

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент  
Дмитрий Анатольевич Павлюченко

Новосибирск - 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ОЦЕНКА СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИРАКА</b> .....	11
1.1 Особенности электроэнергетики Ирака.....	11
1.2 Производство электроэнергии в Ираке.....	14
1.3 Передача и распределение электроэнергии в Ираке.....	18
1.4 Анализ режимов электропотребления и дефицита электроэнергии в Ираке.....	19
1.5 Анализ географических и климатических условий Ирака.....	27
1.6 Оценка энергетических ресурсов возобновляемых источников энергии в Ираке.....	31
1.7 Определение солнечного энергетического потенциала различных регионов Ирака.....	33
1.8 Определение перспективных районов размещения солнечных энергетических установок.....	36
Выводы по главе 1.....	37
<b>ГЛАВА 2 ОБЗОР СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	39
2.1 Анализ технических и экономических параметров компонентов солнечной энергетической системы.....	39
2.2 Гибридная технология.....	42
2.2.1 Фотовольтаические тепловые гибридные солнечные коллекторы .....	42
2.2.2 Гибридное производство электроэнергии на основе солнечного и ископаемого топлива .....	45
2.3 Гибридные электростанции с комбинированным циклом (ISCCS)...	46
Выводы по главе 2 .....	52
<b>ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ</b> .....	54
3.1 Перспективы использования солнечной энергии в Ираке.....	54
3.2 Разработка математической модели определения оптимального места размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом.....	56
3.3 Разработка математической модели оценки эффективности гибридной электростанции с комбинированным циклом.....	71

3.4 Анализ результатов моделирования.....	77
3.5 Оценка экономической и экологической эффективности предлагаемых мероприятий.....	83
Выводы по главе 3.....	94
<b>ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЮЖНОГО ИРАКА С ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ .....</b>	<b>96</b>
4.1 Постановка задачи .....	96
4.2 Характеристика объекта исследования .....	97
4.3 Моделирование исходного режима.....	101
4.4 Моделирование режима с гибридной электростанцией с комбинированным циклом .....	107
4.5 Анализ балансов активной мощности.....	120
4.6 Оптимизация режима системы электроснабжения по реактивной мощности с гибридной электростанцией с комбинированным циклом .....	122
4.7 Сравнительный анализ методов оптимизации режима по реактивной мощности .....	127
Выводы по главе 4.....	137
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>142</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А анкета проведения экспертизы.....</b>	<b>158</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б акты внедрения научных результатов диссертации.....</b>	<b>163</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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. Спрос на электроэнергию увеличился 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, Giotri 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 CO<sub>2</sub> 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 потокораспределения и устойчивости 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 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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ОЦЕНКА СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИРАКА

## 1.1 Особенности электроэнергетики Ирака

Энергетическая инфраструктура Ирака была серьезно повреждена во время войны в Персидском заливе 1991-го года, и с тех пор испытывала недостаток в финансировании, инвестициях и оснащении для электростанций в условиях санкций и торговой блокады. Сектор энергоснабжения пострадал снова в 2003-ем году после вторжения в страну Соединенных Штатов и последующей оккупации страны. Военные действия сторон и деятельность террористических групп принесла серьезный урон системам электроснабжения: генераторам, линиям передачи, трансформаторам.

Ирак нуждается в инвестициях в сектор электроснабжения 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. В соответствии с докладом Министерства электроэнергетики Ирака пиковая необходимость в электроэнергии в 2008 году составила 12000 МВт, в то время как все работающие электростанции смогли обеспечить лишь 6000 МВт. Если разрыв между спросом и потреблением продолжит расти, то к 2020-ому году спрос должен составить 28000 МВт [1-3]. Стоит отметить, что энергия, полученная из возобновляемых источников, составляет незначительную долю от общего количества произведенной электроэнергии, если не брать в расчет энергию, полученную от ГЭС.

- Электроэнергия из общей сети доступна примерно на 14 часов в день, люди вынуждены 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 летних сезонов.
- Отношение максимальной пиковой нагрузки к выработанной мощности (которая составила 24 ГВт в 2017 году) стало 98%. (В 2016 оно составляло 56%).
- Запланированные (1,46 ГВт) и строящиеся (10,21 ГВт) электростанции добавят 11,67 ГВт в общий объем произведенной энергии.
- Контракт на импорт электроэнергии из Ирана составил ~1000-2250 МВт, несмотря на задержки выплат со стороны Ирака и растущую внутреннюю потребность в электроэнергии Ирана.
- Подписан договор с Кувейтом о поставке 200 МВт [4].

Таблица 1.1 - Потребление мощности городами Ирака и тип нагрузки в 2009 г.

Город	Жилые МВт	Коммерческие МВт	Общественные МВт	Промышленные МВт	Сельскохозяйственные МВт	Нелегальные МВт	Итог МВт
Багдад	708,470	224,702	6,524	2,677	3,866	28,090	974,329
Мосул	289,421	45,757	4,187	1,525	2,508	11,439	354,837
Киркук	114,061	18,758	1,402	0,352	3,106	7,449	145,128
Саладин	126,061	15,786	1,596	0,494	10,549	4,167	158,653
Вавилон	187,656	20,639	1,935	0,625	5,031	5,087	220,973
Карбала	103,261	10,229	1	0,441	0,930	5,318	121,131
Эльнаджаф	127,190	14,796	1,563	0,954	6,367	7,531	158,401
Кадисия	105,744	12,375	1,426	0,615	4,752	3,017	127,929
Эльанбар	131,705	19,766	2,425	1,179	6,547	5,254	166,876
Дияла	133,212	14,309	1,568	0,472	2,023	13,343	164,927
Васит	96,368	13,773	1,738	0,534	4,799	10,358	127,570
Эль басра	195,352	29,126	2,314	1,111	1,979	6,059	235,941
Дыкар	136,141	15,172	1,769	0,655	0,652	0,497	154,886
Майсан	70,037	8,193	1,261	0,336	1,723	1,511	83,061
Мутана	66,576	7,627	1,304	0,315	3,647	0,895	80,364
Духок	132,354	17,184	1,940	0,236	0,199	0	151,913
Эрбил	188,468	18,043	2,203	1,090	1,265	0	211,069
Сулаймания	261,350	32,073	3,263	2,776	0,822	0	300,284
Итог	3173,427	538,308	39,370	16,387	60,765	110,015	3938,272
Процент %	80,58%	13,67%	1,00%	0,42%	1,54%	2,79%	100,00%

## 1.2 Производство электроэнергии в Ираке

В состав Министерства входят шесть географически разбросанных общих управлений по производству электроэнергии, а именно: Васат (Центральный), Фурат аль-Авсат (Центральный Евфрат), Аль-Шимал (Север), Салах-эд-Дин, Насирия и Басра.

Общая установленная генерирующая мощность для шести управлений составляет более 16 800 МВт (2012 г.), 478 генерирующих блоков в диапазоне от 1,7 до 300 МВт на единицу.

Данные энергоблоки входят в состав восьми гидростанций общей мощностью чуть более 2500 МВт, восьми тепловых станций суммарной мощностью около 5500 МВт, 28 газотурбинных станций суммарной мощностью около 8700 МВт и 15 дизельных моторных станций общей мощностью около 1600 МВт и более 100 малых дизель-генераторов, рассчитанных на пиковые нагрузки.

Страна также импортирует около 2000 МВт (2017 г.) из соседних стран, в основном из Турции и Ирана. На рисунке 1.1 показан профиль выработки электроэнергии, который в основном зависит от ископаемого топлива, на долю которого приходится более 86,3% основных сетевых источников электроэнергии [5].

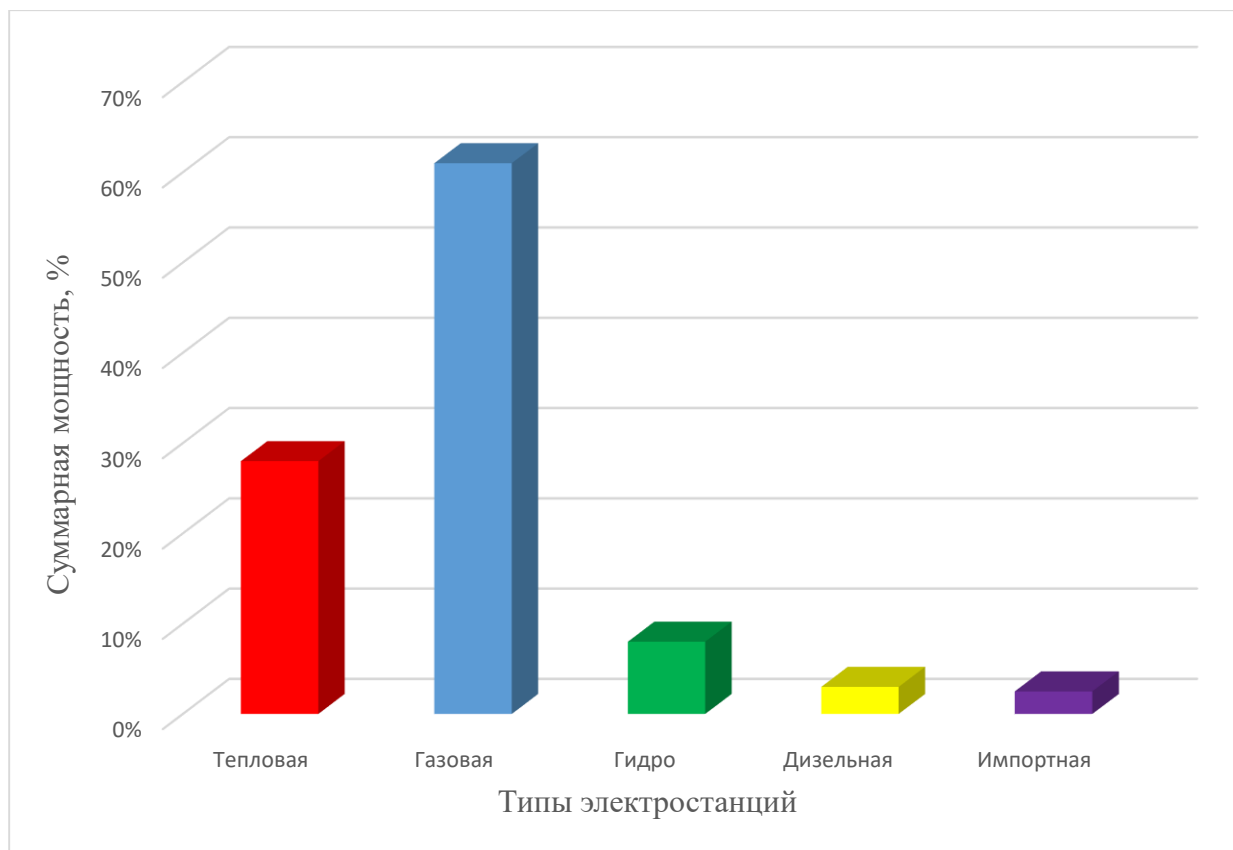


Рисунок 1.1 - Состав энергосистемы Ирака в 2018 году

Таблица 1.2 - Энергообеспечение Ирака

Тип станции	Север, МВт	Междуречье, МВт	Юг, МВт	Итого, МВт
Тепловая	0	3408,8	693,5	4102,4
Газовая	899,3	5916,3	3193,6	10009,1
Гидро	182,8	90,6	0	273,4
Дизельная	59	305,1	48,6	412,7
Итого	1141	9720,8	3935,1	14797

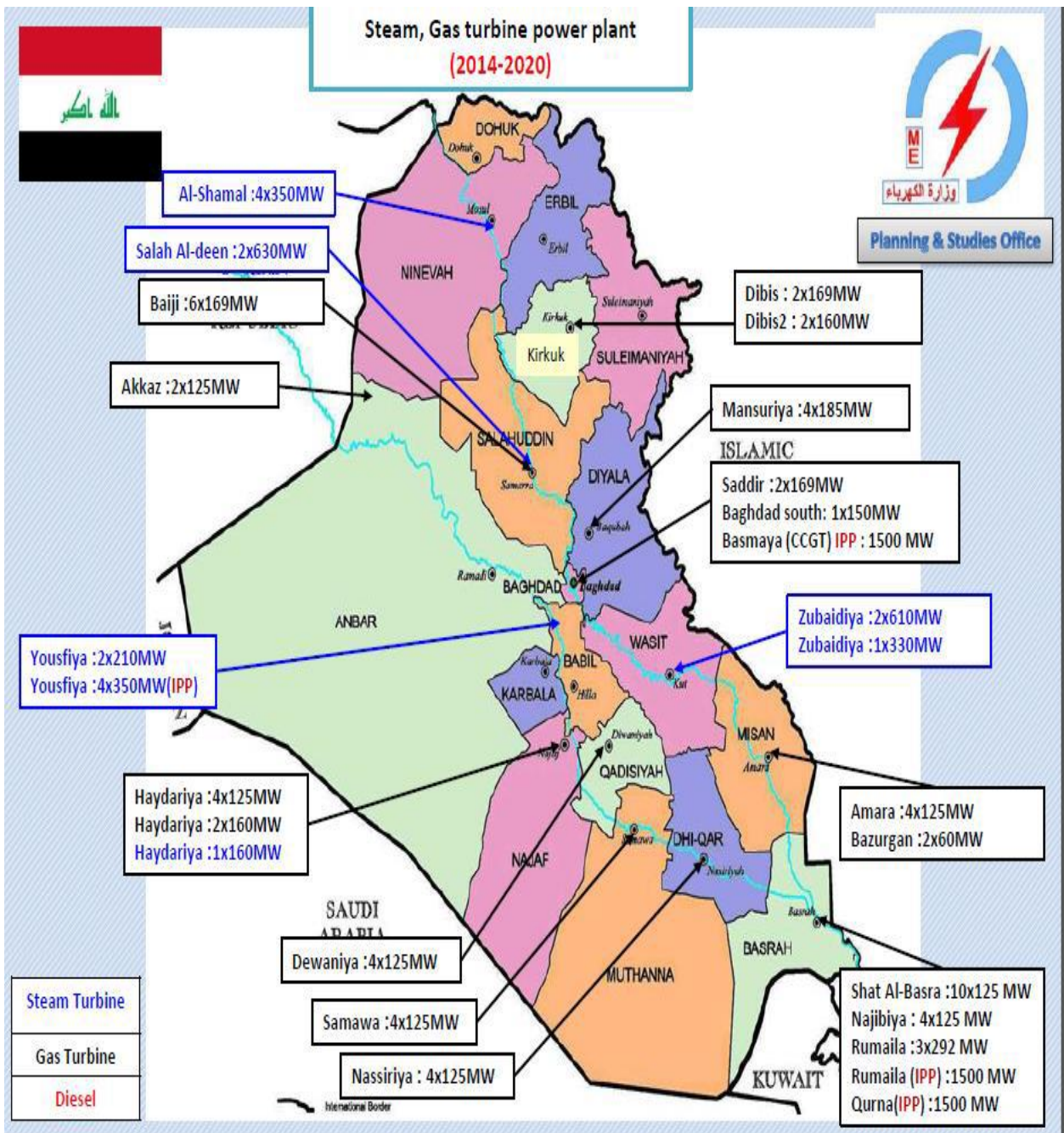


Рисунок 1.2 - Иракские электростанции

С 1980 года по сегодняшний день Ирак ведет непрерывную войну, которая уничтожила всю инфраструктуру. В 1980 году началась Ирано-Иракская война, которая продолжалась восемь лет.

