

На правах рукописи



Баяр БАТ-ЭРДЭНЭ

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ
КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ МОНГОЛИИ В НОВЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Научный консультант: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Подковальников Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Филиппов Сергей Петрович**
доктор технических наук, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук», директор

Коровкин Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт энергетики, Высшая школа Высоковольтная энергетика, профессор

Сулов Константин Витальевич
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «12» ноября 2024 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: **664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2024-3/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.118.01,
доктор технических наук, доцент



**Солодуша
Светлана Витальевна**

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации.

Настоящая диссертационная работа посвящена созданию научного подхода к разработке концепции научно-методологического исследования вопросов развития электроэнергетики Монголии. Задачи, которые решаются в диссертационной работе, направлены на поиски научно-обоснованных направлений практического осуществления директивного документа «Дальновидение – 2050», действующих и разрабатываемых долго- и среднесрочных программ осуществления государственной политики в области энергетики и разработок технико-экономических и технологических основ создания Единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС). Она должна обладать возможностью параллельной (совместной) работы с электроэнергетическими системами (ЭС) сопредельных государств и обеспечивать в дальнейшем выход Монголии на экономико-энергетическое пространство Северо-Восточной Азии (СВА). Изложенное определяет несомненную актуальность диссертационной работы и ее востребованность, прежде всего, монгольским научным сообществом, инженерами и практиками, работающими в электроэнергетической отрасли, работниками государственных и отраслевых органов управления, а также для подготовки и принятия решений в других регионах с аналогичной структурой электроэнергетики.

В соответствии с характерными особенностями социально-экономического развития, пространственно-географическими условиями страны и спецификой энергопотребления, а также с учетом наличия первичных энергоресурсов, а также влияния внешних и внутренних факторов сформулирована цель и поставлены задачи настоящего диссертационного исследования.

Степень научной разработанности проблемы. Научный подход к развитию электроэнергетики и методология ее исследования при централизованном управлении экономикой в современных условиях разрабатывались в СССР и России такими учеными, как Мелентьев Л.А., Руденко Ю.Н., Макаров А.А., Беляев Л.С., Воропай Н.И., Зейлинер А.Н., Огороков В.Р., Волькенау И.М., Арзамасцев Д.А., Ханаев В.А., Савельев В.А., Труфанов В.В., Подковальников С.В. В Монголии вопросы разработки методологии формирования энергосистемы рассматривались в исследованиях Батхуяга С. и Нуурея Б. В других зарубежных странах заметный вклад в методологию интегрального планирования развития электроэнергетики внесли такие исследователи, как Аллен А., Карпентьер Х., Мунасингхе М. и другие. В настоящее время за рубежом с учетом рыночных условий, где имеет место дерегулирование, формируется новая методология обоснования развития электроэнергетики, получившая название холистического планирования. Большой интерес представляют вопросы международной кооперации электроэнергетики и создания межгосударственных электрических связей (МГЭС) и энергообъединений (МГЭО) в СВА. В этом направлении ведутся исследования в России, Японии, Республике Корея и Китае.

Вместе с тем, особенности монгольской экономики и электроэнергетики не позволяют однозначно принимать и переносить имеющиеся наработки в области методологии обоснования развития электроэнергетики, полученные в других странах, в т.ч. в России, на энергосистемы Монголии. Работы, выполненные монгольскими учеными в данной области, фрагментарны и охватывают только отдельные аспекты проблематики обоснования развития ЭЭС (режимы работы формирующихся ЭЭС, переход электроэнергетики на рыночные условия хозяйствования, распределенную генерацию).

В связи с этим, для формирования целостной научной базы обоснования развития электроэнергетики Монголии требуется трансформация имеющихся в других странах научно-методических подходов, методик, вычислительных инструментов и разработка новых для широкого и конструктивного использования в стране в современных условиях и в перспективе. Этим обусловлены необходимость и важность в национальном масштабе выполнения исследований, представленных в данной диссертационной работе.

Целью данной диссертационной работы является разработка научно-обоснованной концепции, методологии и вычислительного инструментария для обоснования комплексного развития электроэнергетической системы Монголии в условиях технологической трансформации и формирование на этой основе наиболее рациональных перспективных направлений развития электроэнергетики страны с учетом различных внутренних и внешних факторов и использованием системного подхода.

Для достижения сформулированной выше цели были поставлены и решены следующие задачи, каждая из которых включает в себя целый ряд отдельных, но взаимосвязанных подзадач.

1. Ретроспективный анализ формирования электроэнергетической отрасли и ЭЭС в Монголии.
2. Оценка современного состояния электроэнергетики страны с учетом располагаемых первичных топливно-энергетических ресурсов(ТЭР).
3. Аналитические исследования развития методических основ и подходов для обоснования развития электроэнергетических систем.
4. Разработка методологии исследования развития ЭЭС Монголии на основе ее иерархического представления.
5. Формирование модельно-вычислительного инструментария для исследования и обоснования развития ЭЭС Монголии.
6. Разработка методики, исследование и оценка прогнозных уровней электропотребления Монголии.
7. Исследование перспектив развития и формирования региональных электроэнергетических систем Монголии.
8. Исследование и формирование Единой интеллектуальной электроэнергетической системы Монголии.

Объектом исследования является электроэнергетика Монголии, рассматриваемая в организационно-техническом аспекте, как совокупность всех видов энергопредприятий и энергопотребителей с учетом их территориального размещения; в структурно-технологическом аспекте, как развивающаяся взаимосвязанная целостная

электроэнергетическая система, представленная несколькими территориально-технологическими уровнями иерархии, и которая находится в динамически изменяющемся состоянии под воздействием различных внутренних и внешних факторов.

Предметом исследования выступает методология обоснования развития электроэнергетики и ЭЭС в современных условиях трансформации экономики Монголии с учетом международного энергетического партнерства в СВА.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались теоретические подходы и методы математического моделирования. В основу теоретических исследований положена методология системных исследований в энергетике. Методология системных исследований применялась для комплексного анализа истории развития и оценки современного состояния электроэнергетики Монголии, а также для изучения характерных особенностей и территориальной распределенности плотности потребления электроэнергии.

При составлении прогнозов электропотребления страны и ее регионов использовались корреляционно-регрессионный анализ и методы математической обработки статистических данных. Факторный анализ использовался при оценке воздействий на развитие ЭЭС, а иерархические принципы и математическое моделирование применялись при выборе рациональных вариантов развития электроэнергетических систем и схем электрических сетей.

Научная новизна.

1. С использованием системного подхода выполнен комплексный анализ истории развития энергетики и электроэнергетики Монголии, в результате чего выделены два периода и пять этапов их развития и современного состояния. Понятия периодичности и этапности имеют терминологические особенности и означают временные интервалы, в течение которых происходили качественно отличающиеся между собой события в развитии электроэнергетики страны. При этом периоды относятся к принципиально отличающимся по содержанию временным интервалам, а этапы к интервалам, которые определяются каким-либо качественным изменением электроэнергетики.

2. Сформированы методы и получены результаты прогнозирования электропотребления в Монголии с учетом специфики, которая характеризуется малой плотностью территориального распределения, являющейся следствием низкой численности населения, масштабности территории, исторически сложившегося вида основной хозяйственной деятельности и слабого развития энергоемких отраслей промышленности.

3. Разработаны методологический подход, методика моделирования, а также вычислительный инструментарий для исследования и обоснования развития электроэнергетических систем Монголии в перечисленных специфических условиях по схеме с четырьмя уровнями иерархического представления, соответствующими региональному, ЕЭС страны, схеме с достаточными внешними электрическими связями, обеспечивающими совместную работу с ЭЭС сопредельных стран и в последующем с выходом на «суперсеть» стран СВА.

4. В работе впервые разработана концептуальная модель ЕЭЭС Монголии с оптимальной схемой системообразующих линий электропередачи и размещением энергоисточников в 12 энергоузлах с соответствующими им параметрическими показателями.

5. Впервые в рамках настоящей диссертации предложены теоретико-методологические основы комплексного обоснования направлений развития электроэнергетических систем и электроэнергетики Монголии, позволяющие многоаспектно рассматривать, исследовать и учитывать особенности (как электроэнергетической системы, так и отрасли), в т.ч. с учетом экологических факторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Научно-методические разработки:

- методология исследования и обоснования формирования и развития ЕЭЭС, которая учитывает специфические условия Монголии, базируется на вложенной многоуровневой иерархии электроэнергетических систем, включает формирование и комплексное исследование сценариев их перспективного развития, качественно различающихся между собой и охватывающих широкий спектр активно действующих внутренних и внешних факторов трансформации энергетики;

- методика и аппроксимационная модель расчета прогнозов роста внутреннего потребления электроэнергии с учетом постоянного и непрерывного увеличения макроэкономических показателей и возможных вводов незапланированных крупных промышленных объектов с использованием иностранных инвестиций, приводящих к резкому расширению диапазона неопределенности перспективного спроса на электроэнергию;

- целостный вычислительный инструментарий для исследования и обоснования развития ЭЭС Монголии, включающий в себя и гармонически сочетающий математические модели развития электроэнергетических систем и электрических сетей, расчета электроэнергетических режимов, вычислительные модули для выполнения прогнозов электропотребления на базе метода линейной регрессии, оценки показателей обеспеченности топливом, достаточности генерирующих мощностей и пропускной способности меж узловых электрических связей региональных ЭЭС, качественной оценки проявления на разных уровнях иерархии ЭЭС внутренних и внешних факторов, активно влияющих на их развитие.

2. Научно-технологические результаты:

- разработана многоузловая иерархическая схема ЕЭЭС Монголии, состоящая из 12 энергетических узлов, представляющих собой энергопромышленные и социально-экономические образования, в которых сосредоточены потребители энергии, электрогенерирующие источники и местные распределительные сети первого иерархического уровня региональных ЭЭС;

- разработан сценарий формирования ЕЭЭС Монголии по результатам решения оптимизационной схемно-структурной задачи с соответствующими ограничениями по энергопотреблению в узлах и пропускным способностям меж узловых электрических связей внутри страны (второй иерархический уровень) и схема системообразующих

воздушных линий электропередачи между этими узлами, обеспечивающая выход на следующий международный по иерархии уровень (третий уровень иерархии);

- предложен проект развития ЕЭЭС Монголии на период до 2030-2050 гг.

3. Научно-обоснованные концептуальные разработки:

- выявлены конкретные особенности монгольской электроэнергетики и их параметрические показатели, которые выражаются территориальными плотностями мощности и количественными оценками электрической нагрузки энергопотребления, учитываемыми при исследовании и создании региональных и Единой энергосистем.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что она вносит значимый вклад в укрепление и расширение научной базы системных энергетических исследований, в направлении совершенствования методического и модельного инструментария для обоснования развития электроэнергетических систем с учетом ряда специфических для развивающихся стран условий (на примере Монголии), включая низкую плотность электрической нагрузки, значительные расстояния между территориальными центрами электрической нагрузки, слабую связанность линиями электропередачи, существенную зависимость уровней перспективного электропотребления от прихода зарубежных инвесторов, доминирование маломаневренных тепловых угольных электростанций, наличие значительного потенциала возобновляемых энергоресурсов и некоторые другие.

Практическая ценность и реализация.

Результаты последовательного решения поставленных в диссертационном исследовании задач и реализации предложенных направлений позволят создать оптимальные по структуре комплексы региональных и Единой ЭЭС Монголии, которые станут базой для дальнейшего формирования мощного ТЭК страны.

Это обеспечит формирование в Монголии научно-обоснованной основы электроэнергетической системы с эффективной электросетевой и энергогенерирующей структурой, а также будет способствовать гармоничному развитию экономики регионов и обеспечению энергетической безопасности страны. Необходимыми первоочередными условиями при этом являются усиление электрических связей с сопредельными странами и рациональное размещение генерирующих источников в результате последовательного создания крупных промышленных образований в восточном, юго-восточном и западном районах страны.

Разработанные научно-методическая база и вычислительный инструментарий могут быть использованы в дальнейших исследованиях по обоснованию перспектив развития электроэнергетики Монголии.

Степень достоверности результатов определяется соответствием используемых математических моделей и методов реальным электроэнергетическим системам. Данное соответствие достигается за счет того, что математические модели построены на базе фундаментальных законов электротехники, включая закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа, учитывают энергобалансовые соотношения, технологические системные ограничения, реальные ограничения на развитие генерирующих мощностей и электрических связей в рассматриваемой перспективе. Проводимые исследования опирались на достоверные данные, полученные из надежных источников

(государственных документов по развитию национальной электроэнергетической отрасли).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы в следующих пунктах [7]:

Пункт 1: «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования, методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования». Разработаны методологический подход, методика моделирования для исследования и обоснования развития электроэнергетических систем Монголии в характерных специфических условиях по схеме с четырьмя уровнями иерархического представления, соответствующего региональным и единой энергосистемам в рамках страны, и схеме с достаточными внешними электрическими связями, обеспечивающими совместную работу с ЭЭС сопредельных стран и последующим выходом на «суперсеть» стран СВА. Разработан целостный вычислительный инструментарий для выполнения комплексных исследований по формированию и обоснованию развития интеллектуальной ЕЭЭС Монголии.

