

На правах рукописи



Абасс Ахмед Зкеар Абасс

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ИРАК)**

Специальность 05.14.02 -

Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Дмитрий Анатольевич Павлюченко**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Лукутин Борис Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, отделение Электроэнергетики и электротехники, профессор;

Ачитаев Андрей Александрович,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саяно-Шушенский филиал Сибирского Федерального Университета», г. Саяногорск, рп. Черемушки, кафедра «Гидроэнергетика, гидроэлектростанции, электроэнергетические системы и электрические сети», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г Омск.

Защита диссертации состоится «17» февраля 2022 года в 10:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Г.П. Лыщинского Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Результаты геополитических решений сказываются на качестве жизни целых регионов. Резкий рост цен на нефть или вооруженные конфликты могут стать фатальными для промышленности любой страны, где нет альтернативного топлива. Так, до 1990 года электроэнергетика Ирака была одной из лучших на Ближнем Востоке. В результате войн и санкций 1990-х и 2003-х годов Иракская электроэнергетическая инфраструктура сильно пострадала. Для восстановления полноценного функционирования электроэнергетики и удовлетворения текущего спроса требуется финансирование в размере 20 млрд. долларов. При этом, Ирак – это регион богатый солнечной энергией с количеством световых часов более чем 3300 в год. Пустынные районы Ирака являются стратегически важными областями страны, которые могут позволить вырабатывать большое количество электроэнергии с использованием возобновляемых источников энергии, в частности солнца, по сравнительно невысокой себестоимости, и тем самым прекратить энергетический кризис.

Предложенная в работе технология построения гибридных электростанций, а также разработанные математические модели, могут послужить основой для модернизации электроэнергетической системы Ирака, повышения эффективности существующих электростанций, снижения дефицита электрической энергии и улучшения экологической обстановки.

Военные действия и деятельность террористических группировок подорвали эффективность работы электроэнергетической системы Республики Ирак, нанеся урон всей электросетевой инфраструктуре. Существующий дефицит электроэнергии требует форсировать поиски других схем генерации с более высокой эффективностью, более низкой себестоимостью кВтч и Гкал, более коротким временем монтажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также с более экологичными источниками энергии.

В настоящее время Республика Ирак по-прежнему страдает от острой нехватки электроэнергии для граждан. Около 90% заводов и муниципальных зданий все еще не работают. Потребность в мощности увеличилась с 11000 МВт в 2007 году до 16000 МВт в 2013 году и до 24500 МВт летом 2018 года. Ожидается, что этот спрос будет расти до более чем 30000 МВт в 2022 году. Около 70% всей электроэнергии, произведенной в 2013 году, было потеряно (в том числе технические и коммерческие потери). Причиной данной проблемы является неэффективное управление и эксплуатация сектора распределения электроэнергии. Использование же современных технологий и оптимальное планирование оказывают большое влияние на снижение потерь. Анализ потокораспределения, устойчивости и токов короткого замыкания важны как

для проектирования, так и для условий эксплуатации электроэнергетической системы (ЭЭС), а затем для обеспечения надежной работы сети после ее оптимизации.

Для того чтобы придать Иракскому электроэнергетическому сектору реальный импульс и догнать растущий спрос, предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS). Только модернизация основных действующих электростанций Ирака с форсированием их мощности выше существующего уровня позволит пересмотреть цены на электроэнергию и преобразовать электроэнергетический сектор в самокупаемую отрасль.

Объект исследования - система электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) с использованием электрической станции с комбинированным циклом ISCCS мощностью 340 МВт с четырьмя газовыми турбинами и двумя паровыми турбинами. Четыре газотурбинных генератора (50 МВт каждый) и два паротурбинных генератора (140 МВт) подключены к шинам Khur Zubair.

Предмет исследования - гибридные электрические станции с комбинированным циклом на основе возобновляемых источников энергии.

Цель работы. Исследование возможности строительства гибридных парогазовых электрических станций с комбинированным циклом для снижения дефицита мощности в газоносных южных районах Ирака с высоким уровнем загрязнения воздуха.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ электропотребления и особенностей электроснабжения потребителей в Ираке, обосновать необходимость модернизации электроэнергетической системы Ирака для повышения уровня энергообеспеченности и снижения имеющегося дефицита электрической энергии.

2. Провести анализ географических и климатических условий Ирака и определить солнечный энергетический потенциал различных регионов Ирака на основе многопараметрической модели, учитывающей экологические, технические и энергетические факторы.

3. Исследовать технологию и обосновать технико-экономические параметры для построения гибридных электрических станций с комбинированным циклом как наиболее перспективную для экологически неблагоприятных южных районов Ирака.

4. Выполнить анализ режимов работы и балансов мощности в системе электроснабжения Южного Ирака, включающей в себя электрическую станцию

с комбинированным циклом в программе анализа электрических переходных процессов Electrical Transient Analyzer Program (ETAP).

Степень разработанности темы исследования.

Активным развитием исследований в области гибридных систем электроснабжения занимаются многие зарубежные ученые: Elsaket Gamal, Behar Omar, Kellaf Abdallah, Mohammedi Kamal, Elhaj Mohammed A, Matrawy Kassim K, Yassin Jamal S. Antonio LÁvila-Marín, Brakmann Georg, Berrehili Mohammed, Filali Khalid, Nezammahalleh H, Farhadi F, Tanhaemami M, Li Jun, Triebn Franz, Schillings Christoph, Pregger Thomas, O'Sullivan Marlene, Larrain Teresita, Escobar Rodrigo, Vergara Julio, Giori A, Binotti M, Astolfi M, Silva P, Macchi E, Manzolini G, Kane Malick, Favrat Daniel, Fahad A, Al-Sulaiman, Cau Giorgio, Cocco Daniele, Tola Vittorio и др.

Развитию и применению альтернативных и возобновляемых источников энергии посвящены работы многих отечественных авторов, таких как: Е.В. Соломин, Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, Ю.Г. Шакарян и др.

Несмотря на проведенные исследования и существующие разработки в данной области в работе предлагается новый подход к модернизации действующих газотурбинных установок с включением в их парогазовый цикл тепловой энергии от солнечных коллекторов при работе этих установок в составе электроэнергетической системы, что позволяет решать как вопросы покрытия дефицита энергии, так и устойчивости, стабилизации напряжения, увеличения коэффициента мощности. При этом коэффициент полезного действия электростанции увеличивается с 38 до 55%.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обоснована необходимость модернизации электроэнергетической системы Ирака на основе построения электрических станций, использующих экологически чистую солнечную энергию вследствие климатических и географических и экологических особенностей региона и имеющегося дефицита электрической энергии.