Это вызвало увеличение государственных расходов на войну и сократило расходы на развитие инфраструктуры, особенно электроэнергетику.

Сегодня, в 2021 году, Ирак по-прежнему страдает от острой нехватки электроэнергии для граждан. 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 [6-9].

Около 70% всей электроэнергии, произведенной в 2013 году, включая технические, коммерческие и административные потери (передача - 6%, распределение - 13%; воровство и неоплаченные счета - 23%; несобранные - 26%; собранные - 33%), было потеряно. Более 90% потерь приходится на распределительную сеть, из которых 79% - нетехнические потери (воровство, неоплаченные и несобранные счета).

Распределительная система в целом находится в плохом состоянии и, по-видимому, является одной из проблем в электроснабжении, поскольку она деградирует из-за неэффективного управления и отсутствия инвестиций. Неконтролируемое и незапланированное расширение, в дополнение к старению сети, привело к перегрузкам и большим техническим и нетехническим потерям. Например, распределительные линии, которые передают ограниченное количество электроэнергии на короткие расстояния, являются основным фактором потерь в системе.

Общие потери при передаче и распределении составляют около 40-50% системных потерь в Ираке, причем большая часть этих потерь обусловлена сектором распределения (то есть 80-90% от общих потерь при передаче и распределении) [10-12].

Неэффективное управление и эксплуатация сектора распределения способствуют этой проблеме, включая выставление счетов, учет, обслуживание клиентов и невозможность повысить производительность системы. Использование современных технологий и заблаговременное планирование оказывают большое влияние на снижение потерь.

### 1.3 Передача и распределение электроэнергии в Ираке

Передача и распределение электроэнергии осуществляется через пять географически распределенных управлений: Накиль аль-Фасат (Центральная передача), Накил-аль-Фурат аль-Васат (Центральная передача Евфрата), Накилал-Фурат аль-ала (Передняя передача Евфрата), Накил-эль-Джунуб (Южная передача) и Накиль-эл-Шимал (Северная передача), ответственных за 16 429 км высоковольтных линий электропередачи напряжением 400 кВ и 132 кВ и 232 первичных и вторичных подстанций с общей мощностью 44 000 МВА [13-15].

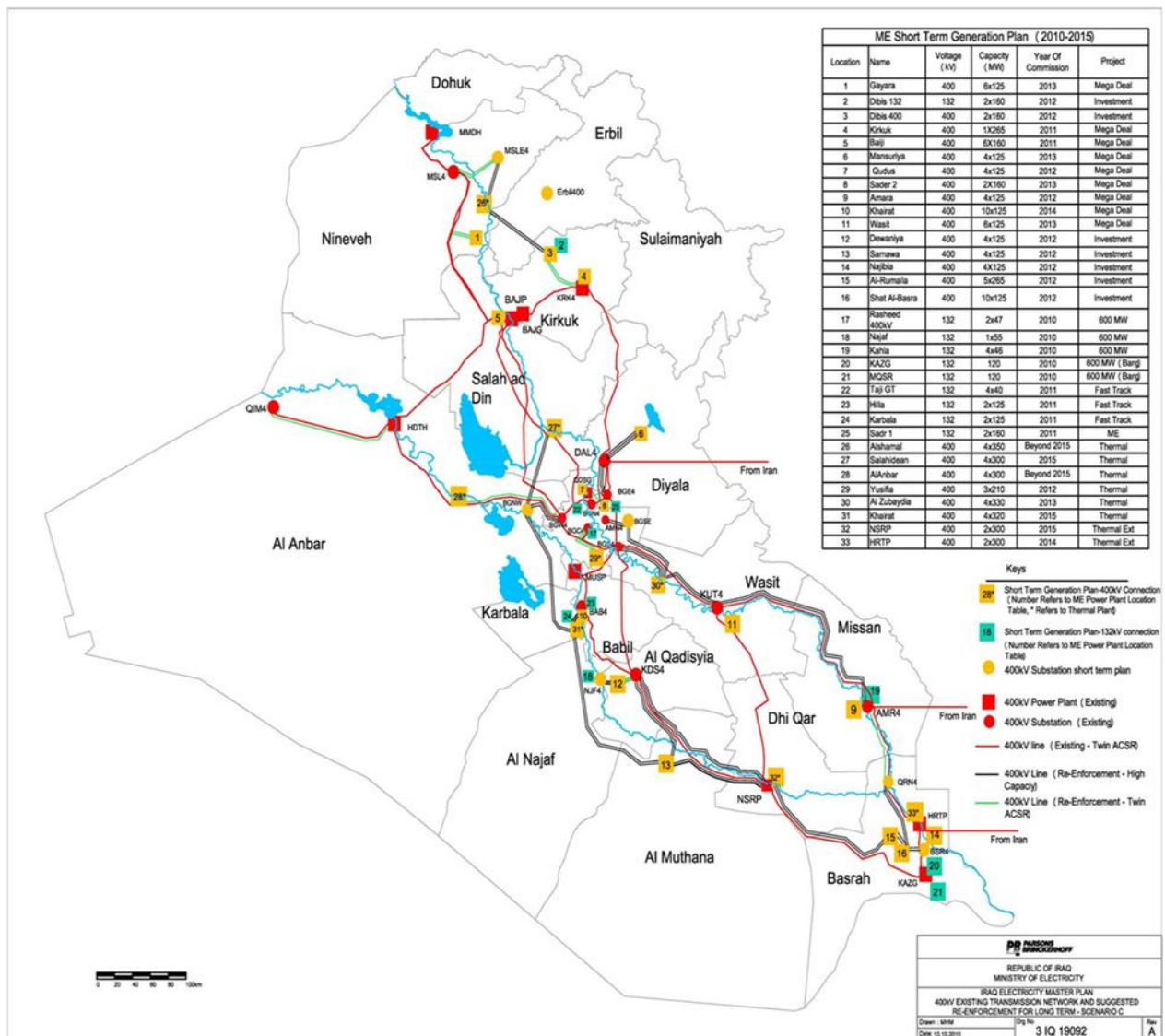


Рисунок 1.3 - Иракские электрические сети

Существующая электрическая сеть Ирака использует 400 кВ и 132 кВ, как показано на рисунке 1.3, на котором также показано расположение основных центров нагрузки в стране.

Электрическая сеть 132 кВ является локальной сетью распределения в каждом городе с несколькими связями по 132 кВ с соседними городами, в то время как сеть 400 кВ является магистральной сетью для передачи электроэнергии между городами и соседними странами.

Итого электрические сети включают в себя:

- 5200 км 400 кВ, сдвоенные ACSR 490/65 мм<sup>2</sup>, одноконтурные воздушные линии с мощностью 100 МВА;
- 24 подстанции 400/132 кВ;
- 12500 км воздушных линий 132 кВ;
- 209 подстанций 132/33/11 кВ для распределения электроэнергии в городах.

#### **1.4 Анализ режимов электропотребления и дефицита электроэнергии в Ираке**

По данным Всемирного банка в Ираке самое низкое энергопотребление на душу населения по сравнению с соседними странами из-за меньшей доступности и / или меньшей интенсивности (Рисунок 1.4).

Низкое потребление электроэнергии на душу населения с 1980-х годов практически не изменилось и составило 1068 кВтч на душу населения (2011 г.), несмотря на то, что потребление электроэнергии выросло с 10 815 ГВтч в 1980 г. до 41 115 ГВтч в 2011 г. [16].

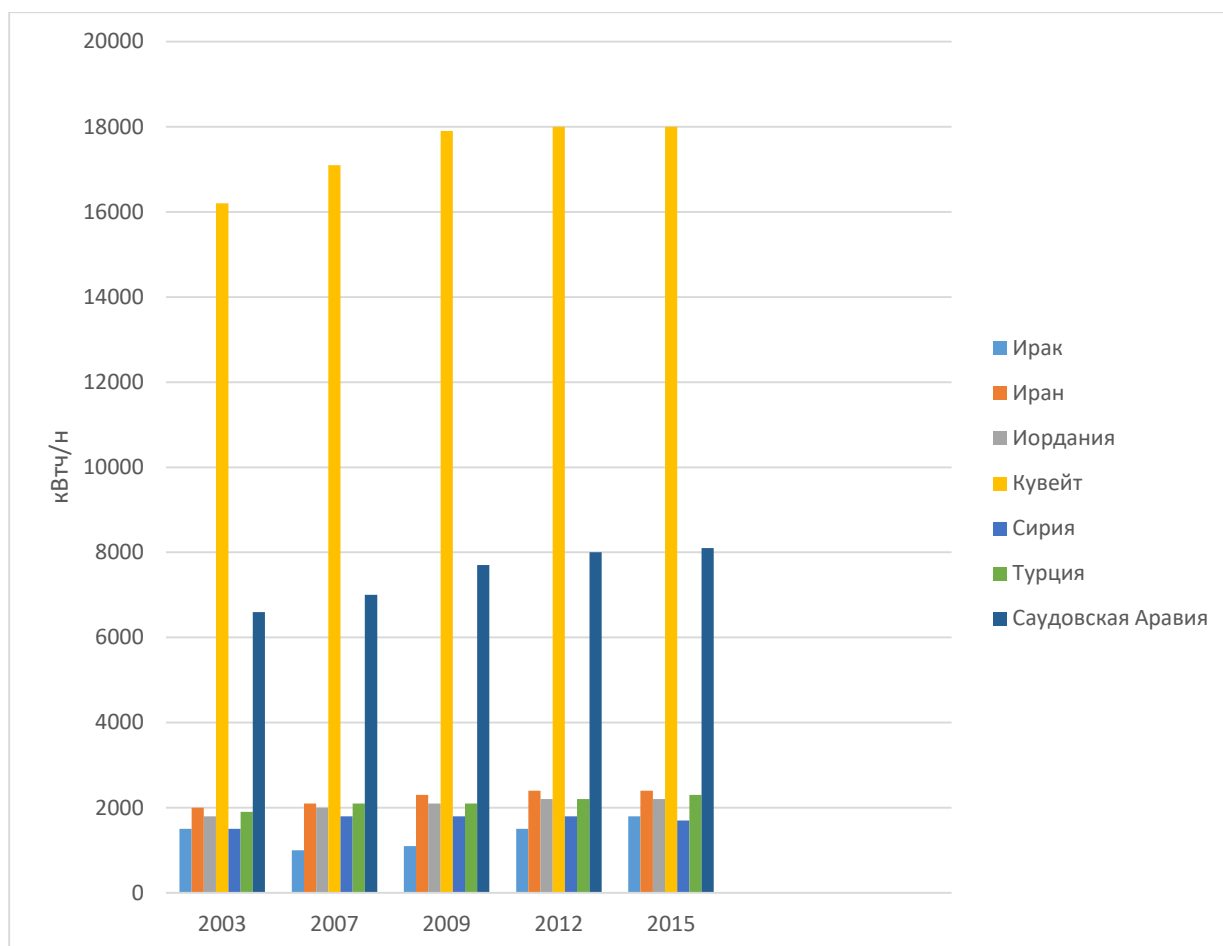


Рисунок 1.4 - Сравнение электропотребления на душу населения в Ираке и соседних странах

Для исследования современного состояния электроэнергетики Ирака и актуальных направлений ее модернизации выполнен анализ режимов электропотребления страны, а также оценка имеющегося дефицита электрической энергии и уровня энергообеспеченности регионов Ирака.

На рисунке 1.5 приведены суточные графики нагрузки Ирака для четырех характерных сезонов: зима (январь), весна (март), лето (июль) и осень (октябрь). Данные для исследования электропотребления взяты из открытых источников за 2015 год [17-20]. Как видно, в течение суток существует два небольших, но характерных пика: утренний и вечерний. Разница между нагрузкой в дневные и ночные часы не так велика, как могло быть для стран с жарким климатом, где вечерний максимум составляет около 60-70% утреннего. Это обусловлено как высокой долей промышленного сектора (газо и нефтедобычи), работающего в

постоянном режиме, так и активным использованием климатических устройств в жилых зданиях.