Пункт 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок». Определена оптимизированная многоузловая комплексная структурная схема ЕЭЭС Монголии, в которой объединены региональные электроэнергетические системы, имеющие достаточные генерирующие мощности с учетом первичных энергетических ресурсов соответствующих регионов для покрытия их энергопотребления и необходимые межсистемные электрические связи, обеспечивающие обмен мощностью и энергией между ними во внештатных ситуациях.

Пункт 5: «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах». Проведены детальные исследования характеристик энергопотребления и динамики его роста за последние 20 лет в связи с поставленными задачами, отраженными в директивных документах развития страны, в т.ч. «Дальновидение – 2050», и получена математическая зависимость (уравнение линейной регрессии) для прогноза роста электропотребления. В результате этих исследований получена научно-обоснованная исходная информация

в виде годового электропотребления страны и регионов на перспективу до 2050 г. по трем сценариям, необходимая для осуществления дальнейших исследований.

Пункт 7: «Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем, комплексов и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования». Предложена пирамида стратегии создания интеллектуальной ЭЭС - одного из ключевых механизмов в достижении целевой установки энергетической стратегии Монголии по трансформации отраслей энергетического комплекса в современную высокотехнологичную и эффективную инфраструктуру, обеспечивающую как количественный, так и качественный экономический рост.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: международных форумах по стратегическим технологиям «IFOST-2013», г. Улан-Батор, Монголия, 2013 г. и «IFOST-2016», г. Новосибирск, РФ, 2016 г.; научно-практической конференции «Реформа энергетического сектора Монголии – 2017», г. Улан-Батор, Монголия, 2017 г.; научной конференции «Энергетика: техника и технология», г. Улан-Батор, Монголия, 2017 г.; 10-ой международной конференции по Энергетической кооперации в Азии / 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), г. Иркутск, РФ, 2017 г.; научно-технической конференции «Эрдэнэт – 40», посвященной 40-летию монголо-российского совместного предприятия - ГОК «Эрдэнэт», г. Эрдэнэт, Монголия, 2018 г.; семинарах кафедры «РЗиАЭС» МЭИ (ТУ), г. Москва, РФ, 2018 г., 2019 г.; международной конференции «Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление» / ENERGY-21: Sustainable Development & Smart Management, г. Иркутск, РФ, 2020 г.; 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Penang, Малайзия, 2020 г.; 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp 2021), Grand Hyatt Jeju, Республика Корея, 2021 г.; теоретико-практической конференции «Способы повышения надежности электроэнергетической системы», организованной Национальным Диспетчерским Центром совместно с МГУНТ, г. Улан-Батор, Монголия, 2021 г.; международной научной конференции «Россия и Монголия: результаты и перспективы научного сотрудничества», секция Энергетика, г. Иркутск, Россия, 2022 г.; III Всероссийской конференции «Региональная энергетическая политика Азиатской России», г. Иркутск, Россия, 2022 г.; Российско-Монгольском семинаре, организованном АНМ и РАН, «Озера Байкал и Хубсугул: экологические и экономические проблемы». Монголия, г. Улан-Батор, 9-10 ноября 2022 г.

Некоторые результаты диссертационного исследования отражены в совместной монографии «Монголо-Российское энергетическое сотрудничество: современное состояние и взгляд в будущее» (под ред. Б.Г. Санеева и С. Батмунха) (п.1.4 и 3.1), в отчетах российско-монгольского гранта «Разработка научных основ формирования приоритетных направлений сотрудничества России и Монголии в энергетической сфере» (2018–2020 гг.) (РФФИ: № 18-510-94006 и МОКиН: № ШуГх/ОХУ/-2018/26) и проекте фундаментальных исследований Министерства высшего образования и науки Монголии

«Разработка модели развития объединенной электроэнергетической системы Монголии» (2017-2019 гг.) (ШуСс-2017/77).

Автор принимал участие в рабочих группах, созданных приказами министра энергетики по «Разработке закона об энергосбережении» (11 декабря 2012 г. приказ: № 66) и по «Анализу общесистемной аварии, произошедшей в центральной энергосистеме Монголии 7 июля 2021 года» (09 июля 2021 г. Приказ: № А/126), им были внесены определенные положения и рекомендации в итоговые документы и акты.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 33 печатные работы, из которых 11 статей в научных журналах, включенных в текущий перечень ВАК по специальности 2.4.5., из которых 10 в журналах категории К1, К2; 4 статьи в научных журналах, включенных в РИНЦ, в том числе 1 – в Перечень ВАК по другим специальностям; статей на монгольском языке – 14, а также 4 публикации в трудах конференций, входящих в международные базы данных (Web of Science, Scopus).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и приложений. Полный объем составляет 299 страниц, включая 63 рисунка, 46 таблиц, 8 приложений. Список литературы содержит 141 наименование.

Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность научному консультанту доктору технических наук С.В. Подковальникову за помощь, оказанную при подготовке диссертации, а также профессорам ИСЭМ СО РАН д.т.н. Б.Г. Санееву, д.т.н. В.В. Труфанову, академику РАН В.А. Стенникову и другим сотрудникам института, коллегам Энергетического института МГУНТ за помощь в проведении исследований. Автор не может не отметить значительный вклад в постановку и организацию исследований, к сожалению, рано ушедшего из жизни чл.-корр. РАН Н.И. Воропая.

Личный вклад соискателя. Все научно-методические и прикладные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно, либо под его научным руководством при его непосредственном участии. В частности, концептуально-методические работы, постановки задач выполнены автором самостоятельно, работы по математическому моделированию – совместно с д.т.н. Труфановым В.В., к.т.н. Ханаевым В.В., к.т.н. Драчёвым П.С., обзорно-аналитические работы – совместно с д.т.н. Батхуягом С., д.т.н. Санеевым Б.Г., к.т.н. Зундуйсурэном Ч., вычислительные работы – совместно с д.т.н. Труфановым В.В., к.т.н. Ханаевым В.В., к.т.н. Драчёвым П.С., к.т.н. Батзаяа Б. и к.т.н. Улам-Оргил Ч.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформированы цели и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отмечены новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, представлены структура диссертации и основные результаты исследований.

Первая глава посвящена ретроспективному анализу особенностей электроэнергетической системы Монголии с учетом последовательности формирования энергетического сектора и перспективам развития ЭЭС Монголии.

Проанализировав историю возникновения и развития Монгольской энергетической отрасли и электроэнергетических систем, а также их современное состояние, можно сделать однозначный вывод о том, что процесс формирования энергетики в стране тесно связан с последовательно проводимой политикой правительства по переходу народного хозяйства страны от аграрного к аграрно-индустриальному развитию и последующему строительству материально-технической базы социализма, которые осуществлялись изначально при поддержке Советского Союза, а с 1960-х годов с участием стран-членов СЭВ.

Фактически до 1980-х годов технико-технологические основы энергетической отрасли народного хозяйства Монголии формировались в соответствии с пятилетними планами развития народного хозяйства и культуры страны, диктовались необходимостью поэтапного решения вопросов энергоснабжения вновь создаваемых народно-хозяйственных объектов. При этом попутно решались задачи постепенного укрепления топливно-энергетической базы страны. Анализ ретроспективы развития энергетики Монголии показывает, что в содержательном плане можно выделить кардинально отличающиеся между собой два периода, в рамках которых располагаются пять этапов, отличающихся качественными изменениями происходящих в них организационно-технологических процессов (Рисунок 1).

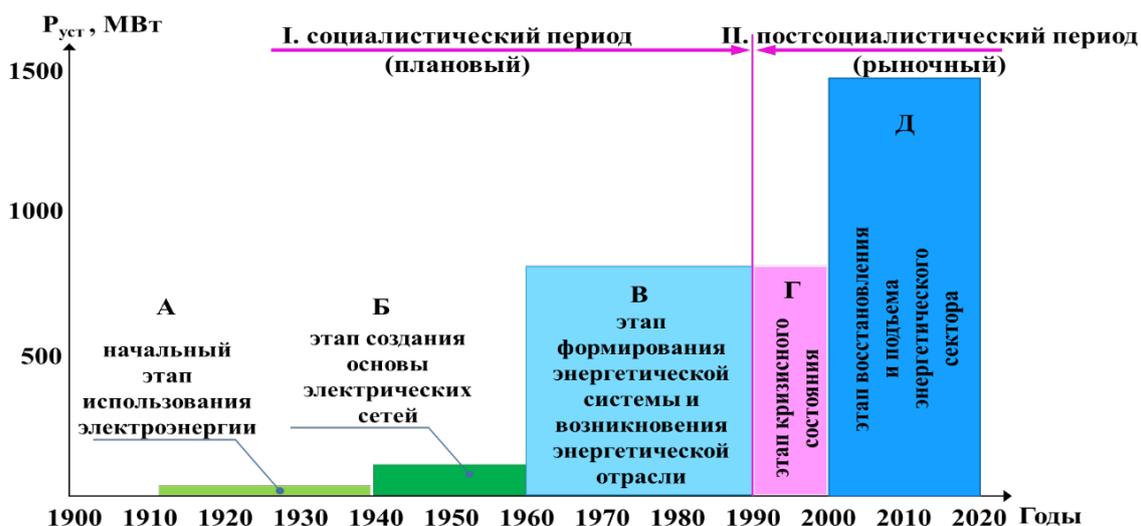


Рисунок 1 – Этапы и периоды развития энергетического сектора Монголии

Анализ технического состояния и технологического уровня ЭЭС показали, что основную долю (80 %) генерирующей мощности составляют угольные электростанции в виде ТЭЦ, расположенные в нескольких крупных городах-промышленных центрах, на которых вырабатывается более 80 % электроэнергии и около 40 % тепловой энергии. Остальная часть (20 %) приходится на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в виде солнечных и ветровых электростанций (СЭС и ВЭС) и небольших гидроэлектростанций (ГЭС). Отсутствие крупных конденсационных и гидравлических мощностей в ЭЭС является основной причиной недостатка располагаемой, регулирующей и резервной

мощностей, вследствие чего возникает необходимость импорта электроэнергии в значительном количестве. Уровень и технологическое состояние автоматизации и управления ЭЭС Монголии недостаточны для создания интеллектуальной электроэнергетической системы, хотя автоматические системы управления, такие как SCADA и СМІР частично внедрены.

Здесь же показана классификация внутренних и внешних факторов, влияющих на развитие энергетической отрасли Монголии (Рисунок 2). Современные вызовы, которые стоят сегодня перед энергетикой Монголии, достаточно сложны и многообразны.



Рисунок 2 – Классификация факторов, влияющих на развитие энергетической отрасли Монголии

Исследования некоторых специалистов показали, что монгольская энергетика по отдельным критериям безопасности уже находится в предкризисной ситуации. Поэтому настало время разработать новый подход и научно-обоснованную методологию исследования и, тем самым, решить проблемы электроэнергетической системы Монголии с учетом ее особенностей и специфики.

В конце Главы 1 приведены развернутые характеристики ЭЭС Монголии, состояние ее релейной защиты и автоматизации, и основные показатели энергопотребления страны с их существующими прогнозами. Показаны роль и значение энергетике в экономике страны и проблемные вопросы ее развития, сделаны соответствующие выводы, которые заключаются в необходимости укрепления топливно-энергетической базы страны путем создания региональных ЭЭС, способных самостоятельно функционировать, и на этой основе обеспечить формирование ЕЭЭС и усиление электрических связей с ЭЭС сопредельных стран с учетом последующего подключения к будущему Азиатскому суперэнергообъединению.

Во второй главе анализируются существующие методические разработки и подходы для обоснования развития электроэнергетических систем, а также

математические модели и программные комплексы, предназначенные для решения задачи развития ЭЭС.

Начало разработки методологической основы системных исследований в виде комплексно-энергетического подхода было положено научной энергетической школой Г.М. Кржижановского. В дальнейшем исследованиями по развитию методических основ создания и развития энергетических объектов и систем в СССР и России занимались и продолжают заниматься в Сибирском энергетическом институте СО АН СССР (СЭИ, в настоящее время ИСЭМ СО РАН), Институте энергетических исследований ГКНТ и АН СССР (сегодня ИНЭИ РАН) и некоторых других институтах энергетического профиля РАН, а также зарубежных институтах экономики энергетики Японии и Республики Корея, институте энергетики при Госплане КНР и другие.

В конце 1970-х годов в СЭИ были сформулированы структура и содержание системного подхода к развитию ЭЭС, была разработана базовая комплексная математическая модель оптимизации структуры генерирующих мощностей и пропускных способностей межсистемных связей, реализованная в виде программно-вычислительного комплекса «СОЮЗ» с развитой информационной базой данных. В России и сейчас продолжают заниматься усовершенствованием и разработкой методов и методологии системных исследований по развитию ЭЭС и ее оптимизации в новых экономических условиях в ряде научно-исследовательских учреждений.