2. Предложен способ построения гибридных электрических станций с комбинированным циклом как наиболее перспективный для газоносных южных районов Ирака с высоким уровнем загрязнения воздуха. Дополнение парогазового цикла экологически чистой солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий коэффициент полезного действия (КПД) электростанции.

3. Разработана многопараметрическая модель определения оптимальной компоновки и места размещения гибридных электрических станций с комбинированным циклом на основе обработки экспертных данных.

4. Разработана модель оценки эффективности гибридной электростанции с комбинированным циклом на основе расчета её энергетических характеристик.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии исследования систем электроснабжения потребителей с использованием возобновляемых источников энергии.

Практическая значимость работы:

1. Предложенный способ построения гибридных электрических станций с комбинированным циклом является наиболее перспективным для газоносных южных районов Ирака с высоким уровнем загрязнения воздуха. Дополнение парогазового цикла солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий КПД. Например, для существующей в г. Басра газотурбинной электростанции КПД составляет 38%. Модель электростанции с комбинированным циклом ISCC-DSG показала рост КПД с 38% до 55%, т.е. на 17%. Ожидаемая годовая экономия топлива в пересчете на баррель нефтяного эквивалента составляет около 115 350 бнэ/год. Сокращение выбросов CO₂ составит около 170 672 т/год.

2. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов оптимизации, а именно генетический алгоритм, метод пути мотылька, метод империалистического конкурентного методов.

3. Разработанная модель анализа потокораспределения, устойчивости, токов короткого замыкания и оптимального размещения конденсаторных батарей для системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) в программном комплексе ETAP позволяет решать как вопросы покрытия дефицита энергии, так и устойчивости, стабилизации напряжения, увеличения коэффициента мощности.

Методы исследования.

Методологической и теоретической основой исследования послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых в области построения систем электроснабжения потребителей с использованием возобновляемых источников энергии.

В работе использовались методы математического моделирования, анализа режимов электроэнергетических систем, метод оптимизации на основе генетических алгоритмов, а также метод парных сравнений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование возможности применения гибридных электрических станций с комбинированным циклом для повышения уровня энергообеспеченности и снижения дефицита электрической энергии в Ираке.

2. Исследование применения гибридных электрических станций с комбинированным циклом как наиболее перспективный для газоносных южных районов Ирака с высоким уровнем загрязнения воздуха.

3. Создание многопараметрической модели определения оптимальной компоновки гибридной электрической станции с комбинированным циклом.

4. Оценка эффективности гибридной электростанции с комбинированным циклом на основе расчета её технико-экономических параметров.

5. Анализ режимов и балансов мощности в системе электроснабжения Южного Ирака с учетом энергетических возможностей гибридной электрической станции с комбинированным циклом.

Соответствие паспорту научной специальности.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы: п. 6. разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике; п. 13. разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

Степень достоверности, полученных результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием современных средств моделирования, расчета и анализа режимов; апробацией и верификацией разработанных моделей на основе экспериментальных данных, полученных из литературных источников.

Апробация результатов работы.

Основные результаты и положения работы обсуждались на семинарах кафедры систем электроснабжения предприятий и факультета энергетики НГТУ (2017-2020 гг.) и докладывались на следующих конференциях: Наука. Технологии. Инновации, Новосибирск, 4–8 декабря 2017 г.; X Всероссийской научно-практической конференции "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов" 22-24 апреля 2019 г.; Energy Systems Research, Иркутск, Россия, 2019 г.; XI Всероссийской научно-практической конференции "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов" 22-24 апреля 2020 г.; XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь", Барнаул, Россия, АлтГТУ, 2020 г.; 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).

Публикации.

По теме работы опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи - в изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ, 4 статьи - в научных изданиях, индексируемых SCOPUS, 4 статьи - в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов

всероссийского и международного уровня, 3 статьи - в других периодических научных изданиях.

Объем и содержание работы.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, который включает в себя 151 библиографических ссылок, 40 таблиц, 58 рисунков, 2 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 165 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе представлен анализ электропотребления и особенностей электроснабжения потребителей в Ираке, а также выполнена оценка солнечного энергетического потенциала Ирака и анализ его географических и климатических условий.

Энергетическая инфраструктура Ирака была серьезно повреждена во время войны в Персидском заливе 1991-го года, и с тех пор испытывала недостаток в финансировании и инвестициях в условиях санкций и торговой блокады. Сектор электроэнергетики пострадал снова в 2003-ем году после вторжения в страну Соединенных Штатов Америки и последующей оккупации страны. Военные действия сторон и деятельность террористических групп принесла серьезный урон всему электроэнергетическому оборудованию: генераторам, линиям электропередачи, трансформаторам. Ирак нуждается в инвестициях в электроэнергетику в условиях экономического роста и сопутствующего роста населения, так как обеспечение электроснабжения и поставка электроэнергии во все части страны необходима не только для покрытия ее расходов, но и для поддержки развития экономики.

Характеристики современного состояния электроэнергетики Ирака:

- электроэнергия доступна примерно на 14 часов в день, население вынуждено использовать дизельные генераторы;
- 57% установленной генерирующей мощности приходится на газовые турбины, 28% - на паровые, 8% - на дизельные, 7% - на гидротурбины;
- общая проектная мощность должна была составить 28680 МВт в 2017-ом году, однако максимальное производство составило 24020 МВт, включая 2 ГВт импортированной энергии;

- потеря производственных мощностей в Байджи, Мосуле во время войны;
- ежегодный рост потребности в электроэнергии составил 7%;
- максимальное потребление превышает производственную мощность почти на 50% во время летнего сезона;
- отношение максимальной пиковой нагрузки к выработанной мощности (которая составила 24 ГВт в 2017 году) стало 98%. В 2016 г. оно составляло 56%;
- запланированные 1,46 ГВт и строящиеся 10,21 ГВт электростанции добавляют 11,67 ГВт в общий объем произведенной энергии;
- контракт на импорт электроэнергии из Ирана.

Согласно Годовому отчету Министерства электроэнергетики Ирака все электростанции страны могут удовлетворить лишь 38% фактического спроса на электроэнергию. Имеющийся дефицит восполняется за счет выработки на малых и микроэлектростанциях частных производителей электроэнергии, а также в основном импортируемой электроэнергией из соседних стран, Ирана и Турции. Тем не менее, для всей территории страны характерны плановые отключения электрической энергии. Это хорошо иллюстрируется долей энергообеспеченности, определяемой как количество часов подачи электрической энергии, исходя из спроса на нее и поставляемых объемов. Для различных провинций Ирака уровень энергообеспеченности приведен на рисунке 1.