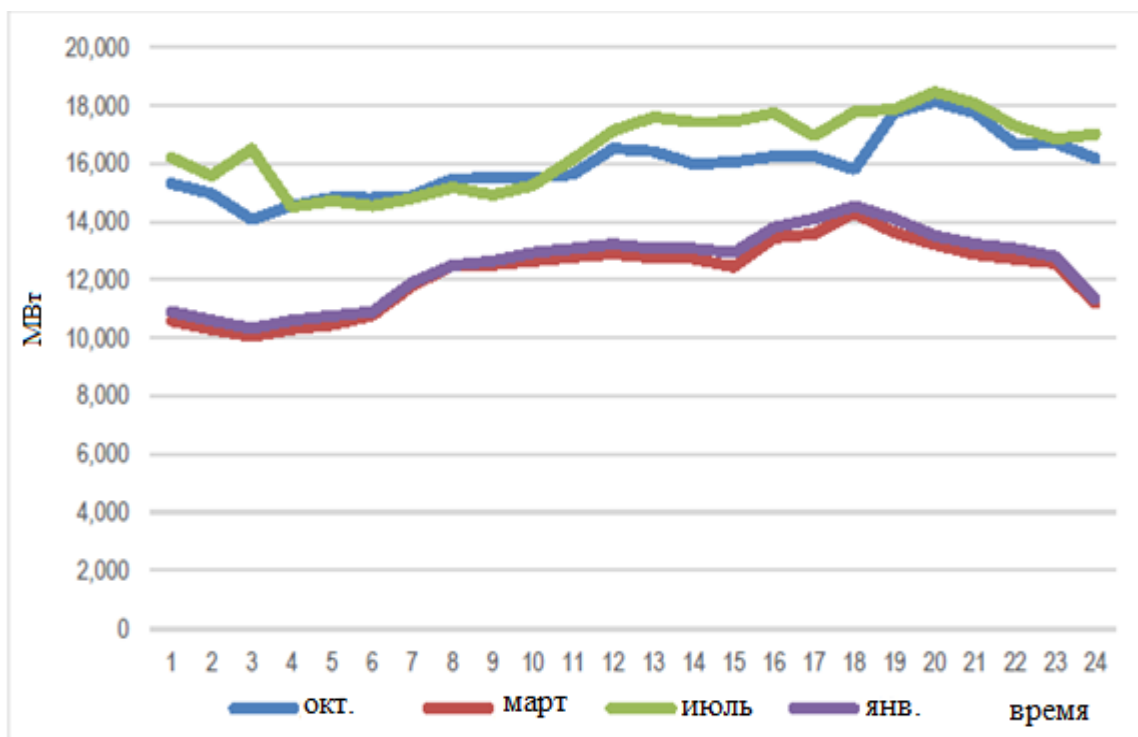


Рисунок 1.5 - Суточные графики нагрузки Ирака

В таблице 1.3 приведены максимальные значения потребляемой мощности по месяцам для различных провинций Ирака.

Таблица 1.3 - Максимальная мощность провинций Ирака

Провинция	Январь	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт
Багдад	4112	3930	3253	3080	3961	4439	4778	4704	4451	3956	3156	3738
Мосул	1515	1423	1175	1119	1439	1831	1984	1995	1881	1616	1341	1978
Киркук	775	703	647	597	695	771	834	838	790	679	694	944
Саладин	688	646	533	511	719	883	956	961	907	779	627	982
Эльанбар	813	764	631	582	717	915	992	997	940	808	643	983
Дияля	582	548	459	467	629	705	764	768	724	622	514	660
Вавилон	666	625	522	543	702	732	794	803	757	647	545	664
Карбаля	529	486	410	445	587	604	641	662	623	526	470	632

Продолжение таблицы 1.3

Провинция	Янв.	Фев.	Мар	Апр.	Май	Июн ь	Июл ь	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб	Дек.
	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт
Наджаф	604	567	470	467	593	623	675	680	644	552	460	639
Васит	523	477	391	385	518	623	673	704	634	518	427	546
Мугана	359	338	280	321	395	379	410	417	394	335	266	298
Дикар	631	589	485	524	775	934	1012	1018	961	828	655	641
Мисан	462	432	359	369	513	580	623	635	613	507	395	435
Эльбасра	1434	136	1101	1236	2115	2554	2766	2854	2663	2212	1706	1448
Потери	1485	1403	1106	820	1038	1293	1451	1419	1364	1179	875	1132
Итого ГВт	15,6	14,6	12,1	11,8	15,8	18,3	19,8	19,9	18,8	16,1	13,1	16,1

Как видно из табл. 1.3, суммарное значение пикового спроса, который приходится на август, составил 19 946 МВт. Наибольший спросом ожидаемо характеризуется Багдад, на который приходилось 24% от общего потребления, далее Басра, на долю которой приходилось 14%, и Мосул - 10%. Таким образом, на эти три провинции (Багдад, Басра и Мосул) приходится около 50% от общего спроса в Ираке.

Отдельно можно отметить, пиковые нагрузки регистрируются летом, в июле и августе, из-за высокой потребности в оборудовании для кондиционирования воздуха в самый жаркий сезон в Ираке, а меньшая нагрузка характерна для марта и апреля, в сезон спокойного климата.

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 отключение электрической энергии. Это хорошо иллюстрируется, так называемой, долей энергообеспеченности, определяемой как количество часов подачи электрической энергии, исходя из спроса на нее и поставляемых объемов.

Для различных провинций Ирака уровень энергообеспечения приведен на рисунке 1.6.

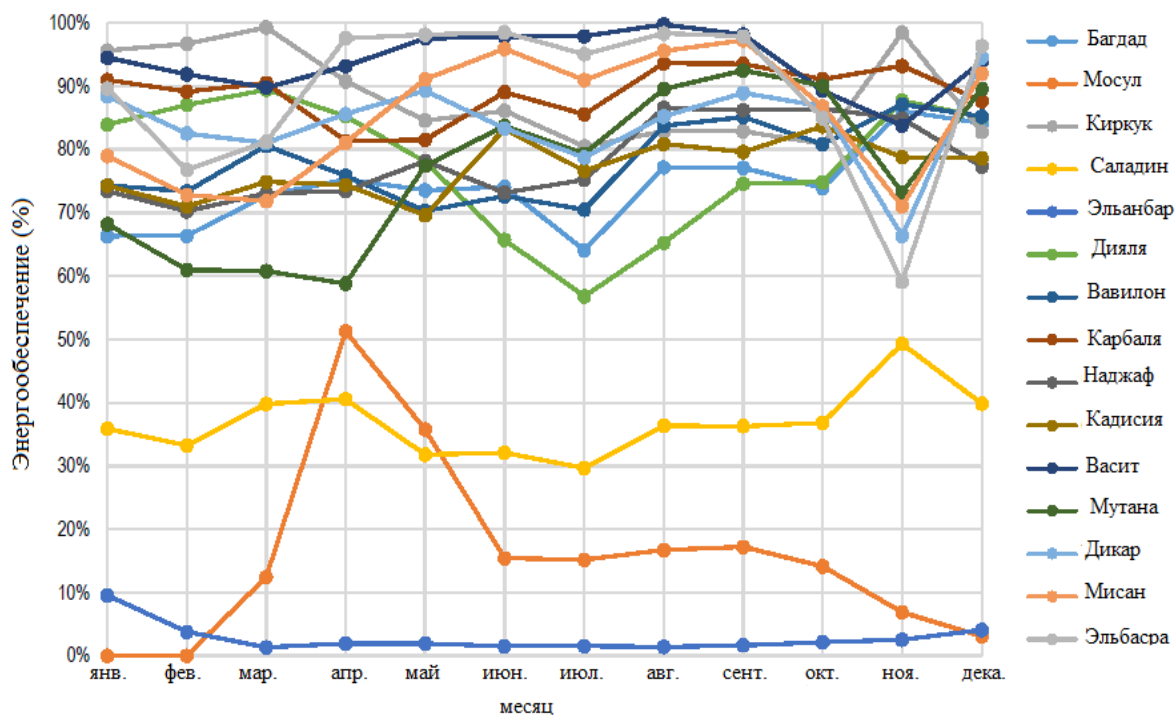


Рисунок 1.6 - Уровень энергообеспеченности в Ираке

Как видно на рисунке 1.6, уровень энергообеспеченности в северных провинциях страны ниже 50%, показано, что общая ситуация с энергообеспечением в Ираке является крайне недостаточной.

Прогноз электропотребления необходим для разработки плана развития национальной энергосистемы. По данным, предоставленным Министерством электроэнергетики Ирака еще в 2014 году (рисунок 1.7), пиковая потребность в мощности в 2020 году прогнозировалась на уровне 28 531 МВт. Этот прогноз фактически соответствует реальной текущей ситуации, так как спрос в Ираке в настоящее время составляет около 28000 МВт. При этом следует отметить, что пиковая потребность в мощности, как ожидается, увеличится до 54 094 МВт в 2030 году, что более чем вдвое больше, чем в 2015 году. По этой причине возникнет необходимость в развитии, как объектов генерации, так и всей электросетевой инфраструктуры страны [21].

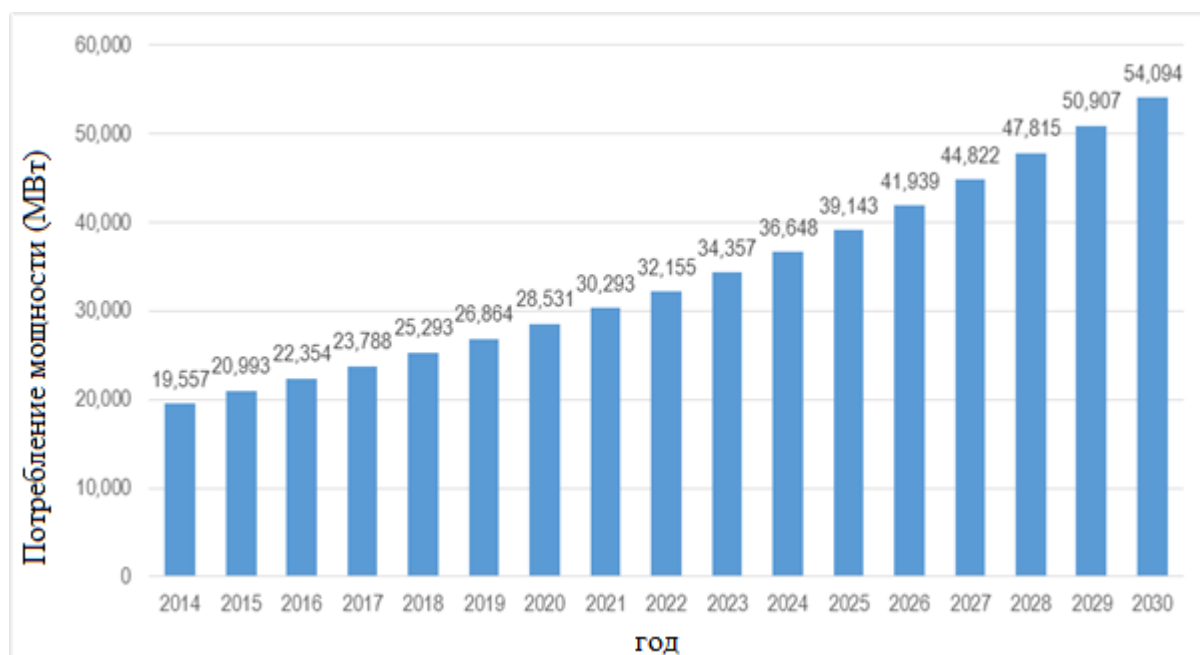


Рисунок 1.7 - Прогноз потребления мощности в Ираке по 2030 год

В таблице 1.4 показан прогноз пикового спроса по провинциям Ирака по 2030 год. Средний темп роста пикового спроса по всей стране составляет 6,51% в год. Самые высокие темпы роста среди провинций по сравнению со средними темпами роста - это Басра (7,03% в год) и Киркук (6,91% в год) [22].

Таблица 1.4 - Прогноз пикового спроса по провинциям Ирака на 2030 год

Провинция	Мощность	Доля	Годовой темп прироста
Мосул	5662 МВт	10,5%	6,60%
Киркук	2087 МВт	3,9%	6,91%
Дияля	1574 МВт	2,9%	6,83%
Эльанбар	2742 МВт	5,1%	4,43%
Багдад	17292 МВт	32,0%	6,72%
Вавилон	2632 МВт	4,9%	5,97%
Карбаля	1873 МВт	3,5%	6,05%
Васит	1575 МВт	2,9%	5,81%
Саладин	2513 МВт	4,6%	6,81%



Продолжение таблицы 1.4

Провинция	Мощность	Доля	Годовой темп прироста
Наджаф	2316 МВт	4,3%	6,79%
Кадисия	1974 МВт	3,6%	6,64%
Мутана	1260 МВт	2,3%	6,24%
Дикар	2653 МВт	4,9%	6,84%
Мисан	1802 МВт	3,3%	6,80%
Эльбасра	6139 МВт	11,3%	7,03%
Итого	54094 МВт	100,0%	6,51%

Для ликвидации имеющегося дефицита, соответствия все увеличивающемуся спросу на электрическую энергию в жилом и промышленном секторах экономики Ирака, а также минимизации количества импортируемой электроэнергии для повышения энергообеспеченности страны, Министерство электроэнергетики разработало обширный план по развитию всех секторов (передачи, распределение и генерация) посредством сотрудничества с некоторыми дружественными странами и организациями, предоставляющими льготные кредиты, например Японией и Международным валютным фондом [23].

На рисунке 1.8 показана существующая электроэнергетическая система Ирака, а также планируемые объекты по данным Министерства электроэнергетики.