В настоящее время, наряду с изменениями, связанными с приходом в энергетическую сферу компаний с несовпадающими интересами и различными видами собственности, основной особенностью развития ЭЭС является переход к так называемым «интеллектуальным энергосистемам». Моделирование развития таких ЭЭС требует новых подходов и методологии. В главе рассмотрен ряд методов планирования развития ЭЭС, используемых в странах с рыночной экономикой, и сделан вывод о том, что основная концепция и системный подход к рассматриваемым объектам энергетики не теряют своей актуальности и продолжают сохранять свою востребованность.

Глава 3 посвящена разработке методологии исследования электроэнергетики и электроэнергетических систем Монголии. В ней рассматриваются методические основы обоснования развития электроэнергетических систем.

Основой исследования является разработка комплекса математических моделей, позволяющих решать задачи по развитию электроэнергетики Монголии с получением оптимальных схемных решений модернизации и усиления системообразующих ВЛЭП с использованием иерархической технологии и привлечением существующих методов моделирования и программных инструментариев.

Для создания научно-обоснованной методологии была предложена идея применения четырехуровневой, так называемой, вложенной иерархии ЭЭС. Согласно этой идеи исследуемый объект рассматривается полностью вместе со всей своей структурой в виде иерархических уровней, находящихся один в другом, причем внутренние и одновременно более низкие уровни охватываются более высокими уровнями (см. Рисунок 3). Первый уровень формируется на базе существующих локальных ЭЭС Монголии; второй уровень – вновь создаваемая ЕЭЭС с развитием системообразующей сетевой структуры и

централизованным диспетчерским управлением, основанным на цифровой технологии с применением систем автоматизации, управления и мониторинга; на третьем уровне рассматривается наиболее вероятная схема электрических связей с ЭЭС сопредельных стран (РФ и КНР); четвертый уровень рассматривает будущее подключение к электроэнергетической суперсети стран СВА и выход ЕЭЭС страны на экономико-энергетическое пространство Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР).

Причем каждый уровень вложенной иерархии обладает параметрами, определяющими его качественные и количественные признаки, а также связь с временной иерархией.

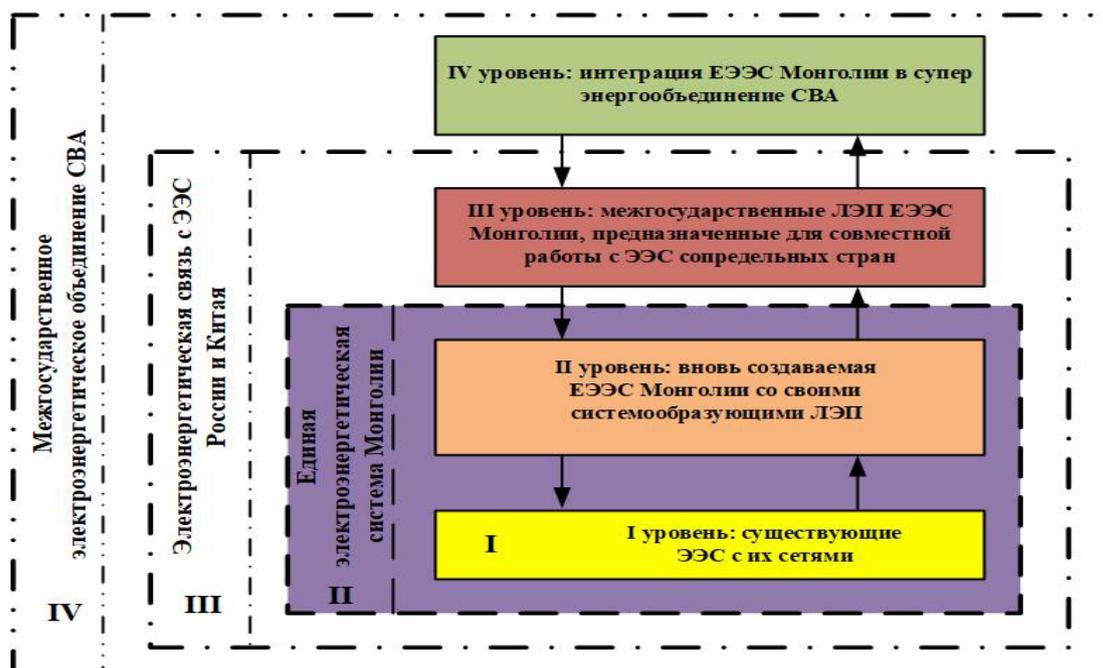


Рисунок 3 – Иерархическая схема развития энергетики Монголии

Прогнозное электропотребление, т.е. спрос на электроэнергию формируется под влиянием сложных и меняющихся во времени взаимосвязей между развитием экономики и отраслевыми системами ТЭК на уровне регионов и страны. При прогнозе должны учитываться конкретные особенности страны, прежде всего, ее социально-экономические условия и электроемкость экономики. Здесь важное значение имеет сопоставление уже существующих долго- и среднесрочных прогнозных данных электропотребления между собой и с действительными значениями энергопотребления за прошедший период для выявления и уточнения формирующихся тенденций.

В исследовании ЕЭЭС рассматривается как совокупность региональных электроэнергетических систем, которые имеют достаточную топливную базу и генерирующую мощность, обеспечивающую необходимую маневренность и способность реализовывать диспетчерское управление в оптимальном режиме работы, межсистемные связи, достаточные для обмена потоками мощности и энергии в аварийных и внештатных ситуациях, а также удовлетворяющие осуществлению режимных перетоков. Такая ЕЭЭС

должна иметь централизованное диспетчерское управление на базе современных технологий и структуру управления функционированием и развитием. Технологическая инфраструктура современных ЭЭС сложна и включает в себя множество различных пространственно распределенных, но взаимосвязанных технических элементов, которые в режиме реального времени осуществляют процессы производства, передачи и распределения электрической энергии и реализуют общую стратегическую цель обеспечения надежного бесперебойного электроснабжения потребителей.

Исследования проводились в соответствии с предложенной методологией, укрупненно представленной на Рисунке 4.

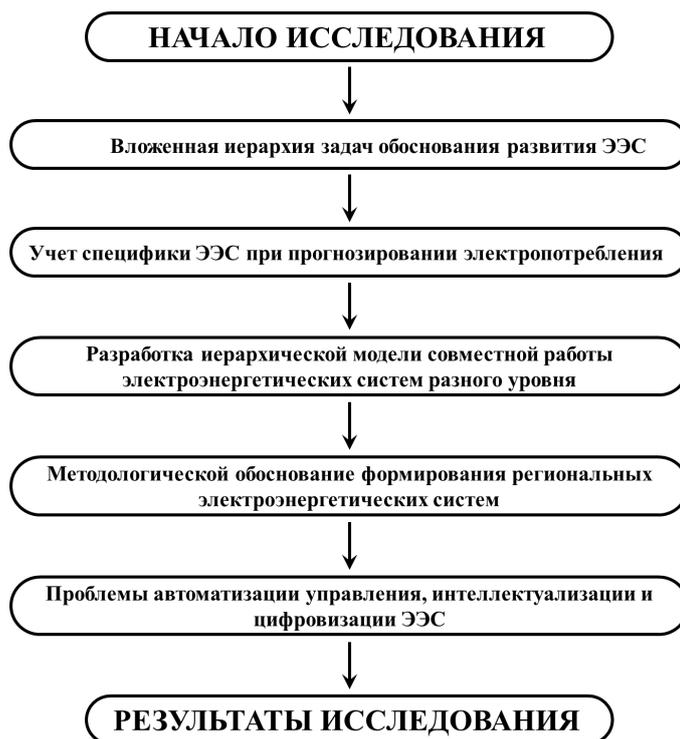


Рисунок 4 – Этапы методологии исследования

Традиционные, сложившиеся технологии управления потоками электрической энергии в электроэнергетической системе Монголии отличаются низкой надежностью. В связи с этим, было предложено создание новой концепции управления потоками электрической энергии на базе интеллектуальной энергосистемы (ИЭС).

Основной целью *четвертой главы* является разработка вычислительного инструментария для обоснования развития ЭЭС Монголии, который отражал бы представленные в предыдущей главе методические особенности, учитывал бы внутренние и внешние влияющие факторы и позволил бы определить рациональную технологическую структуру и направления создания ЕЭЭС со своими особенностями, отражающими специфику экономического развития страны.

В работе предлагается новая парадигма стратегии создания ИЭС Монголии, основные положения которой можно представить в виде пирамиды (см. Рисунок 5).



Рисунок 5 – Предлагаемая пирамида стратегии создания ИЭС

В нее включен системный анализ текущего состояния энергетических и технологических потребностей страны и отмечена необходимость разработки методологии создания математической модели ИЭС.

Для достижения поставленной цели и решения соответствующих задач исследования было разработано методологическое обоснование, характеризующееся четырьмя сценариями развития электроэнергетической системы. Первые три сценария можно назвать «идеализированными». Первый сценарий – это самостоятельная закрытая (изолированная, т.е. без внешних связей) система, обеспечивающая полностью свою потребность в электроэнергии и независимая в любое время от ее импорта (I), второй сценарий – полузакрытая система, обеспечивающая энергопотребление в аварийных условиях за счет импорта (II), третий сценарий – мощная открытая система, имеющая в наличии достаточные генерирующие мощности, работающие на своих первичных источниках энергии и экспортирующая электроэнергию на внешний рынок (III) (см. Рисунок 6). Четвертый сценарий представляет реальная, даже можно сказать оптимальная ЕЭС, соответствующая особенностям и масштабам достигнутого социально-экономического уровня и развитию производительных сил страны, которая по мере необходимости и возможности работает в импортно-экспортных режимах (IV).

При разработке четвертого сценария первые три сценария рассматриваются как реализация предельных условий. При их формировании применялась методология системного анализа и комплексного подхода. Состояние ЭЭС, соответствующее данному сценарию, не имеет статического положения и может меняться в пределах сценарного треугольника (см. Рисунок 6) в зависимости от ситуационных и временных изменений и влияющих факторов.

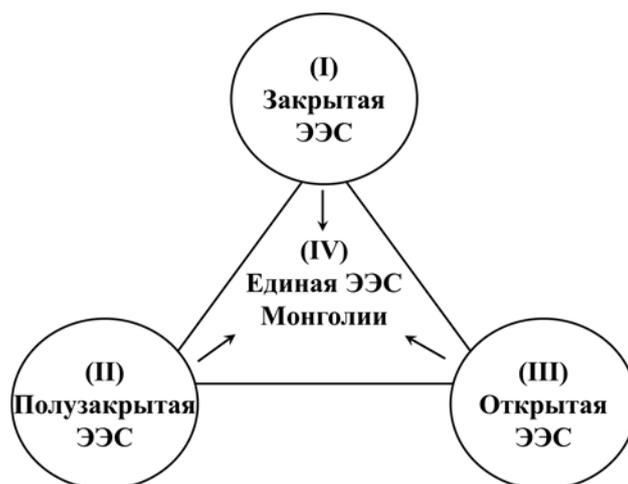


Рисунок 6 – Модель выбора оптимального сценария ЭЭС

При анализе перспектив развития энергетики необходимо дать оценку состояния по каждому индикатору влияющих факторов и комплексную оценку целостной картины состояния развития ЭЭС в целом. Для таких оценок используется методика, основанная на получении комплексных показателей путем сравнения расчетных значений индикаторов, выраженных в относительных единицах (см. Таблицу 1).

Таблица 1 – Матрица учета факторов на различных уровнях иерархии ЭЭС*

№	Показатели факторов	Иерархический уровень			
		I	II	III	IV
1	Рост – потребление электроэнергии	+	+	-	-
2	Социальный показатель – энергосбережение	+	+	-	-
3	Политика – стабильность политики развития	+	+	+	+
4	Потребление топлива – ресурсы источников энергии	+	+	+	+
5	Экономика – инвестиции	+	+	+	+
6	Импорт электроэнергии	+	+	+	+
7	Экспорт электроэнергии	-	+	+	+
8	Стратегия энергетики соседних стран	-	+	+	+
9	Мировые тенденции развития энергетики	+	+	+	+

* Факторы, влияющие на данном уровне иерархии, отмечены в таблице знаком (+), не влияющие т.е. не имеющие весомого значения – (-).

Методология прогнозирования роста электропотребления Монголии базируется, как ранее было отмечено, на том факте, что электропотребление складывается из двух

существенно различающихся по своему содержанию составляющих. Первая – это закономерное увеличение потребления электроэнергии за счет увеличения количества населения страны и связанные с этим рост ВВП местной промышленности и развитие социально-культурной сферы, предусмотренные в программах регионального развития экономики. Вторая составляющая обусловлена появлением новых энергоемких объектов отраслей промышленности и транспортной инфраструктуры, которые, предусмотрены директивными документами, но их ввод в определяющей степени зависит от влияния побочных факторов, что, соответственно, вносит дополнительную существенную неопределенность в прогнозируемые уровни электропотребления.