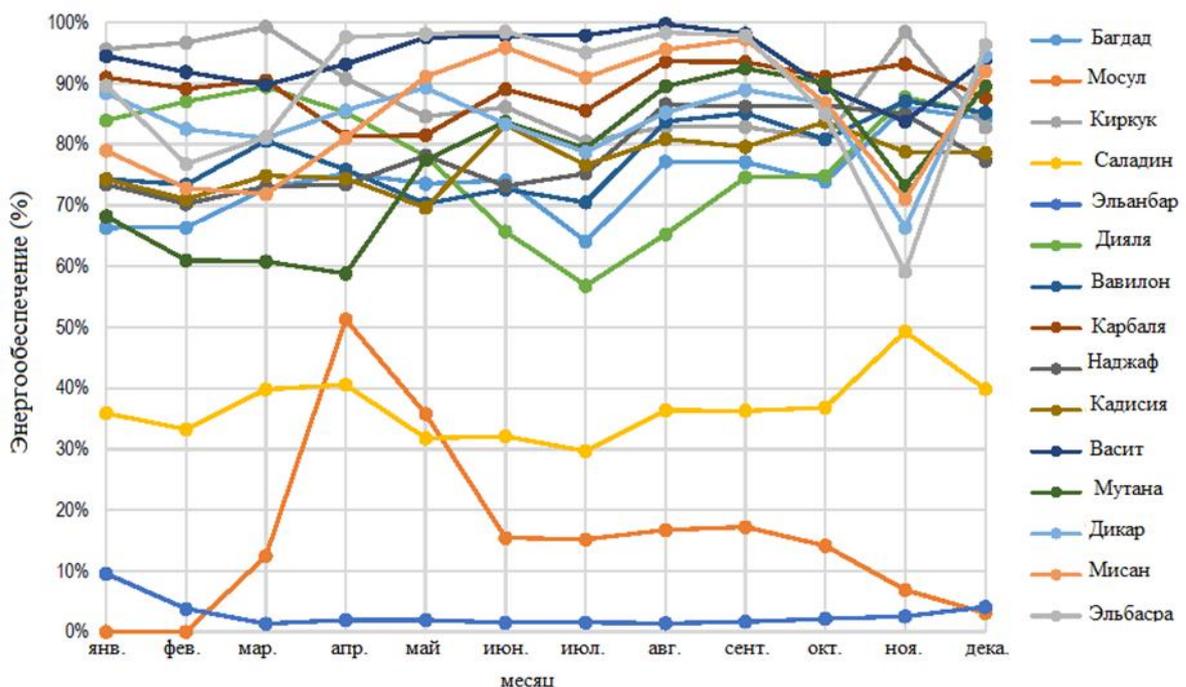


Рисунок 1 – Уровень энергообеспеченности в Ираке

Как видно на рисунке 1, уровень энергообеспеченности в северных провинциях страны ниже 50%, показано, что общая ситуация с энергообеспечением в Ираке является крайне недостаточной.

Республика Ирак расположена на юго-западе Азии и на северо-востоке от Лиги Арабских Государств. На севере Ирак граничит с Турцией, на востоке с Ираном, на западе с Сирией, Иорданией и Саудовской Аравией, на юге с Кувейтом и Саудовской Аравией. Ирак расположен между 29-37 градусами северной широты и 38-48 градусами восточной долготы, площадь страны составляет 437072 км².

Ирак имеет большой потенциал солнечной энергии: от 1800 до 2390 кВт·ч/м²/год. Среднее дневное количество солнечной радиации на всей территории Ирака составляет 6,5-7 кВт·ч/м². Имея от 2800 до 3300 часов солнечной активности в год, Ирак получает доступ к большим теоретическим запасам энергии.

Вторая глава посвящена технологиям преобразования солнечной энергии, которые на сегодняшний день достаточно хорошо изучены, что снижает риски по модернизации электростанций Ирака.

Солнечные энергетические технологии можно классифицировать по следующему типу: пассивные и активные; тепловые, фотоэлектрические и гибридные; концентрируемые и не концентрируемые.

Технология пассивной солнечной энергии просто собирает энергию без преобразования тепла или света в другие формы. Это включает в себя, например, максимальное использование дневного света или тепла посредством проектирования зданий.

В отличие от этого, технология активной солнечной энергии относится к использованию солнечной энергии для ее хранения или преобразования в другие области применения и может быть в целом разделена на три группы: фотоэлектрическая (PV); солнечная тепловая; гибридная. Гибридные технологии состоят из фотовольтаических тепловых гибридных солнечных коллекторов (PV/T) и гибридного производства электроэнергии на основе солнечного и ископаемого топлива.

В качестве ископаемого топлива для Ирака особое значение имеет природный газ. Во многих странах с подобным климатом эксплуатируются газотурбинные электростанции - CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), эффективное применение которых имеет ряд сложностей. Например, CCGT в ОАЭ, где засушливый субтропический климат с очень жарким летом и теплой зимой, испытывают большие потери, так как выходная мощность газовой турбины уменьшается с повышением температуры окружающей среды. Для повышения мощности газотурбинной установки (ГТУ) в теплый и жаркий

период года используют впрыск воды в воздухозаборник турбины.

Интеграция солнечной энергетики с природным газом (конкретнее с CCGT) в комбинированных схемах ISCCS является наиболее перспективной альтернативой обычным солнечным тепловым установкам, так и возможным способом повышения эффективности существующих ГТУ.

Опытная солнечная электростанция комбинированного цикла – ISCCS была построена Luz Solar International в 1990 году. С накоплением опыта эксплуатации в 2000 году Global Environment Facility выделило гранты на строительство систем ISCCS в Мексике, Марокко, Индии и Египте. В настоящее время количество электростанций ISCCS с каждым годом растет. Алжир успешно реализовал ISCCS 150 МВт с CSP (Concentrated Solar Power) 20 МВт; в Иране ISCCS 64 МВт с CSP 17 МВт соответственно.

Заслуживает внимания переход с PTC (Parabolic Trough Collector) на централизованную приемную систему - CRS (Central Receiver System) с комбинированным циклом – CC (Combined Cycle). Новая конфигурация объемного приемника солнечной башни CRS позволяет парогенератору рекуперации тепла - HRSG (Heat Recovery Steam Generator) эффективнее работать в режиме нагрева, что значительно повышает КПД электростанции.

Для примера, каждый квадратный метр зеркал позволит избежать 405 т выбросов CO₂ в атмосферу, что эквивалентно отказу от работы 16 473 автомобилей. Поскольку Ирак подписал Соглашение об изменении климата (Париж, 2015г.), страна может торговать этим углеродным кредитом с другими промышленно развитыми странами. На примере электростанции в Эль-Анбар для рассматриваемой солнечной генерации 50 МВт, потенциальный объем торговли углеродным кредитом выброса CO₂ по цене 40 \$/т, позволит сократить срок окупаемости строительства гибридной электростанции на 3 241 200 \$/год.