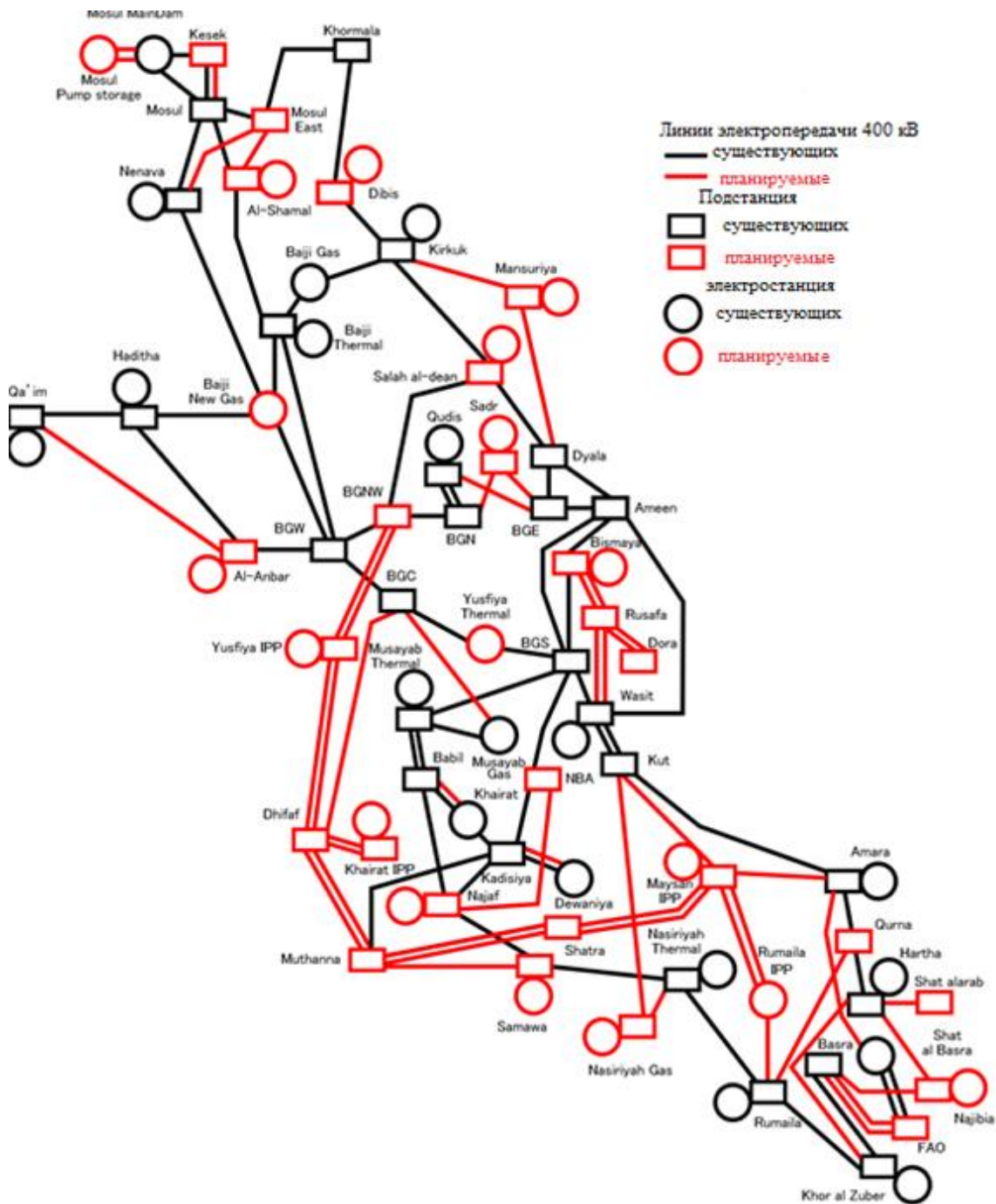


Рисунок 1.8 - Существующая и планируемая электроэнергетическая система Ирака

Общациональная электрическая сеть выполнена напряжением 400 кВ и играет роль основной системы передачи электроэнергии между провинциями страны, а сеть 132 кВ - местного электроснабжения. Строительство новых линий электропередачи 400 кВ в основном планируется в направлении Север-Юг. По этой оси расположены города Мосул, Багдад и Басра, которые характеризуются, как было показано ранее, наиболее высоким уровнем электропотребления.

План Министерства электроэнергетики Ирака по развитию электростанций включает в себя в основном строительство тепловых электростанций, использующих нефтяное топливо, и газовых электростанций вблизи соответствующих месторождений газа и нефти (г. Басра, Васит, Мисан, Насрия) установленной мощностью до 10000 МВт. Однако чрезвычайные события, такие как борьба с терроризмом и снижение цен на нефть, негативно сказываются на государственном бюджете и реализацию проектов [24,25].

### **1.5 Анализ географических и климатических условий Ирака**

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 км<sup>2</sup>. Север страны занят гористой местностью с меньшим количеством солнечных дней, чем в других регионах страны, особенно зимой. Срединная часть страны представлена равниной между двух главных рек: Тигром и Евфратом, получающая намного больше солнечного света, чем северные области страны [26-28].

Южная часть страны представляет собой территорию, где воздух чист от загрязнений, если не брать в расчет пылевые бури. Эта область считается одним из регионов с максимальной энергетической освещенностью, что обусловлено удачным географическим расположением страны на Ближнем Востоке, на северо-востоке Аравийского полуострова [29].

Климат Ирака преимущественно жаркий, с температурами, достигающими 56 °С с начала мая по конец сентября, и сухой – осадки выпадают в очень малом количестве, однако в южной прибрежной провинции Басра климат достаточно влажен. Несмотря на благоприятный климат с высокими средними температурами воздуха и высоким уровнем солнечного излучения,

сопутствующая запыленность, или наоборот, чрезмерная влажность воздуха, может затруднить эффективное использование и применение солнечных электростанций. Пустынные области Ирака, особенно рядом с Руб-эль-Хали, имеют особенно высокий уровень солнечного излучения. В общем и целом, вся территория Ирака может считаться пригодной для размещения солнечных электростанций. Потенциал солнечной энергии на территории Ирака примерно соответствует показателям стран «Солнечного Пояса», в которых он один из самых высоких в мире.

В соответствии с исследованиями ученых из Ирака теоретически возможно не только обеспечить страну энергией, но и экспортировать ее в значительных количествах [30-34].

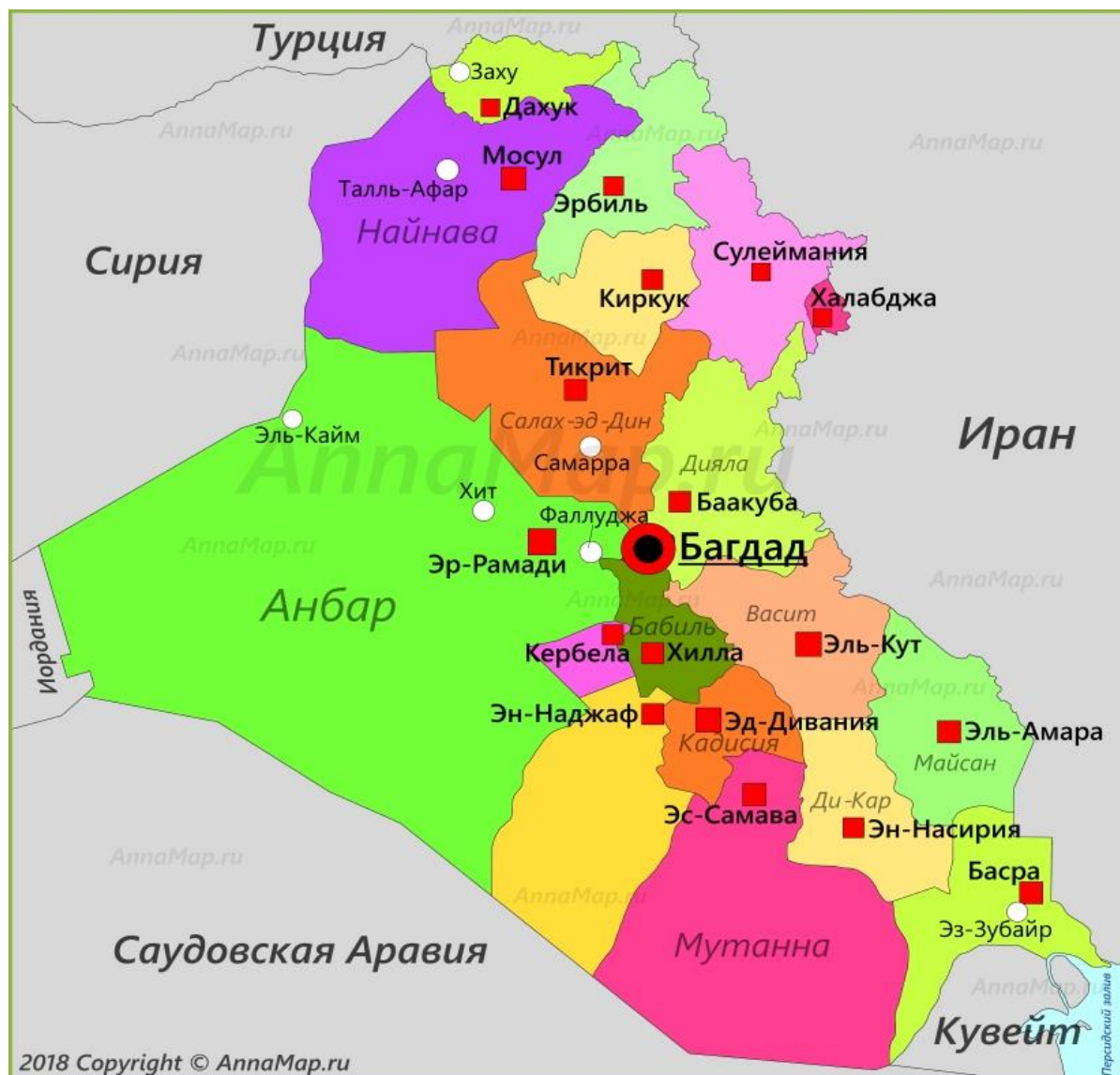


Рисунок 1.9 - Ирак и соседние страны

География Ирака разнообразна и подразделяется на пять регионов:

1. пустынный (к западу от Евфрата);
2. джезире (араб. «остров») – гористый регион между реками Тигр и Евфрат к северу от Самарры и города Хит, который простирается дальше на запад к Сирии и Турции;
3. северные нагорья Курдистана;
4. нижняя Месопотамия, богатая аллювиальными отложениями, располагающаяся к северу между Багдадом и Персидским заливом. Тигр и Евфрат во многих областях находятся выше уровня равнины, являющейся дельтой этих рек. Равнина пересечена оросительными каналами. Также для Юго-Восточного Ирака характерны пересыхающие озера;
5. Аллювиальная равнина на территории от Тикрита до Персидского залива.

Горы на северо-востоке являются продолжением горной системы, проходящей через Балканский полуостров, южную Турцию, северный Ирак, Иран, Афганистан и заканчивающейся в Гималаях [35].

Пустыня находится на Юго-Западе, в центральных провинциях, вдоль границ с Саудовской Аравией и Иорданией, является частью Аравийского полуострова.

Основные характеристики солнечной радиации в Ираке резюмируется следующим образом, как показано на рисунке 1.10.

На северной территории годовые изменения колебались примерно на 300%, от 7 МДж/м<sup>2</sup> в декабре и январе до 23 МДж/м<sup>2</sup> в июне. На южных территориях годовые изменения колебались примерно на 200%, от 13 МДж/м<sup>2</sup> в декабре и январе до 27 МДж/м<sup>2</sup> в июне и июле. На центральных территориях годовые изменения варьировались примерно на 250% и являются средним значением годовых изменений между северными и южными территориями [36-40].

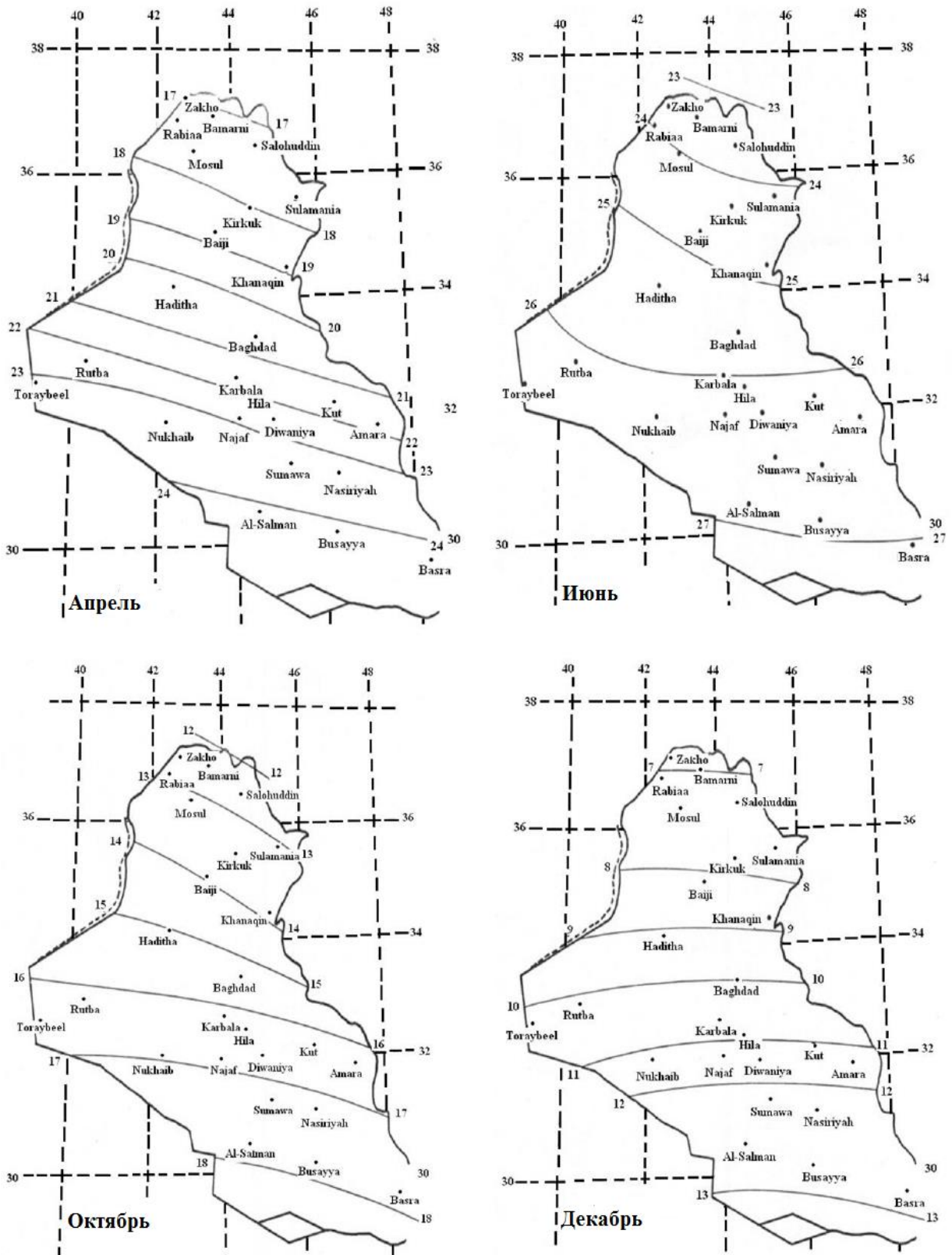


Рисунок 1.10 - Линии солнечной радиации в Ираке по характерным месяцам и сезонам, МДж/м<sup>2</sup>

