи по обеспечению нормальных режимов работы электроэнергетической системы и стандартов качества электрической энергии невозможно без управляемых средств регулирования реактивной мощности и напряжения. Кроме того, поддержание оптимальных уровней напряжения на шинах подстанций обеспечивает минимизацию потерь активной мощности в электрических сетях и тем самым повышает эффективность функционирования электрических сетей. Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства FACTS [4].

Одним из устройств FACTS, выполняющих регулирование реактивной мощности является шунтирующий реактор (ШР). Основное свойство ШР поглощение зарядной мощности, образуемой в линиях электропередач за счет емкостной составляющей. Из всей линейки устройств регулирования реактивной мощности ШР выделяет относительная дешевизна и простота конструкции и эксплуатации. ШР могут быть управляемые и неуправляемые.

Вопрос ограничения избыточной реактивной мощности стоит как в протяженных межсистемных линиях, так и в городских электрических сетях высокого напряжения, которые зачастую являются сложнзамкнутыми. Вместе с развитием городов и ускоряющейся урбанизацией, увеличивается и количество заменяемых ВЛ на КЛ. Несмотря на все преимущества кабельных линий, они образуют больше реактивной мощности, чем воздушные линии, что еще больше повышает значимость шунтирующих реакторов для передачи электроэнергии в сети. Емкостная проводимость кабельных линий больше, чем у воздушных линий того же класса напряжения. К примеру, зарядная мощность кабельной линии номинальным напряжением 110 кВ составляет 8,4-18,0 МВАр на 100 км, а для воздушной линии того же номинала напряжения это значение составляет 3,4 – 4,0 МВАр на 100 км. Приведенные рассуждения свидетельствуют о необходимости использования компенсирующих устройств.

Показательным примером является электрическая сеть АО «Алатау Жарык Компаниясы» (АЖК) — крупнейшей региональной электросетевой компании Алматы и Алматинской области. В её составе насчитывается 47,45 км кабельных линий 220 кВ и 206,36 км кабельных линий 110 кВ, образующих кольцевую сеть города. Суммарная зарядная мощность кабельных линий 220 кВ составляет порядка 50–240 МВАр в зависимости от типа кабеля — величина, требующая постоянной управляемой компенсации во избежание недопустимых перенапряжений в периоды суток с малой нагрузкой. Потребность в УШР в сетях 110 и 220 кВ подтверждается планами развития АО «АЖК» по расширению кабельной инфраструктуры города.

Несмотря на высокую потребность, в электрических сетях 35 – 500 кВ

РК, средств регулирования реактивной мощности и соответственно напряжения, их производство до сих пор не реализовано на предприятиях нашей страны. Поставка выполняется из стран ближнего и дальнего зарубежья, таких как – РФ, Испания, Италия, Украина и .т.д. Стоимость закупки, которая включается в себя помимо производства - транспортировку, чаще всего оказывается завышенной.

В соответствии с «Программой развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств», можно и необходимо наладить производство управляемых шунтирующих реакторов [5]. Потребность в управляемых шунтирующих реакторах внутри страны тем самым будет обеспечена. В перспективе поставки реакторов в страны ближнего и дальнего зарубежья, будут являться неотъемлемой частью отрасли трансформаторостроения РК.

Производство управляемых шунтирующих реакторов нового поколения можно при приемлемых затратах наладить на трансформаторных заводах группы АО «Alageum Electric», поскольку производство таких реакторов полностью соответствует технологии трансформаторостроения. Для страны это имеет важное значение в связи с завершением строительства в г. Шымкент трансформаторного завода на классы напряжения 500 кВ (АО «Asia Trafo») и перспективным развитием АО «Кентауский трансформаторный завод», который выпускает трансформаторы на классы напряжения 110 кВ. Преимущество локализации производства обеспечит значительное удешевление продукта.

Концепция трёхстержневого реактора трансформаторного типа с управлением постоянным током не является принципиально новой. В 80-х годах прошлого столетия, впервые в СССР, два реактора такого типа были введены в эксплуатацию на подстанции «Таксимо» Западного участка электроснабжения БАМа ПЭО «Бурятэнерго». Реакторы были изготовлены на базе силовых трансформаторов мощностью 6,3 МВА напряжением 35 кВ производства Чирчикского трансформаторного завода путём реконструкции на предприятии «Южказэнергоремонт» в г. Алма-Ате. Однако принципиальным недостатком этих реакторов являлся высокий уровень высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки. В настоящей работе данный недостаток устраняется путём обеспечения режима полупериодного насыщения.