Таким образом, внедрение в тепло-электрическую схему существующих электростанций устройств преобразования солнечной энергии позволит существенно снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии, увеличить объем генерируемой мощности, оперативно решить вопросы дефицита энергии, и, как следствие увеличить объем прибыли, что так важно для восстановления экономики Ирака.

По данным ряда исследований в этой области и анализа данных, этот тип станции считается одним из лучших видов, которые могут быть использованы в Ираке и на Ближнем Востоке из-за погодных условий, от жарки и сухой погоде, то есть в условиях пустыни.

В третьей главе с использованием полученных в главе 1 результатов по анализу солнечного энергетического потенциала регионов Ирака разработана

математическая модель определения оптимального места размещения гибридной электрической станции с комбинированным циклом.

Современная практика показывает, что основные трудности при выборе и принятии решений обусловлены прежде всего недостаточно высоким качеством и неполнотой информации, имеющейся в распоряжении управляющих органов власти. В работе выделены пять факторов, которые известны и могут повлиять на реализацию решения в будущем, но предсказать их точно невозможно: среднегодовой уровень солнечной радиации, среднегодовой световой день, электропотребление, суммарная мощность существующих газовых станций, свободная доступная площадь для размещения солнечных коллекторов.

В табл. 1 приведены нормированные характеристики провинций Ирака.

Таблица 1 – Характеристики провинций Ирака. Нормированные значения

Провинция	Свободная площадь, о.е.	Электропотребление, о.е.	Средне-годовая солнечная радиация, о.е.	Мощность газовых станций, о.е.	Средне-годовой световой день, о.е.
Эльанбар	0,3261	0,0275	0,0669	0,0179	0,0620
Вавилон	0,0107	0,0412	0,0581	0,0158	0,0620
Эльбасра	0,0478	0,1779	0,0616	0,2686	0,0682
Дикар	0,0307	0,0630	0,0625	0,0358	0,0663
Кадисия	0,0200	0,0327	0,0625	0,0358	0,0644
Дияля	0,0433	0,0363	0,0552	0,0530	0,0607
Карбаля	0,0110	0,0446	0,0654	0,0179	0,0651
Киркук	0,0192	0,0426	0,0538	0,0841	0,0527
Мисан	0,0401	0,0376	0,0596	0,0444	0,0663
Мутана	0,1350	0,0256	0,0669	0,0358	0,0682
Наджаф	0,0722	0,0427	0,0663	0,0587	0,0644
Мосул	0,0815	0,0448	0,0523	0,0000	0,0508
Васит	0,0388	0,0444	0,0552	0,0090	0,0657
Саладин	0,0527	0,0293	0,0552	0,0726	0,0533
Сулеймания	0,0281	0,1395	0,0523	0,1074	0,0434
Эрбил	0,0294	0,1078	0,0523	0,1074	0,0434
Доход	0,0134	0,0628	0,0538	0,0358	0,0434
Итого	1	1	1	1	1

Для поиска оптимального места размещения гибридной станции с комбинированным циклом с учетом рассмотренных показателей предложена следующая многопараметрическая математическая модель:

$$\text{Рейтинг} = S_{av} * C_w^S + I_{av} * C_w^I + L_{city} * C_w^L + S_{gas} * C_w^S + A_{free} * C_w^A, \quad (1)$$

где S_{av} – среднегодовой световой день, о.е.; C_w^s – весовой коэффициент для среднегодового светового дня, о.е.; I_{av} – среднегодовая солнечная радиация, о.е.; C_w^I – весовой коэффициент для среднегодовой солнечной радиации, о.е.; L_{city} – электропотребление, о.е.; C_w^L – весовой коэффициент для электропотребления, о.е.; S_{gas} – суммарная мощность существующих газовых станций, о.е.; C_w^s – весовой коэффициент для суммарной мощности существующих газовых станций, о.е.; A_{free} – свободная площадь, о.е.; C_w^A – весовой коэффициент для свободной площади, о.е.

Весовые коэффициенты математической модели (1) определяются на основе экспертизы. Для обработки экспертной информации в работе предложено использовать метод парных сравнений.

На основе этого метода получены весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого фактора. Для экспертизы привлечены эксперты из Ирака (Northern technical university, Baghdad university, Wassit university, Anbar university) и России (ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»). Экспертам было предложено заполнить анкету методом выставления оценок. Анкетирование выполнено с помощью Google Forms.

Программное обеспечение Google Forms связано с другим онлайн-сервисом – Google Sheets. Это сделано для повышения удобства работы с полученной информацией. Результаты анкет, полученные от экспертов, автоматически заносятся в таблицу и отправляются интервьюеру для последующей обработки. Результаты сравнения заносятся в матрицу парных сравнений. Полученные матрицы парных сравнений в результате анкетирования приведены на рисунке 2, где A_1 – A_5 – это среднегодовой световой день, среднегодовая солнечная радиация, электропотребление, мощность существующих газовых электростанций, свободная площадь для размещения солнечной электростанции соответственно.

Результаты парных сравнений

Продолжить

Эксперт 1						Эксперт 4					
	A1	A2	A3	A4	A5		A1	A2	A3	A4	A5
A1						A1					
A2	0.5					A2	0.5				
A3	0	0				A3	0	0			
A4	0	0	0.5			A4	0	0	0.5		
A5	0	0	0.5	0.5		A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 2						Эксперт 5					
	A1	A2	A3	A4	A5		A1	A2	A3	A4	A5
A1						A1		0	1	1	1
A2	0.5					A2	1		1	1	1
A3	0	0				A3	0	0		0.5	1
A4	0	0	0.5			A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5		A5	0	0	0	0.5	

Эксперт 3						Эксперт 6					
	A1	A2	A3	A4	A5		A1	A2	A3	A4	A5
A1						A1		0.5	1	1	1
A2	0.5					A2	0.5		1	1	1
A3	0	0				A3	0	0		0.5	0
A4	0	0	0.5			A4	0	0	0.5		0
A5	0	0	0.5	0.5		A5	0	0	0	0	

Рисунок 2 – Результаты парных сравнений

Обработка результатов парных сравнений, а также последующая оценка согласованности мнений экспертов (расчет коэффициентов согласованности и конкордации) выполнены в среде Matlab.