Таким образом, рост электропотребления страны можно при его прогнозировании условно разделить на две части и общий рост представить в виде суммы этих двух составляющих. Первая из них представляется следующим выражением:

$$P_{q,k} = 511,6 + 0,29N_{\text{насел.}k} + 0,058 \text{ ВВП}_k, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

где $N_{\text{насел.}k}$ – численность населения в рассматриваемом регионе в году k , тыс. чел.; ВВП_k – валовая внутренняя продукция на душу населения в рассматриваемом регионе в году k , тыс. тугр.; k – индекс, характеризующий номер года. Здесь для определения постоянных коэффициентов, входящих в уравнение (1) использовался метод статистической обработки первичных данных за двадцатилетний период. Вторая часть перспективного электропотребления в регионах, связанная с появлением крупных промышленных и инфраструктурных объектов ($P_{\text{н.х}}$) определялась экспертно с учетом их технико-экономических показателей и степени реализации в виде укрупненных величин, соответствующих периодов времени. При прогнозировании вторая часть электропотребления рассматривалась в трех вариантах по степени реализации (100, 75 и 50 %) на том или ином временном интервале.

$$P_{\text{н.х},k} = K \cdot \sum_t^{T_k} \sum_i^I P_{\text{н.х},ti}, \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий степень реализации объектов ($K = 1,0; 0,75$ и $0,5$); $P_{\text{н.х},ti}$ – электропотребление объектов; i – индекс, относящийся к предприятиям (I – общее число предприятий, вводы которые намечаются на рассматриваемом временном интервале); t – месяц расчетного года, $t = 1, \dots, 12$ ($T_k = 12$).

С учетом вышеизложенного итоговое прогнозируемое электропотребление рассматриваемого региона в году k (P_k) может быть представлено в виде суммы (1) и (2).

$$P_k = P_{q,k} + P_{\text{н.х},k} \quad (3)$$

Для определения структуры ЕЭЭС, основываясь на разработанной методологии, использовалась многоузловая комплексная структурная схема, в которую объединены региональные электроэнергетические системы (РЭЭС). В качестве инструмента для оптимизации развития ЭЭС использована математическая модель «СОЮЗ».

Дальнейшее постепенное развитие ЕЭЭС Монголии должно быть направлено на выход к более высокому иерархическому уровню развития с пространственным расширением, который заключается в создании условий, позволяющих по технологическим и режимным параметрам работать совместно с крупными ЭЭС

сосредоточенных стран, прежде всего с ЭЭС РФ. К первоочередным задачам относится также постепенный переход на параллельную работу с ЭЭС КНР.

Одной из основных задач диссертационного исследования является разработка методологии создания самодостаточных и надежных РЭЭС, имеющих достаточную топливную базу, которая может стать важной составной частью ТЭК региона. При этом необходимо принять во внимание возрастающее производство электроэнергии на источниках, использующих возобновляемые энергоресурсы (ВЭС, СЭС и ГЭС), которое согласно директивному документу в стране может составить к 2030 году 30 % и 40 % к 2050 году. Для учета этого обстоятельства в (4) введена величина β , которая в относительных единицах учитывает уменьшение количества электроэнергии, производимой на ТЭС и других топливных источниках.

Согласно изложенному, годовое производство электроэнергии на угольных тепловых электростанциях определяется по выражению (4).

$$E_{эл}^{ТЭС} = E_{эл}^{рег} (1 - \beta) + E_{эл}^{пот}, \quad (4)$$

где $E_{эл}^{рег}$ – годовое электропотребление региона, кВт·ч/год; $E_{эл}^{пот}$ – потери электроэнергии в сетях системы, кВт·ч/год;

С учетом других видов потребления угля, которые определяются на основе регионального годового баланса угля, суммарное годовое потребление угля в регионе составит:

$$B_{топл} = E_{эл}^{ТЭС} \cdot b_{у.т}^{эл} + E_Q^{ТЭЦ} \cdot b_{у.т}^Q + B_{топл}^{отрс} + \Delta B_{топл}^{пот}, \quad (5)$$

где $E_{эл}^{ТЭС}$ – производство электроэнергии тепловыми электростанциями региона, кВт·ч/год; $b_{у.т}^{эл}$ – удельные расходы угля на производство электроэнергии (в переводе на т у.т.) т у.т./кВт·ч; $E_Q^{ТЭЦ}$ – производство электроэнергии на ТЭЦ на тепловом потреблении региона, кВт·ч/год; $b_{у.т}^Q$ – удельные расходы угля на производство электроэнергии на ТЭЦ на тепловом потреблении (в переводе на т у.т.) т у.т./кВт·ч; $B_{топл, j}^{отрс}$ – потребление угля в других отраслях, т у.т./год; J – количество социально-экономических отраслей, включенных в угольный, а также в единый энергетический баланс; $\Delta B_{топл}^{пот}$ – потери при транспортировке угля, т у.т./год. При наличии достаточной топливной базы для ТЭК региона должно выполняться условие:

$$B_{топл}^{доб.ф} > K_{зап} B_{топл}. \quad (6)$$

где $B_{топл}^{доб.ф}$ – суммарная годовая добыча топлива всеми угольными предприятиями региона. Здесь коэффициентом запаса ($K_{зап}$) топлива учитываются нормированные запасы, которые должны находиться на ТЭС в штатном режиме, и аварийные запасы.

Одним из основных показателей ЭЭС является величина потерь электроэнергии $E_{эл}^{пот}$, которая входит в (4), и зависит от параметров передачи электроэнергии по ВЛЭП, например, уровня напряжения и общей протяженности линий.

При анализе ЭЭС на уровне регионального ТЭК в качестве индикаторов снабжения топливно-энергетическими ресурсами использовались, такие параметры, как: соотношение ($\alpha_{уст.м}$) суммарной располагаемой мощности электрических станций ($P_{расп}$) и мощности максимальной нагрузки потребления электроэнергии в пределах региона

(P_{max}), т.е. ($\alpha_{уст.м} = P_{расп}/P_{max}$); отношение ($\alpha_{мс.св}$) суммы всей располагаемой и передаваемой по межсистемным линиям мощностей при максимальной нагрузке потребителей ($P_{мс.св}^{max}$) к мощности максимальной нагрузки данного региона (P_{max}), т.е. $\alpha_{мс.св} = (P_{расп} + P_{мс.св}^{max})/P_{max}$; пропускная способность системообразующих ЛЭП высокого напряжения (110 кВ и 220 кВ) межсистемных связей ($P_{мс.св} = \sum_{i=1}^N P_{мс.св.i}$, где N – количество межсистемных связей) и, наконец, возможность снабжения собственными первичными топливно-энергетическими ресурсами выражается следующей формулой.

$$\alpha_{топл} = \frac{\sum R_{топл,i}}{\sum B_{топл,i}} 100\%; \quad (7)$$

где $R_{топл,i}$ и $B_{топл,i}$ – производство и потребление i -ого первичного энергетического ресурса.

При расчете индикаторов надежности снабжения топливно-энергетическими ресурсами ТЭК региона надо учитывать способность обеспечения топливно-энергетическими ресурсами при нормальном режиме и, в случае экстремальных условий, т.е. при резком росте потребления топлива из-за возникших непредвиденных условий, например, вследствие неучтенного в расчете тепловых нагрузок похолодания и т.д. Здесь будут рассмотрены следующие три индикатора: доля преобладающих топливных ресурсов ($\alpha_{пр.топл}$) в общем потреблении ТЭР региона; доля самой мощной электростанции в электроэнергетических источниках региона ($\alpha_{круп.ЭС}$), количество запасных ресурсов, необходимых для покрытия потребностей в экстренных условиях, например, способность снабжения 10 %-ого роста топливопотребления ($\alpha_{зап.топл}$), которые выражаются, соответственно, следующими формулами:

$$\alpha_{пр.топл} = \frac{\sum R_{топл,i}^{max}}{\sum B_{топл,i}} 100\%; \quad (8)$$

$$\alpha_{круп.ЭС} = \frac{P_{круп.ЭС}}{P_{\Sigma,уст}} 100\%; \quad (9)$$

$$\alpha_{зап.топл} = \frac{R_{топл.экс}}{B_{экс}} 100\%, \quad (10)$$

где $R_{топл,i}^{max}$ – максимально возможное производство i -ого первичного энергетического ресурса на добывающих предприятиях региона; $R_{топл.экс}$ – максимально возможное количество поставок первичных топливных ресурсов для нужд региона, млн. т у.т.; $B_{экс}$ – максимальное (с 10 %-ым увеличением) количество потребления топлива регионом, в экстремальных условиях, млн. т у.т.

Результаты исследования с учетом указанных выше индикаторов обеспечивают формирование рациональной структуры РЭЭС, удовлетворяющей нормативным требованиям. Для более детальных оптимизационных исследований перспектив развития ЭЭС использовался ПVK СОЮЗ, который в зависимости от цели исследования позволяет выполнять анализ вариантов развития ЭЭС в дефицитных и критических ситуациях, производить оптимизацию структуры ЭЭС и потребителей электроэнергии, определять эффективность мероприятий по электросбережению, оценивать технико-экономические

показатели вновь сооружаемых регулирующих режимные параметры потребителей, решать традиционную задачу выбора рациональной структуры генерирующих мощностей ЭЭС и межсистемных связей. Здесь целевой функцией является сумма годовых переменных ($Z_{jint}S_{jint}$) и постоянных ($Z_{ji}^{\Sigma}S_{ji}^{\Sigma}$) затрат в источники энергии, приведенных капиталовложений ($Z_{ji}^N S_{ji}^N$) при вводе новых мощностей, годовых постоянных издержек ($Z_{ii'}^{\Sigma} S_{ii'}^{\Sigma}$) и приведенных капиталовложений в межсистемные связи, которые в общем случае представляют суммарные приведенные затраты на развитие и функционирование ЭЭС:

$$Z = \sum_{jint} Z_{jint} S_{jint} + \sum_{ji} Z_{ji}^{\Sigma} S_{ji}^{\Sigma} + \sum_{ji} Z_{ji}^N S_{ji}^N + \sum_{ii'} Z_{ii'}^{\Sigma} S_{ii'}^{\Sigma} + \sum_{jint} Z_{ii'}^N S_{ii'}^N \rightarrow \min \quad (11)$$

и балансовые ограничения:

$$\sum_j \alpha_{ji} S_{ji}^{\Sigma} - \sum_{i'} S_{ii't}^{\text{бал}} + \sum_{i'} S_{i'it}^{\text{бал}} \geq S_{it}^{\text{нерег}} + S_i^{\text{авар}}; i = 1, \dots, I, \quad (12)$$

где S_{jint} – нагрузка j -го типа оборудования в узле i в суточном режиме n в зоне продолжительностью t часов, МВт; Z_{jint} – соответствующие удельные переменные затраты; $S_{ji}^{\Sigma}, S_{ji}^N$ – выбираемые установленная мощность и новая (вводимая) мощность j -го оборудования в узле i , МВт; $Z_{ji}^{\Sigma}, Z_{ji}^N$ – удельные постоянные ежегодные издержки и приведенные капиталовложения в это оборудование; $S_{ii'}^{\Sigma}$ – пропускная способность межсистемной связи между узлами i и i' , МВт; $Z_{ii'}^{\Sigma}$ – удельные постоянные ежегодные затраты на эту связь; $S_{ii'}^N$ – новая пропускная способность межсистемной связи между узлами i и i' , МВт; $Z_{ii'}^N$ – соответствующие удельные приведенные капиталовложения; α_{ji} – коэффициент готовности оборудования; $S_{ii't}^{\text{бал}}, S_{i'it}^{\text{бал}}$ – балансовые перетоки мощности в час t из узла i в i' и обратно, МВт; $S_{it}^{\text{нерег}}$ – нерегулярная нагрузка узла i в час t , МВт; $S_i^{\text{авар}}$ – аварийный резерв мощности узла i , МВт. Расчеты проводятся при соответствующих ограничениях по балансам мощностей в энергоузлах для всех расчетных часов, включая час совмещенного максимума нагрузки и с учетом необходимого аварийного резерва мощности.

В основу оптимизации развития электрических сетей ЭЭС положена экономико-математическая модель (ПВК СЕТИ), описывающая производственные связи системы при действующих ограничениях на генерацию, пропускную способность линий электропередачи и сечений между зонами свободного перетока. В качестве целевой функции используется минимум затрат на функционирование электростанций, строительство и эксплуатацию новых электросетевых объектов, приведенных к одному моменту времени при условии обеспечения нагрузок в узлах, выбранной структуры энергосистемы.