## 1.6 Оценка энергетических ресурсов возобновляемых источников энергии в Ираке

По причине глобального изменения климата, которое особенно проявляется в Ираке в виде повышения температур, уменьшения количества осадков и последующих засух, песчаных бурь, повсеместной нехватки воды, снижения уровня воды в Тигре и Евфрате, следует обратить внимание на сокращение выбросов в атмосферу углекислого газа, продукта сжигания ископаемого топлива, который прямым образом повлиял на вышеперечисленные изменения климата [41].

В совокупности с изменениями климата, скорое исчерпание ресурсов нефти (по оценкам многих исследователей этот срок не превышает столетия) вынуждает обратиться к источникам альтернативной энергии, в том числе солнечной, чистой энергии, которая может быть использована для большого количества целей и доступна повсеместно. Энергия Солнца, достигающая земной поверхности за год, в 10000 раз превышает имеющиеся резервы энергии в мире. Ирак – это регион богатый солнечной энергией, где больше 3300 солнечных часов в год [42]. На рисунке 1.11 показана среднегодовая солнечная радиация в Ираке, кВт·ч/м<sup>2</sup>/год.

Сектор энергообеспечения был одной из основных проблем Ирака еще с 1990-ых годов. Перерывы в электроснабжении тормозят повседневную общественную жизнь, наносят существенный урон сфере здравоохранения, тем самым заставляя граждан искать альтернативные способы энергоснабжения, такие как портативные генераторы, которых в стране насчитывается уже около 4-ех миллионов. Чрезмерное использования генераторов вредит окружающей среде (посредством выброса загрязняющих атмосферу газов), экономике; заставляет иракцев приобретать большое количество ископаемого топлива, что вредит общему благосостоянию населения страны и ведет к истощению природных ресурсов [43,33].



Одним из основных и наиболее перспективных глобальных трендов является инвестиция в возобновляемую энергию. К примеру, Саудовская Аравия, страна богатая как ископаемыми, так и возобновляемыми ресурсами, объявила, что будет стремиться к увеличению доли возобновляемой энергии на внутреннем рынке. Саудовская Аравия поставила своей целью достичь 3,4 ГВт установленной мощности через возобновляемые источники энергии к 2020-ому году и 9,5 ГВт к 2023-ему году с ориентировочным бюджетом в 30-50 млрд. долларов, что будет составлять до 10% от общей генерируемой мощности страны. Анализ, проведенный международным агентством по возобновляемым источникам энергии International Renewable Energy Agency, IRENA (United Arab Emirates), показал, что данная программа действительно будет выгодна для всех стран региона Персидского залива, поскольку это поможет сохранить 11 трлн. литров воды и 400 млрд. баррелей нефти, попутно обеспечивая рынок труда двумя тысячами рабочих мест и уменьшит объемы выброса углерода на душу населения на 8% к 2030 году [44,38].

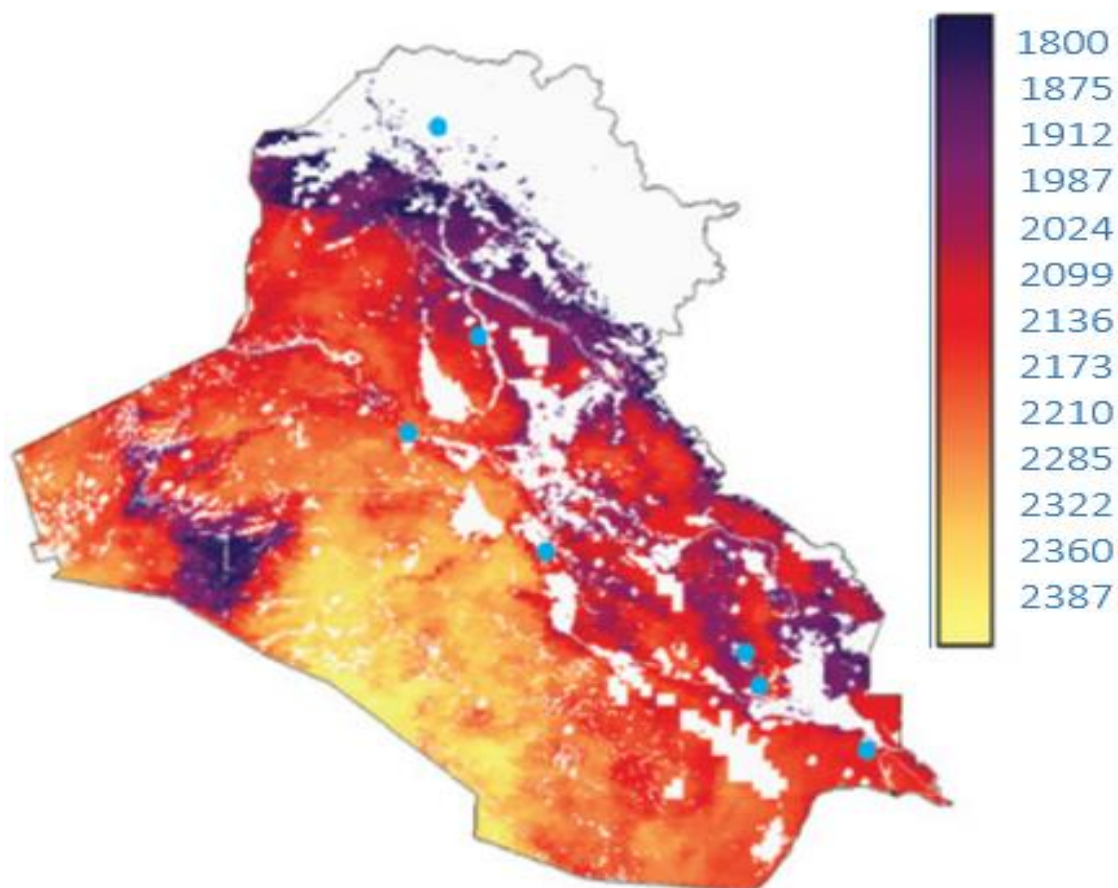


Рисунок 1.11 - Среднегодовая солнечная радиация в Ираке, кВт·ч/м<sup>2</sup>/год



## **1.7 Определение солнечного энергетического потенциала различных регионов Ирака**

Ирак можно разделить на три разные климатические зоны. Климат западных и юго-западных районов может быть классифицирован как пустынный климат; жаркий, сухой пустынный климат со среднегодовой температурой выше  $20^{\circ}\text{C}$ . Небольшая зона между Персидским заливом и границей Турции на востоке Ирака может быть классифицирована как полусухой климат, жаркий сухой климат со среднегодовой температурой выше  $18^{\circ}\text{C}$ . Наконец, горные районы северного Ирака могут быть классифицированы как континентальный климат, холодный снежный климат с сухим летом и влажной зимой с самым теплым месяцем при температуре выше  $22^{\circ}\text{C}$  и самым холодным месяцем ниже  $-3^{\circ}\text{C}$ . Поэтому западные и южные регионы будут более подходящими для настройки таких станций. Поскольку эти районы являются одними из самых жарких в мире и имеют наибольшее количество солнечных часов, то есть с более продолжительным днем [45-50].

Параметры для определения размеров и наведения солнечных панелей для солнечных тепловых технологий приведены ниже.

### **Инсоляция на горизонтальной поверхности ( $\text{кВтч} / \text{м}^2 / \text{сутки}$ )**

Количество электромагнитной энергии (солнечной радиации), падающей на поверхность Земли. Также называется общей или глобальной солнечной радиацией. Средняя и процентная разница минимальная и максимальная приведены. Можно получить высокое значение суммарной солнечной радиации в выбранном районе, расположенном в центре Ирака (широта  $33,5$  / долгота  $45$ ), что показано в таблице 1.5 [37].

Таблица 1.5 - Количество электромагнитной энергии (солнечной радиации), падающей на поверхность земли

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	2,98	3,93	4,81	5,50	6,86	7,98	7,52	6,85	5,81	3,96	2,84	2,59	5,14

### Диффузное излучение на горизонтальной поверхности (кВтч / м<sup>2</sup> / сутки)

Количество электромагнитной энергии (солнечной радиации), падающей на поверхность Земли в условиях всего неба с прямым излучением солнечного луча, заблокированного теневой полосой или следящим диском на поверхности Земли [37].

Таблица 1.6 - Диффузное излучение на горизонтальной поверхности (кВтч / м<sup>2</sup> / сутки)

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	0,95	1,14	1,56	1,99	2,03	1,78	1,85	1,68	1,43	1,34	1,07	0,88	1,47

### Прямое нормальное излучение (кВтч / м<sup>2</sup> / сутки)

Количество электромагнитной энергии (солнечной радиации) на плоской поверхности Земли, перпендикулярной лучу Солнца, при этом излучение окружающего неба заблокировано.

Таблица 1.7 - Прямое нормальное излучение

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	4,89	5,64	5,65	5,48	7,20	9,17	8,40	7,88	7,26	5,02	4,01	4,27	6,24

### Индекс четкости инсоляции (безразмерный)

Фракция инсоляции в верхней части атмосферы, которая достигает поверхности земли.

Таблица 1.8 - Среднемесячный индекс чистоты инсоляции (от 0 до 1,0)

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	0,55	0,58	0,56	0,54	0,61	0,69	0,66	0,65	0,64	0,54	0,49	0,52	0,59
Мин.	0,48	0,48	0,51	0,48	0,53	0,63	0,60	0,57	0,56	0,49	0,43	0,46	0,52
Макс.	0,62	0,65	0,65	0,58	0,68	0,74	0,70	0,69	0,67	0,59	0,57	0,57	0,64

### Инсоляция в ясном небе (кВтч / м<sup>2</sup> / сутки)

Количество электромагнитной энергии (солнечной радиации), падающей на поверхность Земли, когда облачный покров составляет менее 10% приведено в таблице 1.9.

Таблица 1.9 - Среднемесячная инсоляция ясного неба (кВтч / м<sup>2</sup> / сутки)

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	3,75	4,80	6,04	6,45	7,63	8,18	7,59	6,94	5,93	4,34	3,48	3,34	5,71

### Среднемесячные дневные часы

Количество часов между восходом и заходом солнца. Определение среднемесячного дневного света для каждого месяца основано на среднемесячном дне. В таблице 1.10 показано количество часов в выбранной области.

Таблица 1.10 - Количество часов между восходом и заходом солнца

Широта 33,5 долгота 45	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Средне- годовая
Среднее за 22 года	10,2	11	11,9	13	13,8	14,3	14,1	13,3	12,4	11,3	10,4	9,98	5,71

### 1.8 Определение перспективных районов размещения солнечных энергетических установок

Теоретического объема полученной энергии от солнечных панелей хватит не только для нужд Ирака, но и для экспорта [34,51-55].

Энергия, полученная в каждом регионе (провинции), может быть рассчитана по следующей формуле:

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot PR, \quad (1.1)$$

где  $E$  – энергия, кВт·ч;  $A$  – общая площадь солнечных панелей, м<sup>2</sup>;  $r$  – эффективность солнечной панели (%)  $\eta$  (от 15% до 24%);

$H$  – интенсивность солнечной радиации на наклонных панелях в год (тень не учитывается), кВт\*ч/м<sup>2</sup>;  $PR$  – коэффициент полезного действия (между 0,5 и 0,9; начальное значение = 0,75) [34-38].