Результаты расчета

	A1	A2	A3	A4	A5
M	2.9167	3.1667	1.5000	1.5000	0.9167
D	0.1417	0.3667	0.2000	0.2000	0.0417
Sigma	0.3764	0.6055	0.4472	0.4472	0.2041
Mu	0.8710	0.8088	0.7019	0.7019	0.7773

Суммарный ранг R

	A1	A2	A3	A4	A5
1	17.50	19	9	9	5.50

Средняя сумма рангов: 12

Отклонение от средней суммы

	A1	A2	A3	A4	A5
1	5.50	7	-3	-3	-6.50

Сумма квадратов отклонений: 139.5

Коэффициент конкордации: 0.3875

$\chi^2_{набл}$: 9.3

Весовые коэффициенты

	A1	A2	A3	A4	A5
1	0.29	0.32	0.15	0.15	0.09

Рисунок 3 – Оценка согласованности мнений экспертов

Как видно на рисунке 3, коэффициент согласованности всех факторов не меньше общепринятого граничного значения (0,7-0,8), что соответствует согласованному мнению экспертов по всем факторам.

Тогда выражение для итогового рейтинга с учетом значимости каждого рассматриваемого фактора окончательно примет следующий вид

$$\text{Рейтинг} = 0,29S_{av} + 0,32I_{av} + 0,15L_{city} + 0,15S_{gas} + 0,09A_{free} \quad (2)$$

С использованием математической модели (2) был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения гибридных станций с комбинированным циклом, как по отдельным факторам, так и по итоговому рейтингу. Итоговый рейтинг провинций Ирака проведен на рисунке 4.

Большой уровень электропотребления региона и более развитая инфраструктура наряду с относительно равномерным уровнем солнечной радиации по всем регионам Ирака предопределили наибольший итоговый рейтинг Эльбасра среди всех провинций Ирака как оптимального региона для размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом.

Таким образом, окончательно в ходе анализа полученных результатов был выбран тип станции ISCCS и г. Басра как имеющий максимальный итоговый рейтинг среди всех городов и провинций Ирака.

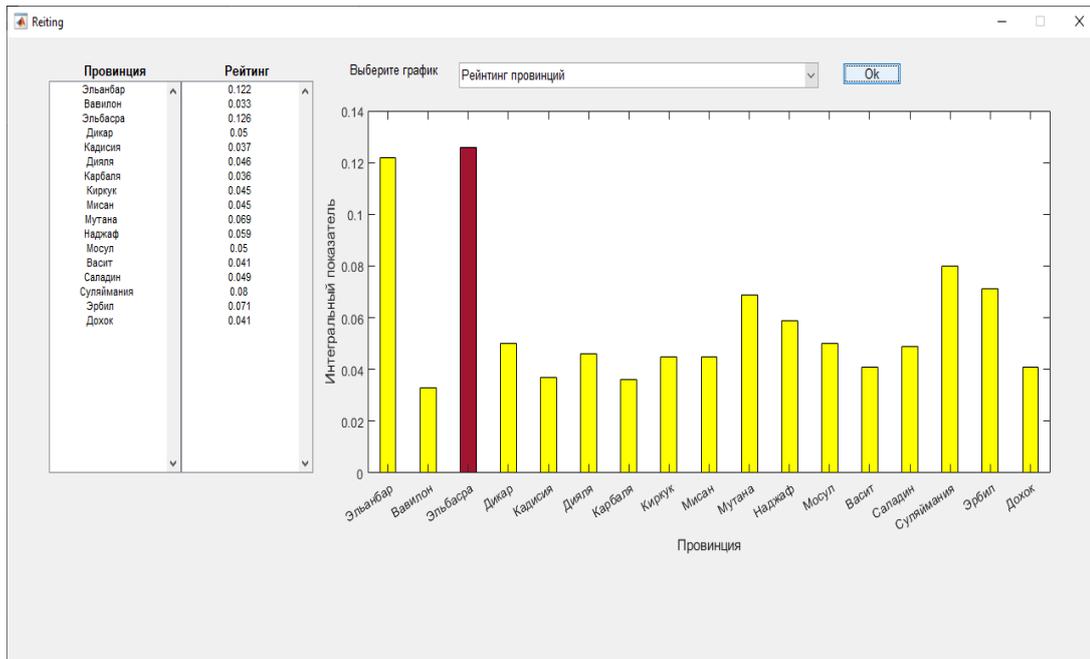


Рисунок 4 – Итоговый рейтинг провинций Ирака

С учетом исследований, приведенных в главе 3, в качестве прототипа принята 200 МВт ГТУ г. Басра. Схема дополнена двумя паровыми турбинами (ПТУ) мощностью 75 МВт (с высоким давлением - STHP) и 65 МВт (с низким давлением – STLP). Схема и параметры электростанции приведены на рисунке 5 и в табл. 2.

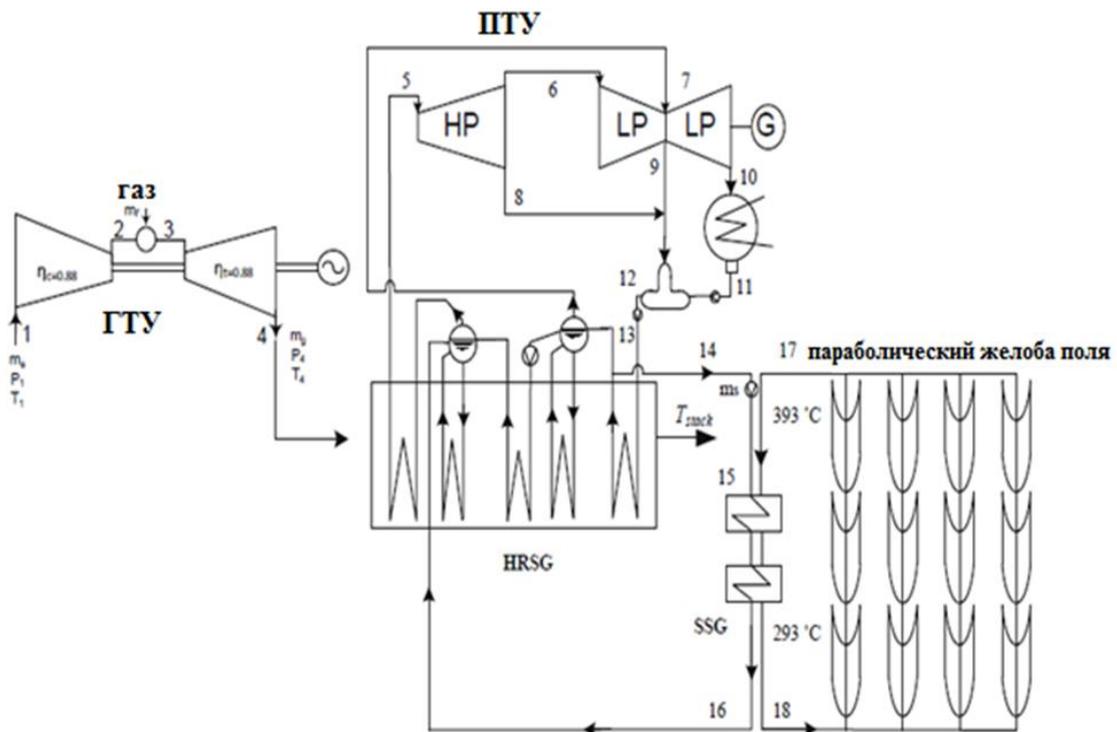


Рисунок 5 – Схема включения солнечных коллекторов в парогазовый цикл электростанции и пример ГТУ с полем солнечных коллекторов