Математическая формулировка задачи включает целевую функцию:

$$Z = \sum_{n,k,i} (S_{ni} \lambda_{ni} \tau^{\text{реж}} + (K_{nk}^{\text{ЛЭП}} E + I_{nk}^{\text{ЛЭП}})) \rightarrow \min(S, K^{\text{ЛЭП}}, I^{\text{ЛЭП}}) \quad (13)$$

балансы электрической мощности в узлах сети:

$$\sum_i S_{ni} - \sum_k L_{nk} + \sum_k L_{nk}(1 - \mu_{kn}g_{kn}) = \bar{C}_n, n \in N, \quad (14)$$

где S_{ni} – нагрузка электростанции, МВт; $S = \{S^{ТЭЦ}, S^{КЭС}, S^{ГЭС}, S^{АЭС} \dots\}$; $K_{nk}^{ЛЭП}$ – капитальные вложения в новые ЛЭП, долл; $I_{nk}^{ЛЭП}$ – текущие ежегодные издержки ЛЭП, долл./год; $\tau^{реж}$ – длительность режима в году, ч; E – коэффициент эффективности капитальных вложений; μ_{nk} – коэффициент потерь электроэнергии, о.е./км; g_{nk} – протяженность линии, км; λ – топливные затраты электростанции, долл/(МВт·ч); S_{ni} – нагрузка станций, МВт; \bar{C}_n – максимальная прогнозируемая нагрузка потребителя, МВт; L_{nk} – пропускная способность ЛЭП, МВт.

При дальнейшем исследовании развития ЭЭС использовались ПВК RastWin и Power Factory, которые позволяют выполнять расчеты электроэнергетических режимов, сформированных с использованием ПВК СОЮЗ и СЕТИ сценариев развития ЭЭС для проверки их технической реализуемости. Здесь в общих условиях целью управления режимами электрической сети является реконфигурация сети путем размыкания контуров, при этом в качестве критерия рассматривался минимум потерь активной мощности в сети:

$$\sum_{l \in L} R_{lk} I_{lk}^2 \rightarrow \min, \quad k \in K, \quad (15)$$

где k – множество рассматриваемых нормальных режимов в соответствии с графиками нагрузки потребителей и загрузкой установок распределенной генерации; L – число ветвей в сети; R_{lk}, I_{lk} – активное сопротивление и ток в ветви l для режима k , K – число рассматриваемых режимов.

В процессе координации управления режимами электрической сети важной задачей является проверка выполнения соответствующих ограничений по уровням напряжений (U_{ik}) в узлах и токов (I_{lk}) в ветвях сети, как в нормальных, так и в после аварийных режимах:

$$U_{ik,min} \leq U_{ik} \leq U_{ik,max}, \quad I_{lk} \leq I_{lk,max}, \quad (16)$$

Разработанный вычислительный инструментарий можно представить в виде укрупненной схемы, приведенной на Рисунке 7.

Пятая глава посвящена прогнозированию электропотребления Монголии. Ожидаемые вводы новых горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, а также возрастающее электропотребление в социальной сфере южных, юго-восточных и восточных районов и по всей стране в целом, приводят к значительному увеличению электропотребления.

Это, а также ввод новых генерирующих мощностей в ближайшем будущем, потребует объединения региональных ЭЭС страны с наиболее крупной Центральной (ЦЭЭС) новыми ЛЭП, что является предпосылкой для формирования ЕЭЭС Монголии. Выполненные в работе расчетные исследования плотностей электропотребления и нагрузки потребителей выявили низкие значения этих важных показателей, применяемых при формировании местных сетевых структур (см. Таблицу 2).

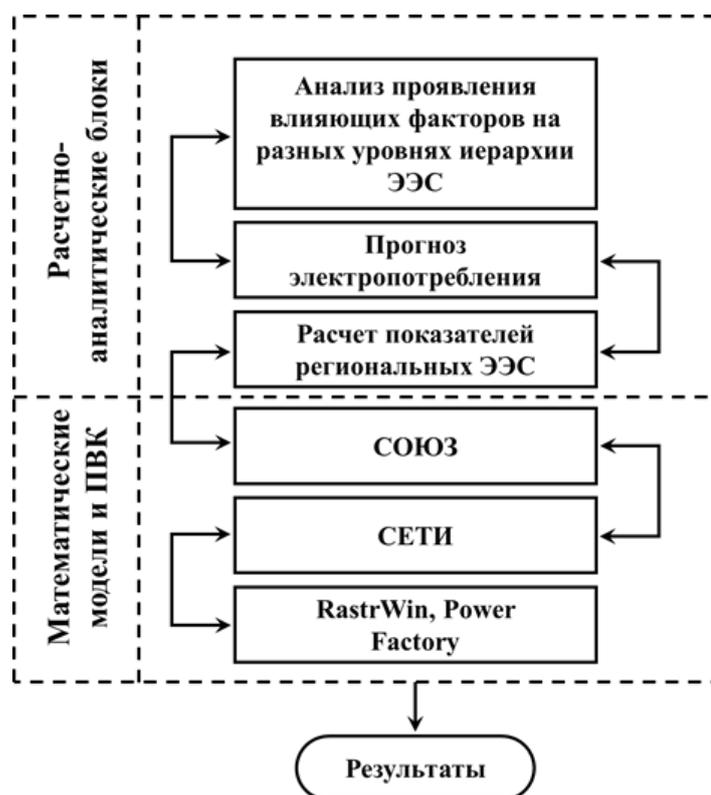


Рисунок 7–Укрупненная схема программных комплексов и их взаимодействия в рамках вычислительного инструментария

Таблица 2 – Средние плотности электропотребления и мощности потребителя

ЭЭС	Показатель			
	Плотность электропотребления, кВт·ч/км ² ·год	Мощность потребителя, кВт/км ²		
		Промышленность и сельское хоз-во	Домашнее хозяйство	Суммарное значение
ЦЭЭС	11004,27	0,76	0,49	1,25
АУЭЭС	272,90	0,01	0,02	0,03
ЗЭЭС	716,33	0,04	0,04	0,08
ВЭЭС	774,35	0,07	0,02	0,09
ЮЭЭС	8851,47	0,99	0,02	1,01

АУЭЭС – Алтайско-Улиастайская ЭЭС; ВЭЭС – Восточная ЭЭС; ЗЭЭС – Западная ЭЭС; ЮЭЭС – Южная ЭЭС.

Для сравнительной оценки уровня электропотребления Монголии, использовались данные энергетических сайтов зарубежных стран и регионов РФ. Результаты показали, что за исключением отдельных регионов показатели территориального распределения электропотребления Монголии имеют низкие уровни, и этот фактор должен учитываться при дальнейшей разработке концепции развития ЭЭС и ЕЭЭС страны. Прогноз электропотребления, рассчитанный по трем сценариям, которые учитывают степень реализации вводов производственных объектов (50, 75 и 100 %), представлен в Таблице 3.

Таблица 3 – Электропотребление по сценариям с разной степенью реализации, млрд.кВт·ч

Наименование показателя	2030 г.			2040 г.			2050 г.		
	100	75	50	100	75	50	100	75	50
Степень реализации, %	100	75	50	100	75	50	100	75	50
Прогноз электропотребления, млн кВт.ч	7,9	5,9	4,0	11,7	8,8	5,9	15,2	11,4	7,6
Рост энергопотребления за счет ввода новых производственных объектов, млн йкВт.ч	7,5	5,6	3,7	8,5	6,3	4,2	10,0	7,л	5,0
Итого, млн кВт.ч	15,4	11,5	7,7	20,2	15,1	10,1	25,2	18,9	12,6

В шестой главе представлены результаты исследований перспектив развития ЕЭЭС Монголии и ее интеграции в энергетическое пространство СВА. С учетом территориального размещения действующих объектов электроэнергетической отрасли страны и потенциальных новых энергетических мощностей, расположения существующих потребителей электроэнергии, формирования крупных потребителей в процессе развития существующих и возникновения новых административно-хозяйственных и промышленных образований была подготовлена укрупненная схема электроэнергетической системы электроэнергетики Монголии до 2030 года, включающая описываемые ниже девять энергоузлов (Рисунок 8).

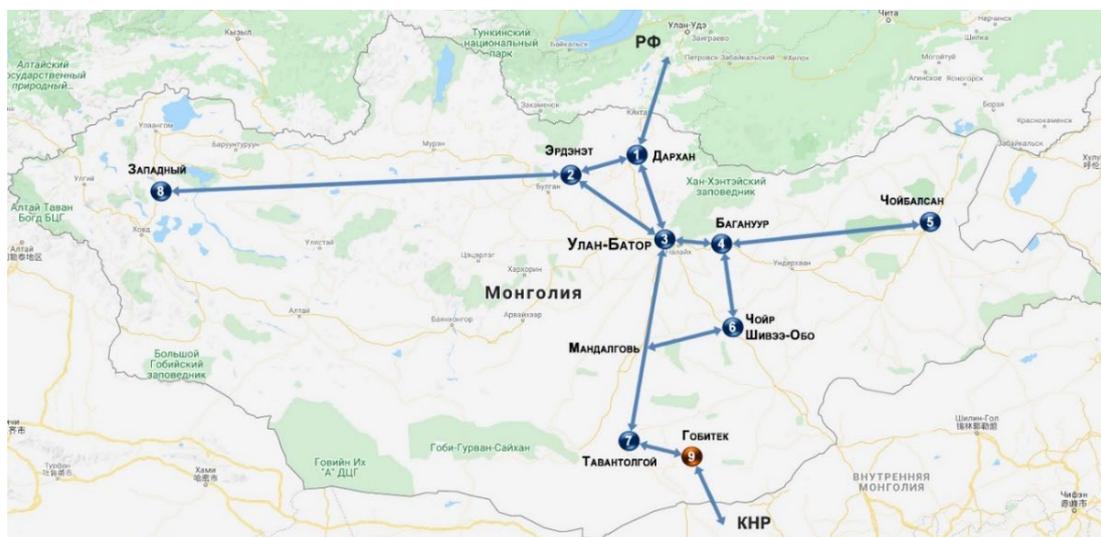


Рисунок 8 – Предварительная схема электроэнергетики Монголии

Краткая характеристика расчетных энергетических узлов представлена ниже.

Узел 1 (г. Дархан), соответствует Дарханскому административно-промышленному району. В нем находятся действующие генерирующие объекты, в их числе ТЭЦ

мощностью 48 МВт, СЭС мощностью 10 МВт, сосредоточены разнотипные потребители электроэнергии, такие как металлургический и мукомольный комбинаты, железнодорожный узел, предприятия градостроительства и др. Здесь же расположена электрическая подстанция проходят ЛЭП напряжением 220 кВ, соединяющие этот узел с ЭЭС РФ, с Улан-Батором и с Эрдэнэтом.

Узел 2 (г. Эрдэнэт) включает крупный горнообогатительный медно-молибденовый комбинат (ГОК) и другие промышленные предприятия. В г.Эрдэнэт находятся городская ТЭЦ мощностью 36 МВт и ТЭЦ ГОК мощностью 53 МВт и подстанция напряжением 220 кВ.

Узел 3 с расположенным в нем г. Улан-Батор представляет наиболее развитый энергокомплекс, в котором сосредоточено около 80 % электропотребления страны и расположены городские ТЭЦ 2, 3 и 4 – основные генерирующие источники центрального экономического района, суммарной установленной мощностью 925 МВт.

Узел 4 (г. Баганур). В Багануре находится крупный угольный разрез, снабжающий топливом электростанции центрального экономического района, в том числе Улан-Баторские ТЭЦ. Действует системообразующая подстанция напряжением 220 кВ, которая снабжает электроэнергией восточные и южные районы Монголии.

Узел 5 (г. Чойбалсан). Здесь расположен единственный генерирующий источник восточного региона – Чойбалсанская ТЭЦ мощностью 36 МВт. Узел связан с энергосистемой центрального района одноцепной ЛЭП 110 кВ.

Узел 6 (г. Чойр). Этот узел связывает центральную энергосистему с электросетью южного района страны. В данном районе планируется сооружение Сайн-Шандинского промышленного парка и нефтеперерабатывающего завода. В нем располагается системообразующая подстанция (2х200 МВА) и ЛЭП напряжением 220 кВ.

Узел 7 (Тавантолгой). Район Тавантолгой находится на юге Монголии, где разрабатывается богатое месторождение коксующегося угля, размещается ТЭС мощностью 18 МВт, формируется крупная промышленная база, являющаяся одной из опорных точек экономики страны. Здесь построены двухцепная ЛЭП и 3 подстанции в г. Мандал-Гоби и в местностях Тавантолгое и Оюу-Толгое напряжением 330 кВ, которые соединяют этот энергоузел с энергоузлами 3 и 6.

Узел 8 (Западный) обеспечивает электроснабжение западной части страны на базе действующих Дургонской и Тайширской ГЭС. Узел 8 связан с узлом 2 (Эрдэнэт) по одноцепной ЛЭП 110 кВ, имеющей низкую надежность из-за значительной протяженности (более 700 км).Здесь проходит электрическая связь с Красноярской ЭЭС России по двухцепной ЛЭП напряжения 110 кВ.