Освоение производства трёхстержневого УШР с режимом полупериодного насыщения требует решения ряда нерешённых научных задач. Трёхстержневая конструкция — технологически совместимая с производством силовых трансформаторов — исследована значительно меньше четырёхстержневой. Зависимости электромагнитных характеристик трёхстержневого УШР от геометрических параметров магнитопровода в научной литературе не установлены; не разработаны методы оптимизации конструкции по критерию минимума стоимости активных материалов при обеспечении номинального режима работы; сравнение трёхстержневой и

четырёхстержневой конструкций при одинаковых электромагнитных характеристиках в открытой литературе не выполнялось.

Таким образом, актуальность настоящей диссертационной работы определяется необходимостью установления взаимосвязи электромагнитных характеристик трёхстержневого УШР и конструктивных параметров магнитопровода, обеспечивающих режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока, и разработки метода оптимизации конструкции по критерию минимума стоимости активных материалов — как научной основы для организации отечественного производства.

### **Практическая значимость.**

Результаты работы обеспечивают научную базу для разработки технической документации на изготовление опытно-промышленного образца УШР 110 кВ, 25 МВАр на предприятиях АО «Asia Trafo» и АО «Кентауский трансформаторный завод». Установленные закономерности позволяют без итерационных расчётов оценивать смещение номинального режима реактора при изменении геометрических параметров магнитопровода, что существенно сокращает трудоёмкость проектирования. Потребителями результатов являются АО «KEGOC», АО «АЖК» и региональные электросетевые компании Республики Казахстан.

Отечественное производство управляемых шунтирующих реакторов увеличит Казахстанское наполнение в решении задач построения интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей и систем путем оптимизации режимов НЭС Казахстана и региональных электрических сетей.

Перечисленные факторы четко коррелируют с задачами поставленными главой государства и программами стратегического развития страны. Сложившаяся привлекательность и, что немаловажно, рентабельность решений по установке шунтирующих реакторов в электрические сети с одной стороны, и продолжающийся рост спроса на экономичные, надежные и вместе с тем «доступные» устройства регулирования реактивной мощности на базе шунтирующих реакторов, с другой стороны, подтверждают актуальность проводимого исследования по разработке управляемых шунтирующих реакторов.

Представленная диссертационная работа выполнялась на базе комплекса научно-исследовательских аналитических и экспериментальных работ, с выполнением экспериментов на производственной базе АО «КазНИПИИТЭС «Энергия» и Некоммерческого АО «АУЭС им. Ғ. Даукеева».

Указанные предпосылки формируют **цель диссертационного исследования**, которая сформулирована следующим образом:

Повышение эффективности компенсации реактивной мощности в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения путём разработки трёхстержневого управляемого шунтирующего реактора с оптимальными конструктивными параметрами на основе установления взаимосвязи

конструктивных и режимных параметров магнитопровода, обеспечивающих режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки.

В рамках выполнения диссертационной работы для достижения поставленной цели выполнялись следующие **научные задачи**:

- Провести анализ существующих методов компенсации реактивной мощности, конструкций УШР и современных исследований в данной области; сформулировать нерешённые научные задачи.

- Разработать физическую модель трёхстержневого УШР и экспериментально исследовать его электромагнитные характеристики при различных режимах подмагничивания постоянным током.

- Разработать верифицированную имитационную модель трёхстержневого УШР в программном комплексе Matlab Simulink.

- Исследовать влияние конструктивных параметров магнитопровода (сечения  $S$  и длины  $L_s$  рабочих стержней) на ток сетевой обмотки и коэффициент гармонических искажений; установить закономерности их влияния.

- Разработать методику оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР по критерию минимума стоимости активных материалов при обеспечении номинального режима и верифицировать её на примере реактора 110 кВ, 25 МВАр.

- На основе результатов оптимизации трёхстержневой конструкции выявить эквивалентную по электромагнитным характеристикам четырёхстержневую конструкцию и выполнить их количественное технико-экономическое сравнение.

- Исследовать динамические режимы УШР 110 кВ и определить метод повышения быстродействия без изменения конструкции реактора.

Методы исследования.

В работе использованы методы теоретической электротехники; физического и имитационного моделирования; гармонического анализа; планирования вычислительного эксперимента; суррогатного моделирования на основе Gaussian Process регрессии; Байесовской оптимизации с критерием Expected Improvement; технико-экономического анализа.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

- 1 Разработана имитационная модель УШР на основе результатов экспериментальных исследований в программном комплексе Matlab Simulink. Предложена методика моделирования УШР.

- 2 Установлена взаимосвязь конструктивных и режимных параметров трёхстержневого УШР с подмагничиванием постоянным током, позволившая обеспечить режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки.

- 3 2. Впервые установлена инвариантность минимального коэффициента гармонических составляющих тока сетевой обмотки, которая

находится в допустимых пределах ГОСТ, к геометрическим параметрам магнитопровода трёхстержневого УШР.

4 Разработан двухэтапный метод оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР: полный перебор по равномерной сетке с аппроксимацией параболой и Байесовская оптимизация с суррогатной моделью Gaussian Process. Применение метода позволило определить конструкцию с оптимальными параметрами и подтвердить её глобальный характер.