Таблица 2 – Основные параметры солнечной части гибридной электростанции

Параметр	Единица	Водяное охлаждение без накопителя
Прямая нормальная инсоляция (расчетное значение)	Вт/м ²	660
Площадь поля солнечных коллекторов	га	102,5
Время работы накопителя	часов	нет
Емкость накопителя	МВтч	нет
Номинальный КПД энергоустановки	%	37,6
Общая занимаемая площадь	км ²	3,5

Для города Басра выполнена климатическая выборка для марта, июня, сентября и декабря. На рисунке 6а представлена прямая нормальная инсоляция (DNI), которая, как видно, была наиболее высокой в полдень в июне (более 800 Вт/м²) и наименьшей в декабре (около 400 Вт/м²), и результат интегрального энергетического анализа предлагаемых установок (рисунок 6б).

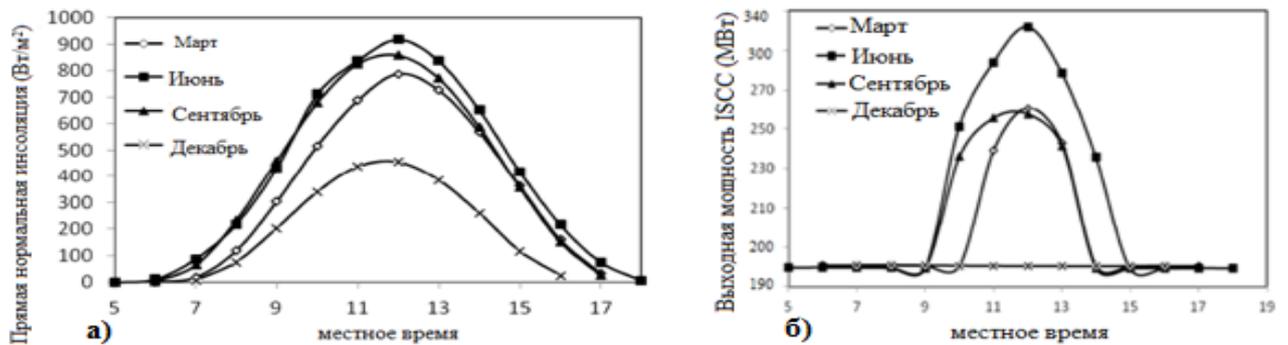


Рисунок 6 – Исходные данные и результаты энергетического анализа гибридной электростанции: а) - Прямая нормальная инсоляция, б) - Выработка мощности гибридной электростанции ISCCS

Пик вырабатываемой мощности приходится на период с 9 до 15 часов, что совпадает с пиком потребления. Как видно на рисунке 6б, наброс мощности ISCCS отсутствует в декабре из-за низкой интенсивности солнечной инсоляции. Расчеты показывают, что ISCCS может вырабатывать до 330 МВт в июне, что приведет к улучшению КПД комбинированного цикла от 38 до 55%, как показано на рисунке 7.

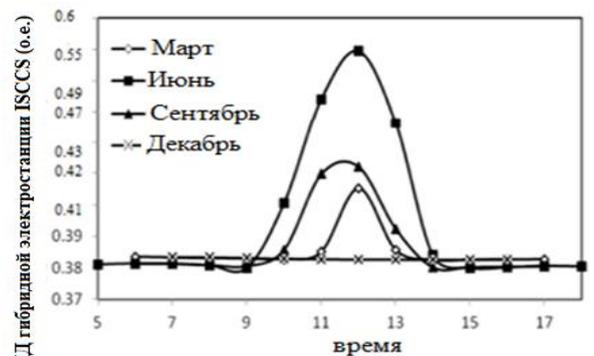


Рисунок 7 – КПД электростанции ISCCS

В табл. 3 приведены укрупненные составляющие затрат на сооружение гибридной электростанции с комбинированным циклом мощностью 140 МВт в г. Басра.

Таблица 3 – Составляющие затрат на сооружение гибридной электростанции с комбинированным циклом мощностью 140 МВт в г. Басра (в млн. \$)

Составляющие затрат	Водяное охлаждение без накопителя	Воздушное охлаждение без накопителя	Воздушное охлаждение с накопителем
Прямые затраты			
Проектные работы	26,8	28	48,16
Поле солнечных коллекторов	56,56	61,88	99,12
Система теплоносителя	35,28	38,36	61,32
Накопитель	-	-	125,16
Энергоблок	28	41,72	41,72
Непредвиденные расходы	10,36	11,76	26,32
Косвенные затраты			
Инженерные работы и строительство	43,44	39,76	88,48
Земельный участок	18,76	19,88	34,16
Налоги, деградация системы и преимуществ	32,48	37,52	83,16
Итого:	251,76	269,92	607,6

Первая модель (водяное охлаждение без накопителя) была выбрана потому, что расположение города Басра на Персидском заливе означает обилие охлаждающей воды. При этом данная модель, как было показано ранее, менее затратная и более эффективная. Кроме того, дополнительно может использоваться для опреснения морской воды.

Для укрупненной оценки периода окупаемости были установлены и использованы следующие параметры:

- число часов работы солнечных коллекторов в течение года в городе Басра составляют от 3600-4000 часов в год (T_{\max});
- стоимость эксплуатации солнечного комплекса в Ираке составляет около 10 \$/кВт в год ($U_{\text{экспл}}$);
- стоимость электроэнергии в промышленной части города самая дорогая и составляет около 0,35 \$/кВтч ($C_{\text{эн}}$);
- средняя ожидаемая мощность солнечного комплекса (с учетом зимнего и летнего периодов) составляет около 110 МВт ($P_{\text{эл/ст}}$).

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{вл}} + U_{\text{экс}}}{K_{\text{срг}}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{вл}}$ - капитальные вложения в строительство электростанции, млн. \$; $K_{\text{срг}}$ – среднегодовые поступления денежных средств от продажи электроэнергии, млн.\$; $U_{\text{экс}}$ – среднегодовая стоимость эксплуатации электростанции, \$/кВт.

В результате расчетов получаем, что электрическая энергия, которая может быть произведена в течение года с помощью солнечного комплекса при 3800 часах работы, составляет 418000000 кВтч, что составит при ее продаже по указанной стоимости порядка 146,300 млн.\$ в год. Как упоминалось ранее в табл.3, стоимость строительства предлагаемой электростанции составляет около 251,76 млн.\$, а стоимость эксплуатации - около 1,4 млн.\$. В итоге получаем простой срок окупаемости около двух лет.