Узел 9 (Гобитек) в настоящее время не имеет источников электроэнергии. В будущем здесь предусмотрено значительное развитие генерирующей мощности, использующей богатые ресурсы возобновляемой энергии трансгосударственной зоны «Гоби-Дезерт (Gobi-Desert)» в рамках международного инициативного проекта «Гобитек (Gobi-Tech)» стран Северо-Восточной Азии.

В этой схеме ЕЭЭС Монголии с 9-ю узлами учтены производство и потребление электроэнергии (включая их объемы, структуру и режимы) соответствующих экономико-

промышленных районов и перетоки энергии и мощности по системообразующим линиям без учета импорта. В соответствии с этой схемой подготовлена необходимая исходная информация по развитию электроэнергетики Монголии до 2030 г. и проведены расчетные исследования для объединенной структуры энергосистемы и различных вариантов ее развития с использованием оптимизационного пакета программ «СОЮЗ».

В расчетах рассматривался один вариант электропотребления на 2030 год, в основном соответствующий направлениям принятой Энергетической политики и в два раза превышающий уровень электропотребления отчетного 2018 года (см. средний сценарий на Рисунке 8). Основными узлами нагрузки в отчетном 2018 году и в прогнозируемом 2030 году остаются Дархан, Эрдэнэт и Улан-Батор. Доля этих узлов в общем электропотреблении, как это показано в Таблице 4, изменяется незначительно (89 % в 2018 году и 86 % в 2030 году).

Таблица 4 – Годовое электропотребление, млрд.кВт·ч

Потребление	Дархан	Эрдэнэт	Улан-Батор	Баганур	Чойбалсан	Чойр	Таван-толгой	Западный	Гобитек	Всего
2018 г.	0,565	1,309	3,885	0,211	0,183	0,107	0,05	0,183	0	6,493
Доля, %	9	20	60	3	3	2	1	3	0	100
2030г.	1,019	2,363	7,364	0,421	0,526	0,19	0,072	0,478	0,148	12,581
Доля, %	8	19	59	3	4	2	1	4	1	100
Прирост за период	0,454	1,054	3,479	0,21	0,343	0,083	0,022	0,295	0,148	6,088
Доля, %	80	81	90	100	187	78	44	161		94

Годовое число часов использования максимума нагрузки (P_{\max}) в 2030 году несколько отличается от значения 2018 года (см. Таблицу 5).

Таблица 5 – Годовое число часов использования максимума нагрузки (ЧЧИМ) (P_{\max})

Показатель	Дархан	Эрдэнэт	Улан-Батор	Баганур	Чойбалсан	Чойр	Таван-толгой	Западный	Гобитек	Всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2018 г.										
P_{\max} , МВт	104	202	691	42	34	25	12	47	0	1157
ЧЧИМ	5433	6480	5622	5024	5382	4280	4167	3894	-	5612
2030 г.										

Продолжение Таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{макс}}$, МВт	183	356	1330	83	104	40	16	115	35	2262
ЧЧИМ	5568	6638	5537	5072	5058	4750	4500	4157	4229	5562
δ , %	+2,5	+2,4	-1,5	-1,0	-6,0	+11,0	+8,0	+6,75	-	0,9

*Примечание. δ - изменение ЧЧИМ нагрузки в 2030 г по сравнению с 2018 г.

Режим электропотребления в узлах меняется либо в сторону уплотнения, либо разуплотнения зимних и летних суточных графиков, но в целом годовые показатели режима электропотребления остаются близкими к режиму 2018 года.

Развитие генерирующих мощностей энергосистемы Монголии (см. Таблицу 6) до 2030 года (с учетом экспорта в Китай) возможно за счет строительства новых электрических станций в Чойре, Тавантолгое и Багануре, а также в результате расширения ТЭЦ для целей теплоснабжения. В узле Гобитэк предусматривается строительство крупных возобновляемых источников электроэнергии, включая ветряные электростанции (ВЭС) 1400 МВт и солнечные (СЭС) 600 МВт. Всего до 2030 года на электростанциях страны предполагаемый ввод мощности может составить порядка 7500 МВт, в том числе 395 МВт на ГЭС, 434 МВт на ТЭЦ, 4650 МВт на конденсационных электростанциях и более 2000 МВт на ветряных и солнечных электростанциях.

Таблица 6 – Планируемые вводы мощности до 2030 года, МВт

Электро - стнции	Дархан	Эрдэнэт	Улан-Батор	Баганур	Чойбалсан	Чойр	Таван-толгой	Западный	Гобитек	Всего
ГЭС		315						80		395
ТЭЦ	35	47	202		100			50		434
КЭС				700		3500	450			4650
ВЭС						50			1400	1450
СЭС			15			25			600	640
Всего	35	362	217	700	100	3575	450	130	2000	7569

В расчетах оптимизировалось развитие КЭС и возобновляемых источников (СЭС, ВЭС). Масштабы вводов на ГЭС и ТЭЦ задавались экспертно, с ориентацией на Энергетическую программу. Ввод в эксплуатацию Эгийнгольской ГЭС может удовлетворить потребности в маневренной мощности, поскольку теплоэлектроцентрали привязаны к тепловым нагрузкам в узлах и не участвуют в регулировании электрической мощности.

На основании выполненных исследований по направлениям развития электроэнергетических систем Монголии на перспективу до 2030 года по базовому варианту, соответствующему Энергетической стратегии Монголии без учета

электрических связей с Россией и Китаем, и вариантам с отказом от сооружения Эгийнгольской ГЭС можно сделать следующие выводы.

В базовом варианте для покрытия потребностей Монголии в электроэнергии в 2030 году потребуются ввод около 1500 МВт на электростанциях, в том числе 200 МВт на ГЭС, 434 МВт на ТЭЦ, 346 МВт на угольных КЭС, 515 МВт на ВЭС, 38 МВт на СЭС. Установленная мощность всех электростанций энергосистемы Монголии к 2030 году увеличится более чем в 1,5 раза и составит 2700 МВт. При отказе от строительства Эгийнгольской ГЭС (из-за возможных экологических проблем) требуется либо замещение ее новой угольной КЭС в Эрдэнэте, либо в других узлах системы с дополнительным усилением электрической схемы межузловыми ЛЭП. При принятых условиях ветряные станции, как правило, более экономичны, чем солнечные. Крупные энергоблоки 800 МВт из-за их низкой маневренности проигрывают более мелким блокам мощностью 200 МВт.

Планируемая связь Баганур-Улан-Батор-Эрдэнэт имеет недостаточную пропускную способность для передачи энергии от новых генерирующих источников в центральные узлы энергосистемы Монголии. Это критически проявляется при отказе от строительства Эгийнгольской ГЭС, поэтому в планах на 2030 г. следует рассматривать усиление этой связи.

Дальнейшее исследование развития ЭЭС Монголии проводилось с учетом ранее представленной иерархической структуры ЕЭЭС, где последняя рассматривалась как составная часть ТЭК страны, прежде всего, осуществляющая покрытие потребностей в электроэнергии регионов (на первом уровне) и страны (на втором уровне).

При рассмотрении первого уровня иерархии электроэнергетических систем также были выделены девять энергоузлов. С учетом значительной сосредоточенности электропотребления в отдельных узлах на втором (II) уровне иерархии ЭЭС в ее структуре выделены новые энергоузлы путем разделения некоторых из ранее принятых 9-ти узлов.

С использованием разработанной оптимизационной модели развития электрических сетей проводились исследования схемы ЛЭП ЕЭЭС по нескольким вариантам. Отдельные результаты показаны на Рисунке 11. Полученная схема значительно отличается от предварительно подготовленной. Так, запланированные электрические связи, соединяющие энергоузел 3 с энергоузлами 9 (ВЛ 7), 11 (ВЛ 9) и 6 (ВЛ 14), не вошли в оптимальное решение задачи.

В результате оптимизации появились новые электрические связи между некоторыми энергоузлами, а также выявилась необходимость в усилении электрических связей между отдельными энергоузлами. Между энергоузлами 3 и 7, 3 и 4, 6 и 10 необходимо строить новые двухцепные ВЛЭП напряжением 220 кВ. Также потребуются электрические связи ВЛ 4 и ВЛ 10. На схеме эти связи изображены условно пунктирными линиями.

Для оценки технической возможности передачи мощности вышеуказанных ВЛЭП, производилось моделирование и выполнялись расчеты электроэнергетических режимов в системе RastrWin. Результаты расчетов представлены на Рисунке 12.

В связи с этим количество энергоузлов увеличилось до двенадцати (см. Рисунок 9). Изначально исследование по выбору рациональной схемы и структуры ЕЭЭС опиралось на оценку индикативных показателей. Она включала 5 действующих электроэнергетических систем регионального значения в пределах обслуживаемых ими районов на период до 2030 г. в соответствии со среднесрочной программой развития электроэнергетики Монголии. Затем, полученная схема (представленная на Рисунке 12) была уточнена на период до 2050 г. в соответствии с долгосрочной программой развития “Дальновидение-2050”.

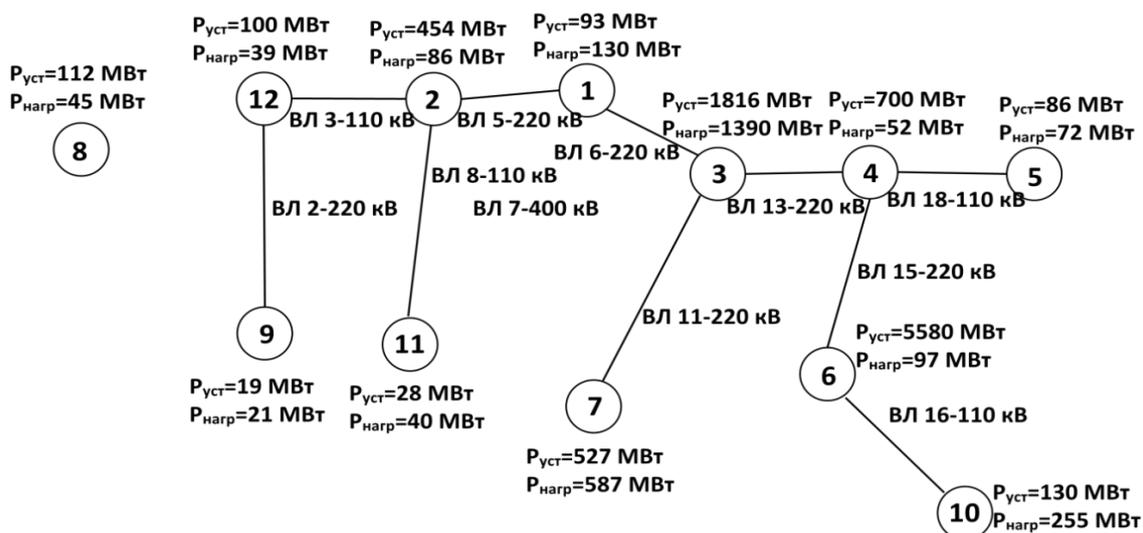


Рисунок 9 – Предварительная схема второго иерархического уровня ЕЭЭС. 1-Дархан; 2-Эрдэнэт; 3-Улан-Батор; 4-Баганур; 5-Чойбалсан; 6-Чойр; 7-Тавантолгой; 8-Западный; 9-Алтайский; 10-Сайншанд; 11-Баянтээг; 12- Могойн-Гол (Хубсугул)

В результате анализа, выполненного в процессе получения уточненной схемы, выяснилось, что пять региональных ЭЭС целесообразно преобразовать в три РЭЭС, которые будут удовлетворять требованиям по топливной базе, мощности, маневренности и реализации оптимальных режимов работы ЕЭЭС при имеющихся и предлагаемых межсистемных связях. Они позволяют в достаточной степени обеспечить обмен потоками мощностей и энергии с сопредельными системами в аварийных условиях. В моделировании наряду с существующими связями рассматривались еще возможные планируемые линии. Схема и параметры этих связей представлены на Рисунке 10 и в Таблице 7.