Потери энергии (в зависимости от установленной системы, места и проч.):

Потери в инверторах (6-15%);	8%
Тепловые потери (5-15%);	8%
Потери в кабелях постоянного тока (1-3%);	2%
Потери в кабелях переменного тока (1-3%);	2%
Тени (0-40%);	3%
Потери, связанные со слабым излучением (3-7%);	3%
Потери из-за снега или пыли (2%);	2%
Другие потери	0%

Таблица 1.11 - Годовая возможная выработка электроэнергии по провинциям Ирака

Мухафаза (провинция)	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Доступная площадь, км <sup>2</sup>	Население, чел.	Мощность, МВт	Средне-годовая солнечная радиация, кВт·ч/м <sup>2</sup>	Годовая выработка электроэнергии, ТВт·ч
Анбар	138501	122000	1561400	433	2300	42064
Бабиль	5603	4000	1920700	650	2000	1200
Аль Басра	19070	17888	3120000	2805	2200	5900
Ди-Кар	12900	11500	2150000	993	2150	3706
Аль Кадисия	8153	7500	1144300	515	2150	2417
Дияла	17685	16200	1543200	572	1900	4614
Карбала	5034	4100	1566600	703	2250	1383
Киркук	9679	7200	1495600	672	1850	1997
Майсан	16072	15000	1200400	593	2050	4610
Муганна	51740	50500	739100	403	2300	17412
Эль-Наджаф	28824	27000	1500000	673	2280	9228
Мосул	37323	30500	2500000	706	1800	8230
Васит	17153	14500	1510600	700	1900	4130
Саладин	24751	19700	1408200	462	1900	5611
Сулеймания	20023	10500	2078800	2200	1800	2833
Эрбиль	15074	11000	1812700	1700	1800	2968
Дохук	6553	5000	1228700	990	1850	1387

Например, провинция Васит имеет площадь 17153 км<sup>2</sup> со свободной территорией 14500 км<sup>2</sup> для потенциального размещения солнечных панелей. Большая часть площади занята сельскохозяйственными и жилыми площадями, из таблицы 1.11 потребление электроэнергии городом составляет 700 МВт со среднегодовой солнечной радиацией в 1900 кВт·ч/м<sup>2</sup> [56-60]. Используя выражение (1.1), можно получить годовое количество электроэнергии, произведенной солнечными панелями из монокристаллического кремния, установленными на свободной территории, в 4130 ТВт·ч.

### Выводы по главе 1

Сектор энергообеспечения был одной из основных проблем Ирака еще с 1990-ых годов. Низкое потребление электроэнергии на душу населения началось с 1980-х годов.

Общие потери при передаче и распределении составляют около 40-50% системных потерь в Ираке. Электрическая сеть 132 кВ является локальной сетью

распределения в каждом городе с несколькими связями по 132 кВ с соседними городами, в то время как сеть 400 кВ является магистральной сетью для передачи электроэнергии между городами и соседними странами. Более 90% потерь приходится на распределительную сеть, из которых 79% - нетехнические потери (воровство, неоплаченные и несобранные счета). Распределительная система в целом находится в плохом состоянии и, по-видимому, является одной из проблем в электроснабжении, поскольку она деградирует из-за неэффективного управления и отсутствия инвестиций.

Сектор электроэнергетики серьезно пострадал после повторного вторжения Соединенных Штатов в 2003 году и последующей оккупации страны. Военные действия и деятельность террористических группировок подорвали эффективность его работы нанеся урон линиям электропередачи, трансформаторам и пр. Ирак нуждается в инвестициях в сектор электроэнергетики в условиях экономического роста и увеличения количества населения. Пустынные районы Западного Ирака являются стратегически важными областями страны, которые могут позволить вырабатывать большое количество электричества за счет солнечной энергии по сравнительно невысокой цене, и тем самым прекратить энергетический кризис, негативно влияющий на экономическое развитие страны.

Ежедневно в Ираке сжигают 800000 баррелей топлива в день для производства электричества самыми примитивными, опасными для окружающей среды методами, которые загрязняют её вредными веществами. В случае замены неэффективных топливных генераторов солнечными установками, которые обеспечат страну дешевой, чистой энергией, появится возможность экспортировать 800000 баррелей нефти в день, что соответствует \$56000000 в день (при средней цене нефти \$70 за баррель). Объем инвестиций, необходимых для использования солнечной энергии, оценивается в \$300/кВт, что в дальнейшем сократится до \$70/кВт в год [61].

## ГЛАВА 2 ОБЗОР И АНАЛИЗ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

### 2.1 Анализ технических и экономических параметров компонентов солнечной энергетической системы

Солнечная энергия относится к источникам энергии, которые можно напрямую отнести к солнечному свету или теплу, которое генерирует солнечный свет.

Солнечные энергетические технологии можно классифицировать по следующему типу:

- 1- пассивный и активный;
- 2- тепловые, фотоэлектрические и гибридные;
- 3- 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:

- 1- фотоэлектрическая (PV);
- 2- солнечная тепловая;
- 3- гибридная.

Фотоэлектрическая технология преобразует энергию излучения, содержащуюся в квантах света, в электрическую энергию, когда свет падает на полупроводниковый материал, вызывая электронное возбуждение и сильно повышая проводимость.

В настоящее время на рынке доступны два типа фотоэлектрических технологий:

1- кристаллические кремниевые фотоэлементы;

2- тонкопленочные технологии, изготовленные из ряда различных полупроводниковых материалов, включая аморфный кремний, теллурид кадмия и диселенид индия, галлия и меди.

Солнечная тепловая технология использует солнечное тепло, которое может быть использовано непосредственно для отопления или для выработки электроэнергии. Соответственно, его можно разделить на две категории:

1- солнечная тепловая без последующей выработки электроэнергии;

2- солнечная тепловая с последующей выработкой электроэнергии.

Первый включает в себя применение в качестве сельскохозяйственной сушки, солнечных воздухонагревателей, солнечных систем охлаждения и солнечных плит.

Последнее относится к использованию солнечного тепла для производства пара для выработки электроэнергии, также известного как концентрированная солнечная энергия (CSP) [62-64].

В настоящее время на рынке доступны четыре типа технологий CSP:

Параболоцилиндр, Тарелка, Отражатель и Солнечная башня



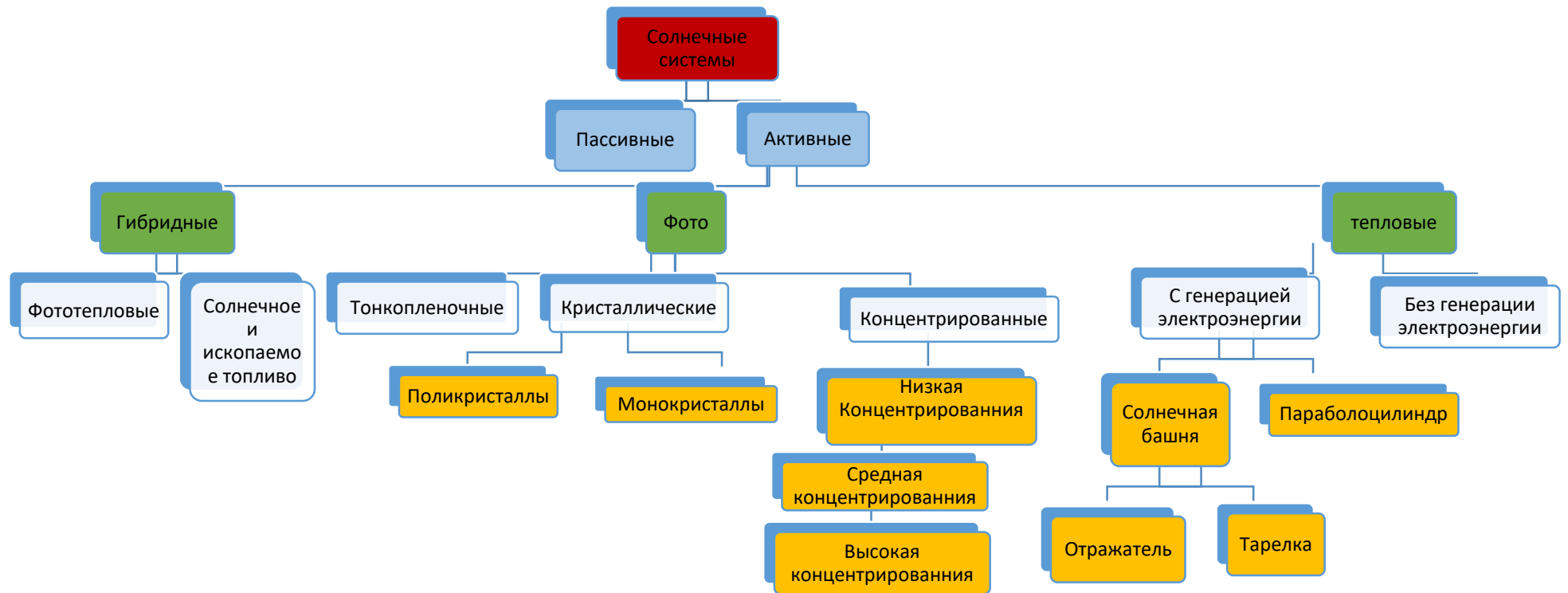


Рисунок 2.1 - Солнечные энергетические технологии

## 2.2 Гибридные технологии

1. Фотовольтаические тепловые гибридные солнечные коллекторы (PV/T).

2. Гибридное производство электроэнергии на основе солнечного и ископаемого топлива.

Фотоэлектрические солнечные тепловые (PV/T) коллекторы (гибрид).

Каждый день проводится все больше исследований в области солнечной энергии, особенно в области гибридных фотоэлектрических / тепловых (PV/T) коллекторов, которые являются комбинацией обеих солнечных технологий. Исследователи нацелены на эту конфигурацию системы, потому что она имеет улучшенную общую эффективность по сравнению с фотоэлектрическими (PV) и солнечными коллекторами и экономит пространство, используя одну область для двух систем вместо использования двух зон. Большинство исследователей представили новые модели / проекты, в то время как другие предоставляют исследования уже существующих для различных условий окружающей среды. Тем не менее, важно проанализировать их работу, чтобы найти ключевые идеи для будущих работ и выявить ограничения исследований в этой области. В данной работе представлены принципы PV/T коллекторов, классификация, история исследований, основные аспекты PV/T исследований и критический обзор представленной обзорной литературы [65-68].

### 2.2.1 Фотовольтаические тепловые гибридные солнечные коллекторы

Фотовольтаические тепловые гибридные солнечные коллекторы (photovoltaic / thermal - PV/T) состоят из двух основных частей:

1. Солнечные тепловые коллекторы – устройства, использующие солнечное излучение (ультрафиолетовое и инфракрасное) для нагрева жидкости с хорошей теплоемкостью для создания тепловой энергии. Эта жидкость может быть использована для нагрева воды через систему теплообменника. Общая

система используется для подачи горячей воды для жилых помещений; тем не менее, коллектор может быть использован для производства электроэнергии путем соединения системы с турбиной. Жидкость, используемая в тепловом коллекторе, может быть воздухом, водой или другим жидким материалом. Присутствуют многие конфигурации и конструкции солнечного теплового коллектора, такие как коллекторы с параболическим желобом, обогреватель периодического действия, концентрированная солнечная энергия и т.д. Чтобы обеспечить высокую температуру для этих жидкостей, трубки, несущие их, окрашены в черный цвет для поглощения большего количества излучения и нагревания жидкости.

2. Фотоэлектрические или солнечные панели – устройства, которые преобразуют свет (фотоны) в электрическую энергию в форме постоянного тока. Эти устройства изготовлены из полупроводниковых материалов и используют энергию, которую фотоны отдают электронам в валентной зоне, и поднимают их до зоны проводимости, что приводит к созданию пары электрон-дырка. Использование этой пары за счет использования потенциального барьера для создания разности потенциалов (напряжения) имеет важное значение. Наконец, внешняя цепь с нагрузкой подключается к этому устройству для создания тока. Простейшим элементом является фотоэлемент, и, как правило, PV продаются либо как модули PV или фотоэлектрические панели (модули состоят из ячеек, панели выполнены из модулей) [69-73].

Классификация PV/T имеет решающее значение для упрощения процесса изучения, сравнения различных типов и в случае сходства объединения данных типов в одну классификацию. Это зависит от множества параметров, таких как характер теплоносителя в системе, тип используемого коллектора и т.д. На рисунке 2.2 представлена общая классификация PV/T установки.