В четвертой главе выполнен анализ потокораспределения, балансов активной мощности, напряжений и токов короткого замыкания, которые требуются для стабильной и надежной работы электроэнергетической системы. Этот анализ дает информацию, которая может потребоваться для дальнейшего её развития и повышения эффективности.

Наиболее часто используются итерационные методы при решении задачи потокораспределения энергии: Ньютон-Рафсон, Гаусса Зайделя и др. В связи с быстрой сходимостью и меньшим количеством итераций метод Ньютона-Рафсона является по сравнению с другими методами более эффективным.

Объектом исследования является система электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) с предлагаемой гибридной электростанцией с комбинированным циклом на 340 МВт с четырьмя газотурбинными и двумя паротурбинными установками. Четыре газотурбинных генератора мощностью 50 МВт каждый и два паротурбинных генератора мощностью 65 МВт и 75 МВт подключены к изолированным шинам Khur Zubair. Каждый генератор подключен к центральной шине с помощью повышающего трансформатора и вырабатывает энергию на напряжении 20 кВ, затем преобразует в 132 кВ, чтобы отправить полученную мощность в общенациональную электрическую сеть Ирака.

Два вспомогательных трансформатора с 3-мя обмотками и мощностью 250 МВА используются для понижения напряжения с 400 кВ до 132 кВ общенациональной сети и до 11 кВ для использования собственных нужд электростанции, а также для питания небольших жилых районов. Подстанция Khur Zubair питает 8 основных нагрузок (сталелитейный завод - 22 МВт, Alfao - 21,6 МВт, Bab Zubair - 20,5 МВт, месторождение Rumaila - 80 МВт, город Um qaser и порт - 220 МВт, месторождение Zubair - 45 МВт, порт Albaker - 20 МВт, центр города - 110 МВт). Большая часть электроэнергии потребляется на

нефтяных месторождениях, фабриках и в портах, так как дефицит покрывается за счет общенациональной сети. Модель данной системы разработана в ЕТАР.

В таблицах 4-5 приведены данные по балансу активной мощности для летнего сезона с максимальным электропотреблением и зимнего сезона с минимальным электропотреблением до модернизации и после модернизации системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) соответственно.

Таблица 4 – Баланс активной мощности до модернизации в летний сезон

Сезон	Приход, МВт		Расход, МВт	
	Лето	Из сети 400 кВ	250,05	Нагрузка
Из сети 132 кВ		50	Потери мощности	22,4
ГТУ		188		
Итого		488,05		488,05

Таблица 5 – Баланс активной мощности после модернизации в летний сезон

Сезон	Приход, МВт		Расход, МВт	
	Лето	Из сети 400 кВ	123,42	Нагрузка
Из сети 132 кВ		50	Потери мощности	21,80
ГТУ		188		
ПТУ		130		
Итого		491,42		491,42

Как видно, необходимая потребность в мощности из общенациональной сети 400 кВ до модернизации летом составляет 250048 МВт, что является максимальной мощностью, потребляемой в течение года, и эта мощность уменьшается вдвое после модернизации, около 123424 МВт. Кроме того, можно отметить, что зависимость региона перетоков мощности из общенациональной сети 400 кВ всегда имеет максимальные величины в летний сезон из-за интенсивного использования электроэнергии.

При текущем уровне нагрузок и потокораспределении в системе электроснабжения наблюдается пониженное напряжение, для улучшения уровня которого используются устройства РПН трансформаторов. Но так как их диапазона регулирования недостаточно, напряжение на некоторых шинах остаётся ниже 90%. Чтобы улучшить его, в дальнейшем используется модуль оптимального размещения конденсаторных батарей программного комплекса ЕТАР. В соответствии с этим целевая функция, минимизирующая суммарные затраты, представлена следующим образом:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} (x_i C_{0i} + Q_{ci} C_{1i} + B_i C_{2i} T) + C_2 \sum_{i=1}^{N_{load}} T_{\ell} P_L^l, \quad (4)$$

где N_{bus} - число шин; x_i - 0/1, 0 означает, что на шине i размещена конденсаторная батарея; C_{0i} - стоимость установки конденсаторной батареи; C_{1i} – удельная стоимость конденсаторной батареи; C_{2i} - эксплуатационные расходы; V_i - количество конденсаторных батарей; Q_{ci} – мощность конденсаторной батареи; T - период планирования; C_2 - стоимость потерь электроэнергии ; ℓ – степень графика нагрузки; T_ℓ - продолжительность степени нагрузки ℓ ; P_L^ℓ - суммарные потери мощности для степени графика нагрузки L .

В настоящее время существует много методов для определения оптимального размещения конденсаторных батарей. Все методы используются для снижения суммарных потерь мощности, повышения уровня напряжения и коэффициента мощности, минимизации затрат и максимизации чистой экономии. Тем не менее, между этими методами есть различия. Точность и эффективность результатов, простота работы и скорость являются критериями выбора оптимального метода.

В работе предлагаются и сравниваются три метода: генетический алгоритм (ГА), империалистический конкурентный алгоритм (ИКА), оптимизация пути мотылька (ОПМ). Эти методы в целом основаны на явлениях природы. Наиболее известными являются генетические алгоритмы, которые моделируют процесс эволюции в природе. Расчеты выполнены с помощью программного обеспечения ETAP, OpenDSS, Matlab для трех вышеизложенных методов оптимизации. В таблице 6 приведены полученные результаты и их сравнение.

Таблица 6 – Сравнение полученных результатов

Название	Исходный режим	ГА	ИКА	ОПМ
Суммарные потери (МВт)	21,4	14,2	15,8	15,4
Сокращение потерь (%)	-	35,4	30,3	31,6
Суммарная мощность конденсаторных батарей (кВАр)	-	28000	33500	33000
Экономия (%)	-	35,6	32,1	30,9
Коэффициент мощности (%)	80	92	9	91,4%
Среднее напряжение (о.е.)	0,88	1,023	1,019	1,019
Отклонение напряжения (о.е.)	0,06	0,013	0,014	0,014

Как видно из табл. 6, предложенные эвристические алгоритмы являются эффективными методами оптимизации режима системы электроснабжения по реактивной мощности. Из полученных результатов и их сравнения рекомендуется использовать метод ГА, благодаря скорости работы и точности получаемой информации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ актуального состояния электроэнергетической системы Ирака. Показано, что в настоящее время, в 2021 году, Ирак по-прежнему страдает от острой нехватки электроэнергии для населения и промышленности. Отмечается, что 90% заводов и муниципальных зданий все еще не работают. Спрос на электроэнергию в Ираке в 2007 году составлял 11000 МВт, в 2013 году – 16 000 МВт и летом 2018 года – 24 500 МВт. Ожидается, что этот спрос увеличится до более 30000 МВт в 2022 году. Суммарные потери электроэнергии при передаче и распределении составляют около 40-50% системных потерь в Ираке.