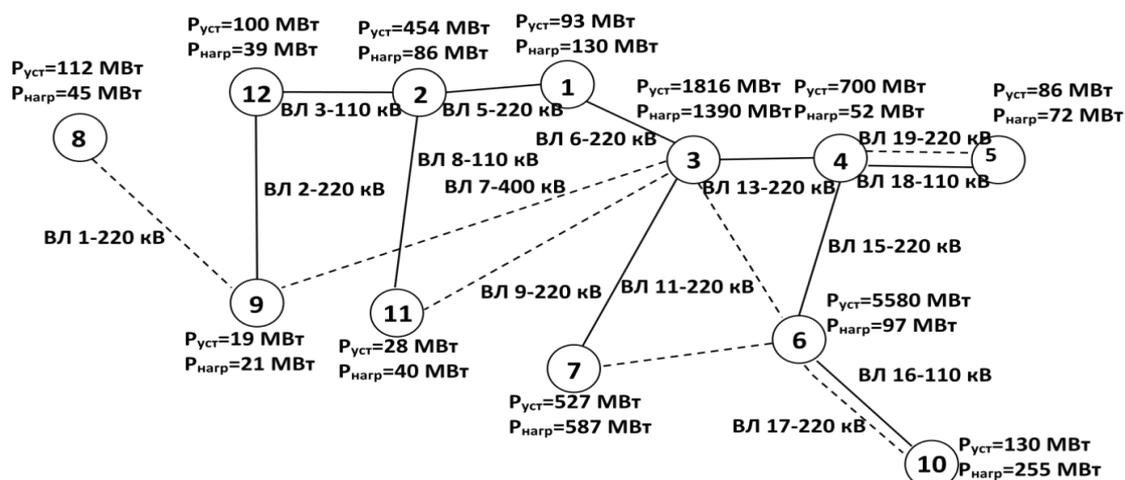


Рисунок 10 – Планируемое развитие межзубовых связей на 2030 год: сплошная линия – существующая связь; пунктирная линия – планируемая связь

Таблица 7 –Межзубовые связи* ЕЭЭС Монголии

№ ВЛ	Начало	Конец	Напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина, км	Статус
ВЛ 1	8	9	220	104	693	Планируется
ВЛ 2	9	12	220	104	500	Планируется 110 кВ существует
ВЛ 3	12	2	110	72	500	Существует
ВЛ 4	9	11	110	72	400	Возможна
ВЛ 5	2	1	220	104	180	Существует
ВЛ 6	1	3	220	104	219	Существует
ВЛ 7	9	3	400	288	1037	Планируется
ВЛ 8	11	2	110	72	529	Существует
ВЛ 9	11	3	110	72	639	Возможна
ВЛ 10	11	7	110	72	500	Возможна
ВЛ 11	7	3	220	104	575	Существует
ВЛ 12	7	6	660	800	480	Планируется
ВЛ 13	3	4	220	104	120	Существует
ВЛ 14	3	6	110	72	240	Возможна
ВЛ 15	6	4	220	104	250	Планируется 110 кВ существует
ВЛ 16	6	10	110	72	226	Существует
ВЛ 17	6	10	220	104	226	Планируется
ВЛ 18	4	5	110	72	541	Существует
ВЛ 19	4	5	220	104	541	Планируется

* Каждая связь принята как одноцепная ВЛ соответствующего класса напряжения

Проведенные исследования позволили определить конкретные связи, требуемые для формирования перспективной схемы ЕЭЭС страны (Рисунки 11 и 12). Они вполне достаточны для решения вопросов обеспечения надежного электроснабжения внутренних потребителей электроэнергией. Это было основной целью решения задач развития энергетики страны на период до 2030 г. В Таблице 8 приведена общая характеристика вновь образованных трех региональных электроэнергетических систем, а на Рисунке 13 показано их территориальное расположение.

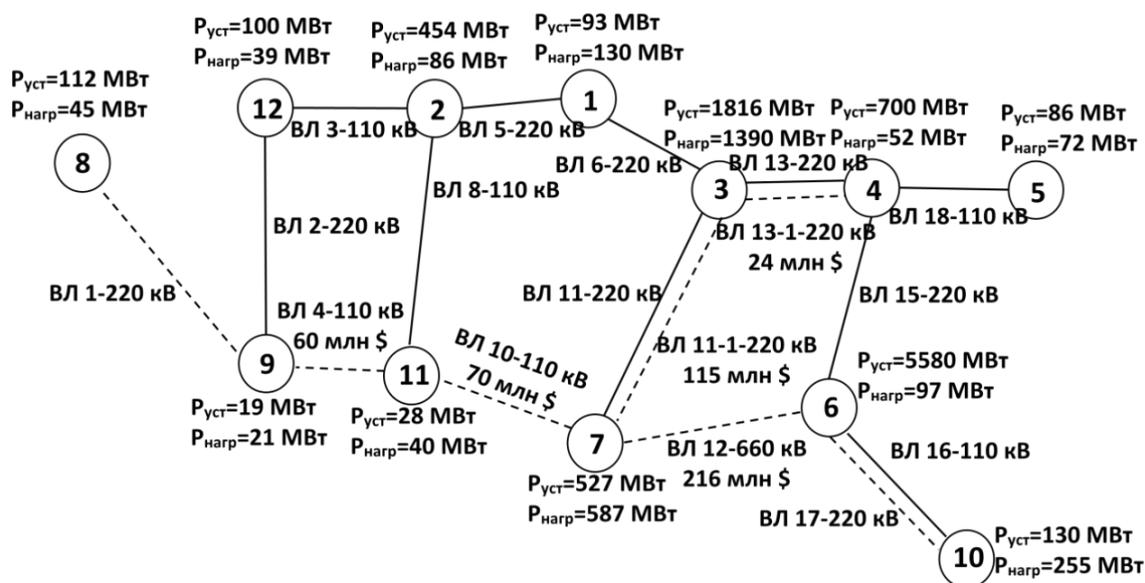


Рисунок 11 – Решение, полученное с использованием оптимизационной модели развития

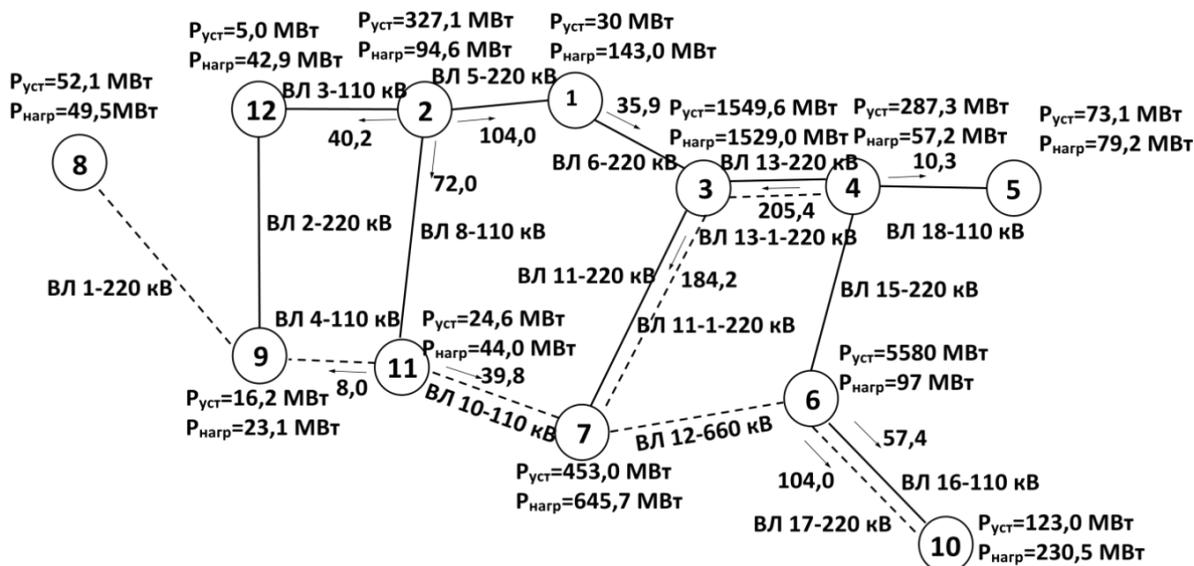


Рисунок 12 – Решение, полученное с учетом режимного расчета

Таблица 9 – Основные показатели РЭЭС

№	ЭЭС	Установленн. мощность, $P_{уст}$, МВт		Макс. нагрузка, P_{max} , МВт		Мощность связи**, $P_{сис.связь}$, МВт		Показатели снабжения топливно-энергетическими ресурсами			
		2019	2050	2019	2050	2019	2050	$\alpha_{уст,м}$		$\alpha_{сис.связь}$	
								2019	2050	2019	2050
1	ЗЭЭС	31,1	331	58	105	16	48,2	0,54	3,15	0,81	3,61
2	ЦЭЭС	1222,9	8801	1153	1745	-	-	1,06	5,04	-	-
3	ЮВ ЭЭС	243	743	208	884	23,41	395,7	1,17	0,84	1,28	1,29
Итого		1497	9875	1419	2734	39,41	443,9	1,05	3,61	1,08	3,77

** - Значение 2019 г. определяется по максимальной мощности, передаваемой по ВЛ в 2019 г., а значение 2050 г. определяется по результатам расчетов.

Это указывает, на то, что и к этому времени в данной энергосистеме будет наблюдаться недостаток собственных источников. Вместе с тем, предполагаемое надежное соединение Юго-Восточной ЭЭС с Центральной ЭЭС по межсистемным ВЛЭП и получаемые по этой линии перетоки энергии и мощности обеспечат сбалансированность системы.

Дальнейшее развитие ЕЭЭС Монголии, с выходом на третий и последний, четвертый, иерархические уровни иерархии (см. Рисунок 3), предусматривает усиление внешних электрических связей с созданием технической возможности совместной работы с ЭЭС сопредельных стран. Здесь, прежде всего, рассматривается усиление электрической связи с энергосистемой РФ для обеспечения требуемой надежности самой ЕЭЭС Монголии и создание возможности экспортной поставки электроэнергии в КНР с последующей более тесной интеграцией ЕЭЭС в «суперсеть» стран СВА. В качестве направлений интеграции обосновываются проекты сооружения энергетического комплекса в пустыне Гоби Монголии, мощностью 100 ГВт на базе ВЭС и СЭС, экологически чистой ТЭС мощностью 4800 ГВт на базе Шивэ-Обоского месторождения угля и ВЛЭП для передачи электроэнергии в страны СВА.

Седьмая глава посвящена формированию интеллектуальной ЭЭС Монголии. Основная концептуальная идея интеллектуальных энергетических систем заключается в создании системно интегрированной и самоуправляемой в режиме реального времени энергетической системы, имеющей единую сетевую инфраструктуру, технологически и информационно связывающую все генерирующие источники энергии со всеми потребителями. Для формирования и эффективного развития ИЭС Монголии необходимо усовершенствовать системы контроля и управления функционированием энергосистемы в нормальных и переходных процессах, состоянием установившегося режима, системы управления режимами, релейной защиты в ненормальных и аварийных ситуациях. Кроме того, необходимо реорганизовать противоаварийную автоматику, рассчитать ее уставки, проверить и улучшить расчетную модель режима системы, создать новую систему

мониторинга переходных режимов (СМПР) и информационного контроля, а также разработать ее схемную реализацию.

Впервые в Монголии автором были проведены исследования по созданию систем измерения и управления ЭЭС. По результатам исследований были установлены устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) типа ЭНИП-2 в 4-х ответственных точках (узлах) ЦЭЭС Монголии. Совместно с кафедрой «РЗиАЭ» НИУ МЭИ изучалась работа установки УСВИ (ЭНИП-2) для СМПР в ЦЭЭС на подстанциях напряжением 220 кВ ЦЭЭС в Дархане, Эрдэнэте, Улан-Баторе. Дальнейшие исследования проводились в целях разработки методики краткосрочного определения места повреждения при однофазном замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью с использованием УСВИ и разработки структурных схем СМПР верхнего и нижнего уровня с расширением состава точек измерения.

В результате проведенных исследований сетевых структур и анализа режимных параметров работы систем автоматики ЭЭС Монголии определялись наиболее рациональные места установки и количество контрольных точек в ЭЭС. Для охвата всех ЭЭС страны системой контроля требуется установить УСВИ в 127 точках (узлах) сети электроэнергетических систем.

В настоящее время в ЦЭЭС создана 41 контрольная точка. В результате внедрения мониторинговой системы СМПР предотвращено 8 возможных аварийных ситуаций. Например, 15 июня 2022 г. была предупреждена аварийная ситуация на Улан-Баторской ТЭЦ-4 на турбогенераторной установке ТГ-3. На следующем этапе развития предполагается внедрение противоаварийной автоматики – Wide Area Monitoring, Protection, and Control (WAMPAC, которая будет интегрирована в существующую СМПР.

Заключение

В результате исследований, выполненных в рамках диссертационной работы получены следующие научные результаты и сделаны выводы.

1. Анализ формирования энергетической отрасли в Монголии, основанный на системном подходе, позволил выделить два периода, содержательно коренным образом отличающихся между собой, а именно: социалистический, соответствующий плановой и постсоциалистический, соответствующий рыночной экономике. Они отличаются не только системами планирования и финансирования, но и принципиальным подходом и оценкой самой энергетики. Эти периоды разделены на пять конкретных временных этапов, отличающихся качественными изменениями. Первый этап – начальный этап использования электроэнергии (1921-1940 гг.); второй этап – создание основы электрических сетей (1940-1960 гг.); третий этап – формирование энергетической системы и возникновение энергетической отрасли (1960-1990 гг.); четвертый этап – кризисное состояние в энергетике (1990-2000 гг.); пятый этап – восстановление и подъем энергетического сектора (с 2000 г. до наших дней).

2. Географическое расположение Монголии на Азиатском континенте между РФ и КНР, большая площадь территории и наличие значительных запасов минерально-

сырьевых и первичных энергетических ресурсов, делают страну геополитически привлекательной в мировом масштабе, особенно для РФ и КНР. Это является благоприятным и отличительным фундаментом для совместного энергетического развития в XXI веке, в том числе в рамках АТР и СВА.