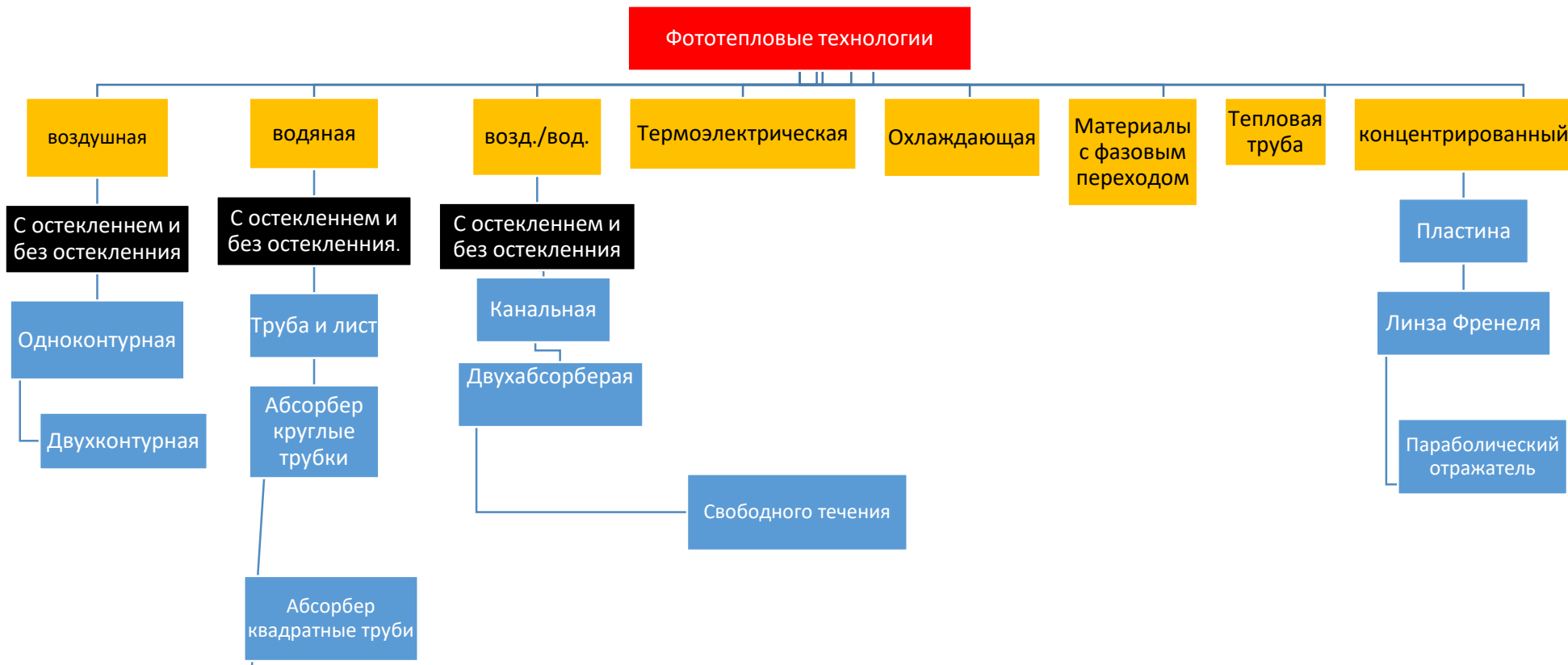


Рисунок 2.2 - Классификация фототепловых технологий

## **2.2.2 Гибридное производство электроэнергии на основе солнечного и ископаемого топлива**

Солнечная энергия, обладает потенциалом для удовлетворения всех мировых потребностей в энергии благодаря большому количеству солнечного излучения, доступного от солнца; однако в настоящее время только небольшая часть мирового спроса на энергию удовлетворяется непосредственно за счет солнечной энергии. Одна из причин недостаточного использования солнечной энергии заключается в том, что даже в оптимальных местах требуются большие площади сбора, что приводит к более высоким затратам по сравнению с другими возобновляемыми/ ископаемыми технологиями. Другая причина заключается в том, что солнечная энергия меняется в течение дня, что означает, что без какого-либо метода накопления энергии выработка электроэнергии из солнечной энергии прерывистая и не может быть распределена. С другой стороны, хранение приводит к увеличению капитальных затрат (даже если при правильном хранении уровень затрат может быть ниже). Одним из возможных решений для преодоления этих проблем с прерывистостью и стоимостью является производство гибридного концентрированного солнечного и ископаемого топлива. Другие гибридные концепции, такие как солнечная энергия с использованием топлива из биомассы или солнечная энергия с использованием ископаемого топлива и ветра, также являются многообещающими, однако в этом обзоре основное внимание будет уделено гибриднему солнечному и ископаемому топливу. Генерация гибридного солнечного ископаемого топлива определяется здесь как энергетический цикл, который всякий раз, когда он использует солнечную энергию, он также использует топливо. Это несколько произвольное определение исключает, например, солнечную тепловую установку, использующую топливо в качестве резервного, когда недостаточно солнечной инсоляции. Помимо снижения потребления и выбросов топлива по сравнению с выработкой электроэнергии на ископаемом топливе и более низких инвестиционных затрат по сравнению с электростанциями, работающими только

на солнечной энергии, гибридная энергетика имеет следующие два основных преимущества.

1) Подходит для крупных электростанций, которые могут быть интегрированы в электрическую сеть, поскольку у гибридной станции нет проблем с подключением к сети (т. е. необходимости синхронного резерва для стабилизации частоты, быстрой скорости линейного изменения мощности, различия во времени). Отсутствуют проблемы пикового спроса и предложения и т. д., возникающие на электростанциях с концентрированной солнечной энергией (CSP) или фотоэлектрических (PV) без хранения, которые подвержены перебоям и переменному солнечному снабжению [74-76].

2) Применение солнечной энергии может быть модернизировано для уже существующих электростанций, работающих на ископаемом топливе (в зависимости от ресурсов площадки и конструкции энергетического цикла). Что касается первого преимущества, только солнечные электростанции с надлежащим хранением или технологией интеллектуальных энергосистем являются многообещающим вариантом для устранения проблем с подключением к энергосистеме, традиционно связанных с солнечной энергией.

В данной работе рассмотрим использования солнечной энергии в зависимости от начального типа электростанции:

1. гибридные электростанции с комбинированным циклом (ISCCS);
2. гибридные солнечно-паровые электростанции;
3. гибридные солнечно-газовые электростанции.

### **2.3 Гибридные электростанции с комбинированным циклом (ISCCS)**

Сегодня 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 сглаживания разрыва между спросом и предложением Ираку необходимо приступить к строительству не менее 5-ти крупных теплоэлектростанций и распределительной сети, включающей 25 подстанций - 400 кВ/250 МВА и 159 подстанций - 132 кВ/3х63 МВА. Для восстановления полноценного функционирования иракской электрической системы и удовлетворения текущего спроса требуется финансирование в размере  $\approx 20$  млрд. долларов [77-80].

Население Ирака, как ожидается, достигнет 55,85 млн. чел. к 2030 году и прогнозируемый спрос на электроэнергию достигнет 60 000 МВт. Сегодня иракские семьи для компенсации дефицита электроэнергии используют дизель-генераторы [81].

Существующий дефицит 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 чистыми источниками энергии. Для того чтобы дать Иракскому электроэнергетическому сектору реальный толчок и догнать растущий спрос, предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов.

Только модернизация основных действующих электростанций Ирака с форсированием их мощности выше существующего уровня позволит пересмотреть цены на электроэнергию и преобразовать электроэнергетический сектор в самоокупаемую отрасль [82-84].

Технология преобразования солнечной энергии на сегодня достаточно хорошо изучена, что снижает риски при модернизации электростанций Ирака.

Старейшие в мире промышленные концентраторы солнечной энергии - CSP (Concentrated Solar Power) построены на Solar Energy Generating Systems (SEGS, США) в 1984 году, а к 1990 году их мощность нарастили в девять раз,

до 357 МВт генерируемых параболическими солнечными коллекторами – РТС (Parabolic Trough Collector). Кроме SEGS, в США эксплуатируются еще три солнечных тепловых электростанции суммарной генерирующей мощностью  $\approx$  810 МВт [85].

Опытная солнечная электростанция комбинированного цикла – ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System) 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 20 МВт; в Иране ISCCS 64 МВт с CSP 17 МВт соответственно [86-88].

Следует отметить, что эффективность преобразования солнечной энергии в тепло и электричество связано с концептуальными инженерными решениями, встречающимися в схемах парогазового цикла: РТС; SEGS (Solar Electric Generating System); DISS (Direct Solar Steam); ISCCS; HTF (Heat Transfer Fluids); CRS (Central Receiver System); CC (Combined Cycle); HRSG (Heat Recovery Steam Generator); DSG (Direct Steam Generation) и другие [89].

Во многих странах эксплуатируются газотурбинные электростанции - ССГТ (Combined Cycle Gas Turbine). Например, ССГТ 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. Эта физическая зависимость хорошо известна в авиации. Повышение плотности воздуха зимой широко используется транспортной авиацией при планировании доставок тяжелых грузов. Авиаперевозки зимой позволяют уменьшить разбег воздушного судна и сократить расход топлива. Для повышения мощности ГТУ в теплый и жаркий период года используют впрыск воды в воздухозаборник турбины [90-94]. Интеграция солнечной энергетики с природным газом (конкретнее с ССГТ) получила название NGCC (Natural Gas Combined Cycle), и может



рассматриваться как промежуточный шаг на пути к оптимальному использованию возобновляемых источников энергии. Комбинированная система ISCCS является наиболее перспективной альтернативой обычным солнечным тепловым установкам CSP.

При правильном выборе схемно-технических решений есть потенциал еще увеличить КПД. Так результаты моделирования показали, что концепция DSG повышает производительность электростанций Алжира при любом режиме работы в среднем на 4% в течение года по сравнению с ISCCS [94-97].

Работы по повышению КПД гибридных станций так же ведутся и в области теплоносителей. Наиболее распространенным рабочим телом является - вода/пар, расплавленные соли, жидкий натрий или воздух. В 2014 году было предложено новое поколение солей на базе смеси бинарных и тройных эвтектических галоидных солей, таких как  $KCl-AlCl_3$  и  $NaCl-KCl-ZnCl_2$ , которые имеют низкую вязкость и низкое давление пара, что делает их очень перспективными для HTF [98].

Также, заслуживает внимания переход с РТС на централизованную приемную систему - CRS с комбинированным циклом – СС. Новая конфигурация объемного приемника солнечной башни CRS позволяет парогенератору рекуперации тепла - HRSG эффективнее работать в режиме нагрева, что значительно повышает КПД электростанции. Министерство электроэнергетики Ирака уже проанализировало мировой опыт и планирует генерировать за счет CSP дополнительно 5500 МВт в общей мощности существующих электростанций.

### **Сравнение технологий**

Солнечные тепловые технологии значительно отличаются друг от друга не только по техническим и экономическим аспектам, но и опыту применения и эксплуатации в масштабных условиях.

Установки с параболическим желобом являются наиболее широко используемыми, при этом ожидается дальнейшее повышение их производительности и снижение затрат на реализацию. Практически все

развернутые в настоящее время подобные установки не имеют аккумуляторов тепловой энергии и вырабатывают энергию только в светлое время суток. Большинство проектов, которые в настоящее время строятся или разрабатываются, основаны на технологии параболического желоба, так как это наиболее зрелая технология с наименьшим риском внедрения [99].

Параболические желоба и солнечные башни, в сочетании с накоплением тепловой энергии, могут быть эффективно использованы для объектов городской коммунальной инфраструктуры.

Солнечные башни и линейные системы Френеля только начинают развертываться, и существует значительный потенциал для снижения их капитальных затрат и повышения производительности, особенно для солнечных башен. Однако системы параболических желобов с их более длительным опытом эксплуатации на предприятиях промышленного назначения, сегодня представляют собой более гибкий вариант с низким уровнем риска. При этом приведенные затраты и установок с параболическим желобом и солнечных башен имеют тенденцию к снижению с повышением коэффициента использования установки. В основном это связано со значительно более низкой удельной стоимостью (до трех раз ниже) накопителя энергии из расплавленной соли в солнечных башнях.

В таблице 2.1 представлено сравнение параметров четырех основных типов технологий: параболического желоба и желоба Френеля, солнечной башни и параболической тарелки.

Таблица 2.1 - Параметры основных солнечных тепловых технологий

Параметр	Параболического типа	Башенного типа	Линза Френеля	Тарелочного типа
Мощность, МВт	10-300	10-200	10-200	0,01-0,025
Зрелость технологии	Широко применяется	Пилотные проекты	Пилотные проекты	Демонстрационные проекты
Рабочая температура, °С	350-550	250-565	390	550-750

Продолжение таблицы 2.1

Параметр	Параболического типа	Башенного типа	Линза Френеля	Тарелочного типа
Пиковая эффективность установки (%)	14-20	23-35	18	30
Электрический КПД солнечной энергии, %	11-16	7-20	13	12-25
Удельная стоимость электроэнергии	1600\$-3000\$/кВт	4500\$-8000\$/кВт	6000\$-9000\$/кВт	9000\$-13000\$/кВт
Годовой коэффициент использования (%)	25-28 (без накопителя) 29-43 (с накопителем)	55 (с накопителем)	22-24	25-28
Ресивер / абсорбер	Абсорбер прикреплен к коллектору, движется вместе с коллектором, сложная конструкция	Ресивер с внешней поверхностью или полостью, фиксированный	Фиксированный абсорбер, без вспомогательного отражателя	Абсорбер прикреплен к коллектору, движется вместе с коллектором
Накопитель тепловой энергии	Расплав соли с двумя резервуарами непрямого действия при 380°C или расплав соли с двумя резервуарами прямого действия при 550°C	Расплав соли в двух резервуарах прямого действия при 550°C	Кратковременное хранение пара под давлением (<10 мин.)	Без накопителя
Гибридизация	да	да	да	нет
Цикл	Перегретый паровой цикл Ренкина	Перегретый паровой цикл Ренкина	Насыщенный паровой цикл Ренкина	Стирлинг
Максимальный наклон солнечного поля, %	<1-2	<2-4	<4	10% или больше
Потребность воды (м <sup>3</sup> /МВтч)	3 (водяное охлаждение) 0,3 (воздушное охлаждение)	2-3(водяное охлаждение) 0,25(воздушное охлаждение)	3 (водяное охлаждение) 0,2 (воздушное охлаждение)	0,05-0,1
Включение в сеть	Сетевая	Сетевая	Сетевая	Сетевая /автономная

Из приведенной в таблице 2.1 информации становится ясно, что параболические желоба является лучшим из существующих в настоящее время технологических решений для реализации электростанций, в том числе и наиболее подходящим для климатических условий юга Ирака. Кроме того, она может быть гибридизирована с ГТУ, расположенными там, в соответствии с вышеупомянутыми факторами [100,101].

## **Выводы по главе 2**

В результате войн и санкций 1990-х и 2003-х годов Иракская электроэнергетическая инфраструктура сильно пострадала. Для сглаживания разрыва между спросом и предложением Ираку необходимо приступить к строительству не менее 5-ти крупных теплоэлектростанций и распределительной сети.

Существующий дефицит 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 чистыми источниками энергии.

Для того чтобы дать Иракскому электроэнергетическому сектору реальный толчок и догнать растущий спрос, предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов.

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.

Технология преобразования солнечной энергии на сегодня достаточно хорошо изучена, что снижает риски при модернизации электростанций Ирака.

Комбинированная система ISCCS является наиболее перспективной альтернативой обычным солнечным тепловым установкам CSP.

При правильном выборе схемно-технических решений есть потенциал еще увеличить КПД. Так результаты моделирования показали, что концепция DSG повышает производительность электростанций Алжира при любом режиме работы в среднем на 4% в течение года по сравнению с ISCCS.

## ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ

### 3.1 Перспективность использования солнечной энергии в Ираке

Правительство и народ Ирака еще не осознали в полной мере важность возобновляемой энергии. Разработка и продвижение технологий возобновляемой энергии осуществляется не государством, а частными лицами или негосударственными организациями.