2. Обоснована необходимость модернизации электроэнергетической системы Ирака на основе построения электрических станций, использующих экологически чистую солнечную энергию вследствие климатических и географических особенностей региона и имеющегося дефицита электрической энергии. Ежедневно в Ираке сжигают 800000 баррелей топлива в день для производства электроэнергии самыми примитивными, опасными для окружающей среды методами, загрязняющими её вредными веществами. Объем инвестиций, необходимых для использования солнечной энергии, оценивается в \$300/кВт, что в дальнейшем сократится до \$70/кВт в год.

3. Предложен способ построения гибридных электрических станций с комбинированным циклом как наиболее перспективный для газоносных южных районов Ирака. Показано, что дополнение парогазового цикла солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий коэффициент полезного действия электростанции. КПД существующей в Басра газотурбинной электростанции составляет $\approx 38\%$. Предложенная модель гибридной электростанции с комбинированным циклом показала рост КПД с 38% до 55%.

4. Разработана многопараметрическая модель определения оптимального места размещения гибридных электрических станций с комбинированным циклом на основе обработки экспертных данных. Обработка результатов парных сравнений, а также последующая оценка согласованности мнений экспертов (расчет коэффициентов согласованности и конкордации) выполнены в среде Matlab. В ходе анализа полученных результатов был выбран тип гибридной электростанции с комбинированным циклом в г. Басра как

имеющий максимальный итоговый рейтинг среди всех городов и провинций Ирака.

5. Разработана методика оценки эффективности гибридной электростанции с комбинированном циклом на основе расчета её энергетических характеристик. В качестве прототипа принята газовая электростанция г. Басра мощностью 200 МВт. Для рассмотренной электростанции предлагается модернизации путем добавления комбинированного цикла. Схема дополнена двумя паровыми турбинами мощностью 75 МВт, 65 МВт.

6. Выполнен анализа потокораспределения и устойчивости с использованием программного комплекса ЕТАР для объекта исследования - фрагмента системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) с предложенной гибридной электростанцией с комбинированным циклом.

7. Показано, что предложенные эвристические алгоритмы являются эффективными методами оптимизации режима системы электроснабжения по реактивной мощности. В работе предлагаются и сравниваются три метода: генетический алгоритм, империалистический конкурентный алгоритм, оптимизация пути мотылька.

8. Показано, что основными преимуществами предложенной схемы гибридной электростанции с комбинированным циклом ISCCS являются экономия топлива, снижение спроса на электроэнергию в пиковый период, а также сокращение выбросов углерода. Ожидаемая годовая экономия топлива в пересчете на баррель нефтяного эквивалента составляет около 115 350 бнэ/год; сокращение выбросов углерода CO₂ составит около 170 672 т/год.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ:

1. **Абасс А.З.**, Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., Лесс В.М. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций Ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020; 22(2): 98-107.

2. **Абасс А.З.**, Павлюченко Д.А., И.В. Кобобель, Перспективы использования солнечной энергии в Ираке, Вестник Казанского Государственного Энергического Университета, №1, 2020 (45); С. 63-70.

3. **Абасс А.З.** Анализ потокораспределения и устойчивости для электрической системы с электростанцией с комбинированным циклом в Южном Ираке с использованием ЕТАР / А. З. Абасс, Д. А. Павлюченко, А. В. Прокопов, З. С. Хуссейн // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(1). С. 5-16. DOI: 10.17516/1999-494X-0285.

4. **Ахмед З.А.**, Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021; 23(1): 18-32.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

5. **Ahmed Z.A.**, Pavlyuchenko D.A. “The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy”, International Journal of Electrical and Computer Engineering 9(6), 2019, p. 4617-4624.

6. **Abass Ahmed. Z.**, Pavlyuchenko D.A “Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle”, E3S Web of Conferences 114, 05008 (2019). Energy Systems Research 2019.

7. **Abass A.Z.**, Pavlyuchenko D.A “Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land” E3S Web of Conferences 114, 05009 (2019). Energy Systems Research 2019. [<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405009>].

8. **Abass A. Z.**, Pavlyuchenko D.A., Zozan Saadallah Hussain, “Methods comparison for optimal capacitor placement in distribution system,” 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 6-9, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271381.

Публикации в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов всероссийского и международного уровня:

9. **Abass A. Z.**, Pavlyuchenko.D.A, “Eliminate the electricity shortage in Iraq by using PV/T panels and hybrid solar stations” X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов", Томский политехнический университет, 22-24 апреля 2020 г, Томск, Россия, С. 513- 523.

10. **Abass A.Z.**, Pavlyuchenko D.A, “Анализ потокораспределения, устойчивости напряжения и токов короткого замыкания для электростанции с комбинированным циклом мощностью 1240 МВт разработана в программе ETAP” X Всероссийская научно-практическая конференция "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов", Томский политехнический университет, 22-24 апреля 2020 г, Томск, Россия, с. 51-60.

11. **Abass Ahmed Z.**, Pavlyuchenko D.A, Zozan Saadallah Hussain,” Optimal capacitor placement for resolving under voltage problem in industrial region by using ETAP”, XVII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь", Барнаул, Россия, АлтГТУ, 01-05 июня 2020 года, с. 69-72.

12. **Абасс А.З.** Исследование производства электроэнергии при помощи гибридных фотоэлектрических / тепловых систем на примере Ирака / А. Абасс; науч. рук. Д. А. Павлюченко // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2017. Ч. 4. – С. 3-6.

Публикации в других периодических научных изданиях:

13. **Abass Ahmed Z.**, Pavlyuchenko D.A., “Analysis of a gas station hybridization with a solar thermal plant by using ETAP”, International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE), Vol. 10, No. 2, June 2021, pp. 118~126, DOI: 10.11591/ijape.v10.i2.pp118-126.

14. **Abass Ahmed Z.**, Pavlyuchenko D.A., “The Use of Floating Solar Panels in Hot Regions Such As Iraq to Benefit in Cooling the Panels and Increasing Their Efficiency,” International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 8, no. 10, pp. 1-5, Oct. 2020, doi:10.17762/ijritcc.v8i10.5446.

15. **Abass Ahmed Zkear**, Pavlyuchenko D.A, Zozan Saadallah Hussain, “Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP,” Journal of Robotics and Control (JRC), vol 2, no 3, May 2021.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 00552. Подписано в печать 06.12.2021 г.