В связи с этим, развитие монгольской энергетики невозможно рассматривать независимо от внешних факторов, которые диктуются мировыми тенденциями трансформации энергетики, проявляются в процессе реализации энергетических стратегий соседних стран, а также внутренних факторов, выражающихся характерными особенностями, такими как низкая территориальная плотность электрических нагрузок и их пространственная распределенность. Результаты исследований электропотребления показали, что среднее территориальное значение плотности по стране составляет $0,7 \text{ кВт/км}^2$ по мощности и $6,1 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2$ по энергии. Их наибольшие значения достигаются в Центральном аймаке, включая г. Улан-Батор, и составляют $8,32 \text{ кВт/км}^2$ и $73,1 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2$ соответственно. Наименьшие значения характерны для Гоби-Алтайского аймака – $0,02 \text{ кВт/км}^2$ и $0,2 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2$ соответственно.

3. Впервые проведены детальные исследования характеристик энергопотребления и динамики его роста за последние 20 лет в соответствии с поставленными задачами, отраженными в директивных документах развития страны, в т.ч. «Дальновидение-2050», и предложена математическая зависимость (уравнение линейной регрессии) для прогноза роста электропотребления. В результате этих исследований получен научно обоснованный прогноз годового электропотребления страны и регионов на перспективу до 2050 г. по трем сценариям, что представляется необходимым для выполнения дальнейших исследований. Например, в 2030 г. по среднему сценарию годовое электропотребление, как ожидается, будет составлять 11,5 млрд. кВт·ч, а его плотность – $7,4 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2\cdot\text{год}$. В 2050 г. эти показатели возрастут, соответственно до 18,9 млрд. кВт·ч и $12,4 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2\cdot\text{год}$. Для Центрального и Гобийского районов за счет развития промышленности электропотребление и его плотность могут увеличиться в 2050 г., соответственно, до 116,8 и $18,3 \text{ МВт}\cdot\text{ч/км}^2\cdot\text{год}$.

4. В результате системного анализа всех основных свойств и показателей электропотребления и возможных способов электроснабжения сформирован методический подход и разработана общая методология и концептуальная модель иерархического развития ЭЭС Монголии, ориентированная на создание новых генерирующих мощностей и новых системообразующих ЛЭП. Как в техническом, так и во временном разрезе процесс создания ЕЭЭС страны методически целесообразно разделить на два этапа по реализации. Первый этап предусматривает повышение надежности и устойчивости внутреннего энергоснабжения. Второй этап, ориентированный на экспортно-импортные поставки электроэнергии и интеграцию в будущее межгосударственное энергетическое объединение стран СВА, должен начаться с усиления электрических связей с энергосистемами РФ и КНР. В свою очередь, с научно-исследовательской и методологической точек зрения, по всей системе в целом можно выделить четыре иерархических уровня развития. Первый, это действующие ЭЭС, второй – ЕЭЭС Монголии, третий – совместно работающая ЕЭЭС Монголии с ЭЭС

сопредельных стран и четвертый – ЕЭЭС Монголии, как составная часть международного энергообъединения («super-grid») стран СВА.

5. Предложен целостный вычислительный инструментарий для выполнения комплексных исследований по формированию и обоснованию развития интеллектуальной ЕЭЭС Монголии. Этот инструментарий включает усовершенствованные математические модели развития энергосистем СОЮЗ и развития электрических сетей, ПВК расчета электроэнергетических режимов RastrWin и PowerFactory. Эти модели и ПВК, объединенные друг с другом информационными связями, дополняются расчетными блоками по оценке перспективных уровней электропотребления страны и регионов, расчету и анализу показателей региональных электроэнергетических систем, качественной оценке роли внутренних и внешних факторов на разных уровнях иерархии развития ЕЭЭС.

6. Проведены варианты исследования по оптимизации генерирующей и сетевой структуры ЕЭЭС Монголии. Для достижения поставленной цели и решения соответствующих задач исследования рассмотрены четыре сценария развития электроэнергетической системы, первые три из которых, хотя и несколько условны, но отражают характерные состояния системы. Первый сценарий – самостоятельная закрытая (изолированная, т.е. без внешней связи) система, обеспечивающая полностью свою потребность в электроэнергии, независимая в любое время от импорта; второй сценарий – полужакрытая система, обеспечивающая энергопотребление в аварийных условиях за счет импорта; третий сценарий – мощная открытая система, работающая на своих источниках энергии и экспортирующая электроэнергию на внешний рынок; и четвертый сценарий – реальная оптимальная ЕЭЭС Монголии, соответствующая особенностям и масштабам социально-экономического развития и развития производительных сил страны, которая по мере необходимости и возможности работает в импорто-экспортных режимах.

7. Определена оптимизированная многоузловая комплексная структурная схема ЕЭЭС Монголии, в которой объединены региональные электроэнергетические системы, имеющие достаточные генерирующие мощности с учетом первичных энергетических ресурсов соответствующих регионов для покрытия их энергопотребления и необходимые межсистемные электрические связи, обеспечивающие обмен мощностью и энергией между ними во внешнетатных ситуациях.

8. На основе выполненных исследований и системного анализа показано, что вместо нынешних пяти ЭЭС целесообразно иметь три РЭЭС, удовлетворяющих требованиям по топливной базе, мощности, маневренности и управляемости в составе будущей ЕЭЭС Монголии при имеющихся и планируемых межсистемных связях, позволяющих в достаточной степени обеспечить обмен потоками мощности и энергии с сопредельными системами в аварийных условиях.

9. Предложена иерархическая структура в виде пирамиды, отражающей принципы создания интеллектуальной ЭЭС – одного из ключевых механизмов в достижении целевой установки энергетической стратегии Монголии по трансформации отраслей энергетического комплекса в современную высокотехнологичную и эффективную

инфраструктуру, обеспечивающую как количественный, так и качественный экономический рост.

На основе модельных исследований предложена схема управления и регулирования формирующейся в перспективе интеллектуальной ЕЭЭС путем внедрения автоматизированных систем (SCADA), основанных на цифровых технологиях, а также автоматизированных системах управления информацией, таких как СМПП, WAMPAC, адаптированных к местным условиям для оперативного диспетчерского управления. Предложено комплексное использование системы релейной защиты и автоматики (РЗА), включая противоаварийную, технологическую и режимную автоматику, способную обеспечить надежную параллельную работу электроэнергетических систем Монголии для исключения системных аварий, как подготовительный этап для формирования и дальнейшего развития будущей интеллектуальной ЕЭЭС.

10. Разработана структура системы мониторинга переходных режимов, основной задачей которой является обеспечение непрерывного измерения и мониторинга параметров нормальных и переходных процессов по наиболее ответственным линейным, автотрансформаторным и генераторным присоединениям энергосистемы Монголии. Рассмотренные технические решения являются основой для формирования и дальнейшего развития энергосистемы Монголии как интеллектуальной инновационно-технологической системы.

11. Согласно предложенным в диссертации методологии и методике дальнейшее развитие ЕЭЭС Монголии должно осуществляться в направлении усиления электрических связей с ЭЭС сопредельных стран, что является предпосылкой выхода страны на энергетическое пространство СВА. В работе сформированы предложения по созданию таких связей с ЭЭС РФ и КНР. Для активного участия Монголии в формировании и развитии МГЭО в Северо-Восточной Азии – «Asian Super Grid» необходимо включить Шивэ-Обоский энергетический комплекс и Гобитек в энергетическую сеть, охватывающую Дальний Восток РФ, северные и северо-восточные районы Китая, Японию, Республику Корея и Северную Корею.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые издания, рекомендованные ВАК по научной специальности 2.4.5.

1. **Bat-Erdene B.** Methodological Framework for Planning The Development of Mongolia's Electric Power Systems and Energy Industry / B. Bat-Erdene, N.I. Voropai S. Batmunkh B. Zhargalsaikhan S. Lyankhtsetseg B. Bat-Undral // Energy Systems Research. – 2023. – V. 6. – No. 4. – P. 5-24.

2. **Бат-Эрдэнэ Б.** Развитие энергетического сектора Монголии: моделирование и оптимизация структуры ЕЭЭС Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, П.С. Драчёв, С.В. Подковальников // Энергетик. – 2023. – № 5. – С. 26-35 (К2).

3. **Бат-Эрдэнэ Б.** Основы методологии планирования развития электроэнергетической системы Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, С.В. Подковальников // Вестник МЭИ. – 2023. – № 3. – С. 82-94 (К2).

4. **Бат-Эрдэнэ Б.** Развитие энергетического сектора Монголии: обзор и анализ проблемы / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, С.В. Подковальников // Энергетик. – 2023. – № 2. – С. 39-45 (К2).

5. **Бат-Эрдэнэ Б.** Методологические основы планирования развития электроэнергетической системы Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, Н.И. Воропай, С. Лянхцэцэг, С. Батмунх // Энергетическая политика. – 2021. – № 11. – С. 66-81 (К1).

6. Драчёв П.С. Оптимизация развития системообразующей электрической сети Монголии / П.С. Драчёв, В.В. Ханаев, **Бат-Эрдэнэ Б.** // Электричество. – 2021. – № 9. – С. 58-66 (К1).

7. **Бат-Эрдэнэ Б.** Анализ стратегии развития электроэнергетики Монголии без учета внешних межгосударственных электрических связей / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, Н.И. Воропай, В.В. Селифанов, В.В. Труфанов // Энергетик. – 2020. – № 11. – С. 55-59 (К2).

8. **Бат-Эрдэнэ Б.** Ситуация и перспективы развития интеллектуальной энергетики в Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, Н.И. Воропай [и др.] // Вестник МЭИ. – 2020. – № 3. – С. 11-16 (К2).

9. **Бат-Эрдэнэ Б.** Оценки технико-экономической эффективности создания парогазовых установок с внутрицикловой газификацией для условий Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, А.А. Дудолин, И.А. Бураков, Б. Улзийбадрах // Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 68-77 (К2).

10. **Бат-Эрдэнэ Б.** Потенциал Монголии в международной кооперации азиатского энергетического пространства / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, В.А. Стенников, А. Эрдэнэбаатар // Вестник ИргТУ. 65 Т. 21. – 2017. – № 10. – С. 65-77 (К1).

11. **Бат-Эрдэнэ Б.** Некоторые вопросы стратегии развития электроэнергетики Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, Н.И. Воропай, В.А. Стенников // Энергетическая политика. – 2016. – № 6. – С. 95-106 (К1).

Другие рецензируемые издания, включенные в РИНЦ

1. **Бат-Эрдэнэ Б.** Анализ существующих устройств релейной защиты и автоматики в электроэнергетических системах Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, Я.Л. Арцишевский, Э. Энхтур [и др.] // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик» – 2019. – № 2. – С. 2-11.

2. **Бат-Эрдэнэ Б.** Влияние ТЭЦ «ГОК – ЭРДЭНЭТ» на режимы работы электроэнергетической системы Монголии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, Х. Энхжаргал [и др.] // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик» – 2019. – № 4. – С. 30-40.

3. **Бат-Эрдэнэ Б.** Роли Монголии в межгосударственной электрической сети «ASIAN SUPER GRID» в Северо-Восточной Азии / Б. Бат-Эрдэнэ, С. Батмунх, Ч. Улам-

Оргил, А. Эрдэнэбаатар // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4 (22). – С. 52-61.

4. Арцишевский, Я.Л. Ступенчатая корреляционная защита при ОЗЗ с коммутацией маломощного резистора в сети 6-35 кВ / Я.Л. Арцишевский, **Б. Бат-Эрдэнэ**, В.В. Балашов // Релейная защита и автоматизация. - 2020. - №3(40). - С.26-29. (ВАК по специальностям 2.4.2., 2.4.3).

Статьи конференций, входящих в базу Scopus

1. **Bat-Erdene B.**, Batmunkh, S., Podkovalnikov, S.V. Research into Prospects for the Expansion of Mongolia's Electric Power Industry under Current Conditions / Bat-Erdene, B., Batmunkh, S., Podkovalnikov, S.V. // Geography and Natural Resources. – 2023/ – V. 44. – P.15-22.

2. **Bat-Erdene B.** Method of Calculation of Low-Frequency Electromagnetic Field Around 15 kV Transmission Lines / B. Bat-Erdene, M. Battulga, G. Tuvshinzaya // PECon 2020-2020 IEEE International Conference on Power and Energy. – 2020. – P. 40-43.

3. **Bat-Erdene B.** Mongolia's potential in international cooperation in the Asian energy space / B. Bat-Erdene, S. Batmunkh, V.A. Stennikov, A. Erdenebaatar // E3S Web of Conferences – 2018. – V. 27. 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017).

4. **Bat-Erdene B.** Prospects and problems of intellectualization of electric power systems in Mongolia / B. Bat-Erdene, S. Batmunkh, N.I. Voropai, B. Bat–Undral, E. Enkhtur // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 209.

Отпечатано в «ДубльПринт»

664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112

Заказ № 3796, тираж 130 экз.