5 На основе доказанной инвариантности минимального коэффициента гармонических составляющих тока сетевой обмотки впервые выполнено количественное сравнение трёхстержневой и четырёхстержневой броневой конструкций УШР при идентичных электромагнитных характеристиках.

**Достоверность полученных результатов подтверждается:**

Экспериментальными исследованиями на физических моделях трёхстержневого УШР с использованием поверенных измерительных средств, внесённых в реестр ГСИ РК.

Сходимостью результатов физического и имитационного моделирования по критерию средней абсолютной процентной погрешности (MAPE): не более 5.0% по току сетевой обмотки и 2.5% по коэффициенту гармонических искажений — что соответствует допустимым погрешностям для нелинейных ферромагнитных устройств.

Применением математически обоснованных методов оптимизации (Gaussian Process, Bayesian Optimization) с подтверждением глобального характера найденного оптимума.

По результатам выполненных работ и проведенных исследований, на защиту выносятся **следующие положения:**

1. Физические модели трёхстержневого УШР с подмагничиванием постоянным током и результаты экспериментального исследования их электромагнитных характеристик.

2. Верифицированная имитационная модель трёхстержневого УШР в Matlab Simulink и методика моделирования режимов подмагничивания постоянным током.

3. Результаты исследования оптимального соотношения длин и сечений стержней и ярем реактора, количества обмоток и их напряжения для получения режима полупериодного насыщения УШР.

4. Двухэтапный метод оптимизации конструктивных параметров УШР на основе GP и Байесовской оптимизации.

5. Результаты количественного сравнения трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций УШР при идентичных электромагнитных характеристиках: затраты на активные материалы трёхстержневой конструкции на 26.4% меньше.

Результаты реализации проекта могут оказаться прорывными в реализации концепции построения интеллектуальных активно-адаптивных

электрических сетей и систем и в освоении нового электротехнического оборудования отечественного производства.

Потребителями полученных результатов могут быть системный оператор НЭС Казахстана АО «KEGOC», АО «АЖК» и другие региональные электросетевые компании.

Основные положения отражены в научных публикациях: 5 научных статьях, в том числе: 3 научные статьи в отечественном издании из списка рекомендованных КОКСОН; 1 научный доклад в сборниках в международных научно-технических конференций, в том числе с очным выступлением в зарубежной научной конференции с публикацией докладов в базе Scopus; 1 научная статьи, индексируемые в базе Scopus, в журнале «Electric Power Systems Research» с процентилем на момент публикации 78% по разделу «Electrical and Electronic Engineering» «Электротехника и электроника». В качестве соавтора результаты научно-исследовательской деятельности были зафиксированы в: 2 Патентах РК на полезную модель по тематике конструкций шунтирующих реакторов (Приложение Г).

Личный вклад автора в решении исследуемого вопроса определяется:

- В обосновании, формулировке и выборе методики исследования с применением физических моделей шунтирующих реакторов;

- Руководством на всех этапах создания и непосредственным исследованием (разработка задания на изготовление, участие в измерениях и обработке данных) физических моделей реакторов;

- В постановке и реализации имитационной модели по расчету с применением программного комплекса Matlab Simulink применительно к шунтирующим реакторам.

Диссертационная работа выполнена автором в соответствии с действующими требованиями оформления, структуры и содержания. Работа состоит из 6 основных глав, списка условных обозначений, введения, заключения, списка использованной литературы и приложений.

В первой главе представлено описание принципа действия шунтирующих реакторов и полупериодного насыщения магнитопровода реактора. Дан обзор литературы и современных исследований в области разработок шунтирующих реакторов.

Во второй главе описана физическая модель шунтирующего реактора и стенд для выполнения испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований физических моделей реакторов.

В третьей главе представлена методика моделирования УШР в программном комплексе Matlab Simulink, подробно описана имитационная модель реактора и этапы создания модели. Сопоставлены результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования работы шунтирующего реактора при разной степени подмагничивания постоянным током.

Четвертая глава содержит анализ и результаты расчетов модели реактора на 110 кВ. Приведены графики зависимости токов сетевой обмотки

от параметров УШР, гармонический анализ токов сетевой обмотки при изменении сечения и высоты стержней магнитопровода УШР.

Глава 5 содержит расчёт конструктивных параметров обмоток оптимального УШР 110 кВ, 25 МВАр. Результаты главы служат основой модели стоимости активных материалов для задачи оптимизации главы 6.

Глава 6 посвящена двухэтапной оптимизации конструктивных параметров методом GP и Байесовской оптимизации, определению оптимальной конструкции ( $S^*=0.155 \text{ м}^2$ ,  $L_s^*=2.325 \text{ м}$ ) и количественному сравнению трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций УШР.