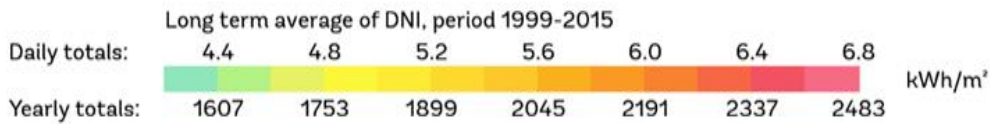
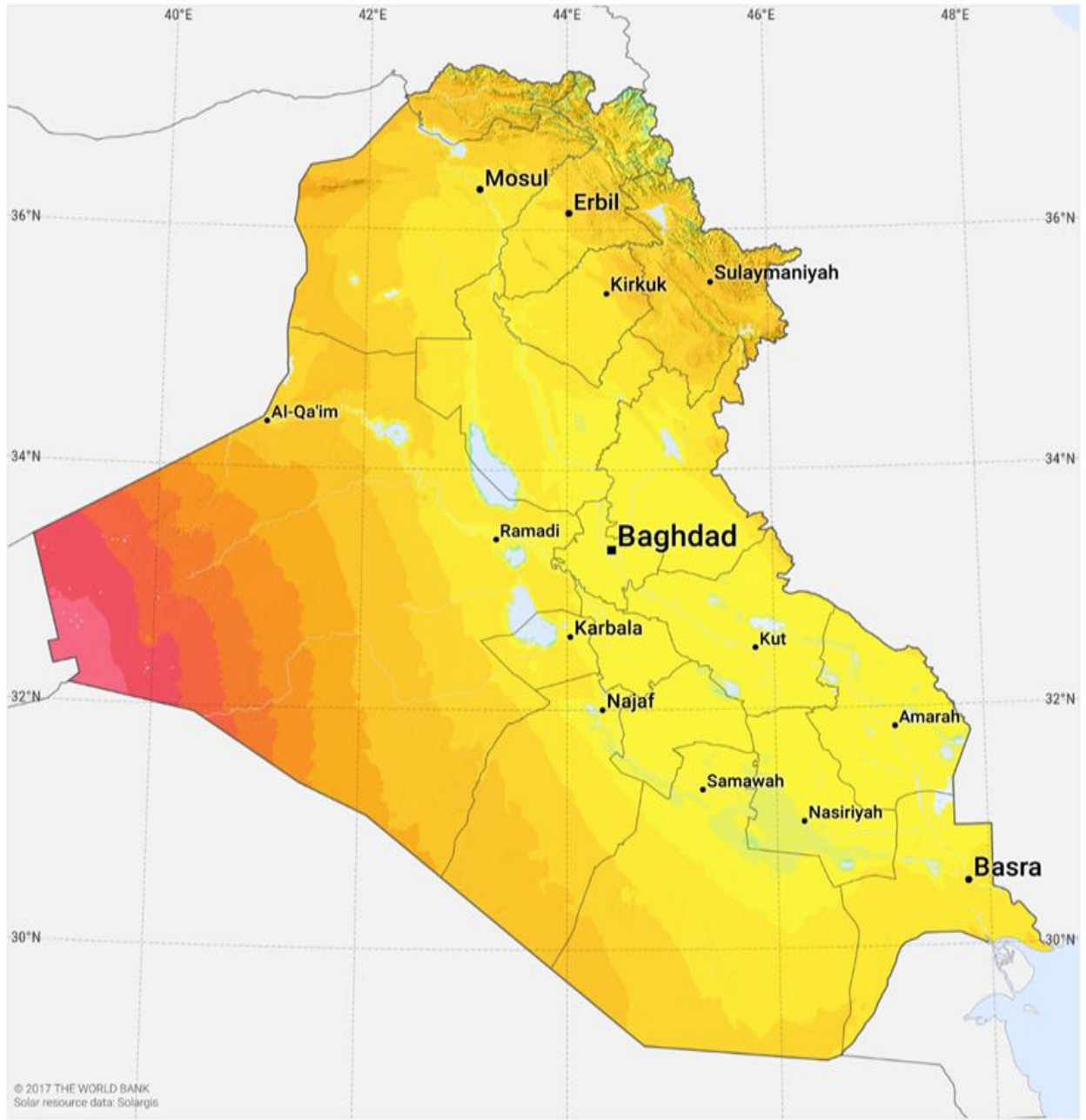
Ископаемое топливо не бесконечно и будет исчерпано в течение этого столетия, однако солнечная энергия является практически неограниченным источником энергии, и к тому же не имеет в качестве побочного продукта углекислый газ в отличие от вариантов со сжиганием ископаемого и биотоплива [102]. На солнечную энергию следует обратить первостепенное внимание в условиях глобального изменения климата, а именно глобального потепления.

Ирак – это регион, богатый солнечной энергией, где больше 3300 солнечных часов в год. Солнечная радиация падает в пустынных районах Ирака, на которые сейчас приходится более 60% территории страны. Потенциально возможная добыча солнечной энергии с площади в 437072 км<sup>2</sup> превосходит нынешнюю в сотни тысяч раз [103,94].

Это поможет Ираку остаться экспортером энергии в будущем, сменив ископаемое топливо на солнечную энергию. В Ирак входят 18 провинций (три из которых находятся на севере, в Курдистанском регионе) и каждая из них обладает некоторой степенью автономности и бюджетом, выделяемым правительством, которым местные органы управления могут распоряжаться, в том числе инвестировать в постройку солнечных электростанций на свободном пространстве в пустыне, особенно в регионах, страдающих от нехватки энергии.

SOLAR RESOURCE MAP

# DIRECT NORMAL IRRADIATION IRAQ



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit: <http://globalsolaratlas.info>

Рисунок 3.1 - Солнечная радиация в Ираке

### 3.2 Разработка математической модели определения оптимального места размещения гибридной электростанции с комбинированном циклом

Из вышеупомянутой информации видно, что энергетические показатели Ирака удовлетворяют условиям строительства солнечных энергетических установок. При этом требуется оценка интенсивности излучения и различных рисков, влияющих на эти установки.

Эти риски оцениваются либо по их возникновению, либо по месту в зависимости от характеристик почвы или техногенной деятельности. Среди них землетрясения, оползни, карст, наводнения, загрязнения, зоны низкого давления, набухающие глины, горные разработки, вторжения морской воды и песчаные дюны.

По данным Иракского метеорологического управления (IMOAS) самая низкая опасность находится в западной и южной четырехугольной зоне, т.е. в Синджаре, Сур, Вади-аль-Мия, Рутбе, Вади-Хоране, Вади-Тибиле, Аль-Туртаре, Аль-Брите, Аль-Ма'Ания, Аль-Салман, Ансаб и Ал-Рухаймия [34,35] [103-107].

В таблице 3.1 показано изменение годовой солнечной радиации и светового дня в зависимости от региона Ирака.

Таблица 3.1 - Координаты, солнечная радиация и световой день для городов Ирака (1990–2019 гг.)

Город	Широта (N) и долгота (E)	Солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup> /год	Световой день с октября по март, ч	Световой день с апреля по сентябрь, ч
Эл басра	30°31-47°50	7135,46	10,3-9,5	11,2-13,5
Эл насирия	31°01- 46°15	7263,97	10,2-9,3	11,1-13,3
Эл самава	31°16- 45°15	7123,67	10,3-9,4	11,2-13,5
Эл имара	32°07- 46°44	7021,23	10-9,1	10,9-13
Эл кадисия	31°57 45°00	7021,23	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл наджаф	31°57-44°15	7135,20	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл хай	32°08-46°05	7030,82	9,5- 8,1	10,1-12,9
Карбала	32°34 -44°03	7185,74	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл ротба	33°02- 40°15	7114,44	9,2-8,5	8-12,3
Багдад	33°18- 44°30	6997,46	9,2-8	10-12,6



Продолжение таблицы 3.1

Город	Широта (N) и долгота (E)	Солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup> /год	Световой день с октября по март, ч	Световой день с апреля по сентябрь, ч
Мосул	36°19- 43°05	6318,83	7,5-5,8	8,1-12,3
Хадиса	34°08- 41°13	6662,75	7,8-7,4	8,3-11,3
Тикрит	34°35-43°37	6530,00	7,8-7,4	8,3-11,3
Киркук	35°28-44°21	6660,17	6,6-7,8	9,4-11,2
Заху	37°08- 42°50	6835,46	6,1-6	7,4-11

С использованием данных табл. 3.1 в работе выполнено исследование солнечного энергетического потенциала регионов Ирака, а также разработка математической модели 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. 3.2. и 3.3 приведены исходные и нормированные характеристики провинций Ирака соответственно [34,82,94].

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

$$\text{Рейтинг} = S_{av} * C_w^s + I_{av} * C_w^l + L_{city} * C_w^l + S_{gas} * C_w^s + A_{free} * C_w^A, \quad (3.1)$$

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;  $C_w^l$

– 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.

Таблица 3.2 - Характеристики провинций Ирака. Исходная информация

Провинция	Свободная площадь, км <sup>2</sup>	Электропотребление, МВт	Среднегодовая солнечная радиация, кВтч/м <sup>2</sup>	Мощность газовых станций, МВт	Среднегодовой световой день, ч
Эльанбар	122000	433	2300	250	10
Вавилон	4000	650	2000	220	10
Эльбасра	17888	2805	2120	3750	11
Дикар	11500	993	2150	500	10,7
Кадисия	7500	515	2150	500	10,4
Дияля	16200	572	1900	740	9,8
Карбаля	4100	703	2250	250	10,5
Киркук	7200	672	1850	1174	8,5
Мисан	15000	593	2050	620	10,7
Мутана	50500	403	2300	500	11
Наджаф	27000	673	2280	820	10,4
Мосул	30500	706	1800	0	8,2
Васит	14500	700	1900	125	10,6
Саладин	19700	462	1900	1014	8,6
Сулеймания	10500	2200	1800	1500	7
Эрбил	11000	1700	1800	1500	7
Доход	5000	990	1850	500	7

Весовые коэффициенты математической модели (3.1) определяются на основе экспертизы. Для обработки экспертной информации в работе предложено использовать метод парных сравнений [108].

На основе этого метода будут получены весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого фактора.

Для экспертизы привлечены ряд экспертов из Ирака (Northern technical university, Baghdad university, Wassit university, Anbar university) и России (ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»).

Таблица 3.3 - Характеристики провинций Ирака. Нормированные значения

Провинция	Свободная площадь, о.е.	Электропотребление, о.е.	Среднегодовая солнечная радиация, о.е.	Мощность газовых станций, о.е.	Среднегодовой 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
Суляймания	0,0281	0,1395	0,0523	0,1074	0,0434
Эрбил	0,0294	0,1078	0,0523	0,1074	0,0434
Доходок	0,0134	0,0628	0,0538	0,0358	0,0434
Итого	1	1	1	1	1

Экспертам было предложено заполнить анкету методом выставления оценок. Анкетирование выполнено с помощью Google Forms (рисунки 3.2- 3.3). 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.

## Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

Предлагаем вашему вниманию анкету для получения экспертного заключения. Целью данной экспертизы является получение точных мнений группы экспертов в области инженерии возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии. В этой экспертизе рассматриваются пять наиболее важных факторов определения оптимального места размещения проектируемых гибридных (газовые/солнечные) электростанций для определения влияния (значимости) каждого фактора на итоговое решение.

В этой процедуре сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор А более предпочтителен, чем фактор Б, то оценка  $A=1$ , а  $B=0$ .

Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, факторы равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом:  $A=B=0,5$ .

\* Обязательно

Рисунок 3.2 - Анкета эксперта. Вводная часть

Электропотребление --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать
▼

Мощность существующих газовых электростанций --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать
▼

Отправить

Рисунок 3.3 - Анкета эксперта. Пример сравнения факторов

При реализации метода сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор  $A_i$  более предпочтителен, чем фактор  $A_j$ , то оценка  $V_i=1$ , а  $V_j=0$ .

Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, т. е.  $i$ -й и  $j$ -й фактор равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом:

$$V_i = V_j = 0,5.$$

Результаты сравнения заносятся в матрицу парных сравнений. Пример такой матрицы показан в таблице 3.4. Матрица является квадратной с незаполненной главной диагональю, так как сравнение фактора с самим собой не имеет смысла. Оценка факторов экспертом осуществляется по горизонтали.

Таблица 3.4 - Оценка факторов экспертом

факторы	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	Сумма
$A_1$	-	0,5	1	1	1	3,5
$A_2$	0,5	-	1	1	1	3,5
$A_3$	0	0	-	0,5	0,5	1
$A_4$	0	0	0,5	-	0,5	1
$A_5$	0	0	0,5	0,5	-	1

Приведенная в табл. 3.4 матрица отвечает следующим результатам сравнения:

- фактор  $A_1$  равно предпочтителен  $A_2$ , и более предпочтителен, чем  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ ;
- фактор  $A_2$  равно предпочтителен  $A_1$ , и более предпочтителен, чем  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ ;
- фактор  $A_3$  менее предпочтителен, чем  $A_1$ ,  $A_2$  и равно предпочтителен  $A_4$ ,  $A_5$ ;
- фактор  $A_4$  менее предпочтителен, чем  $A_1$ ,  $A_2$  и равно предпочтителен  $A_3$ ,  $A_5$ ;

- фактор  $A_5$  менее предпочтителен, чем  $A_1, A_2$  и равно предпочтителен  $A_3, A_4$ .

Полученные матрицы парных сравнений в результате анкетирования приведены на рисунке 3.4, где  $A_1-A_5$  – это среднегодовой световой день, среднегодовая солнечная радиация, электропотребление, мощность существующих газовых электростанций, свободная площадь для размещения солнечной электростанции соответственно.

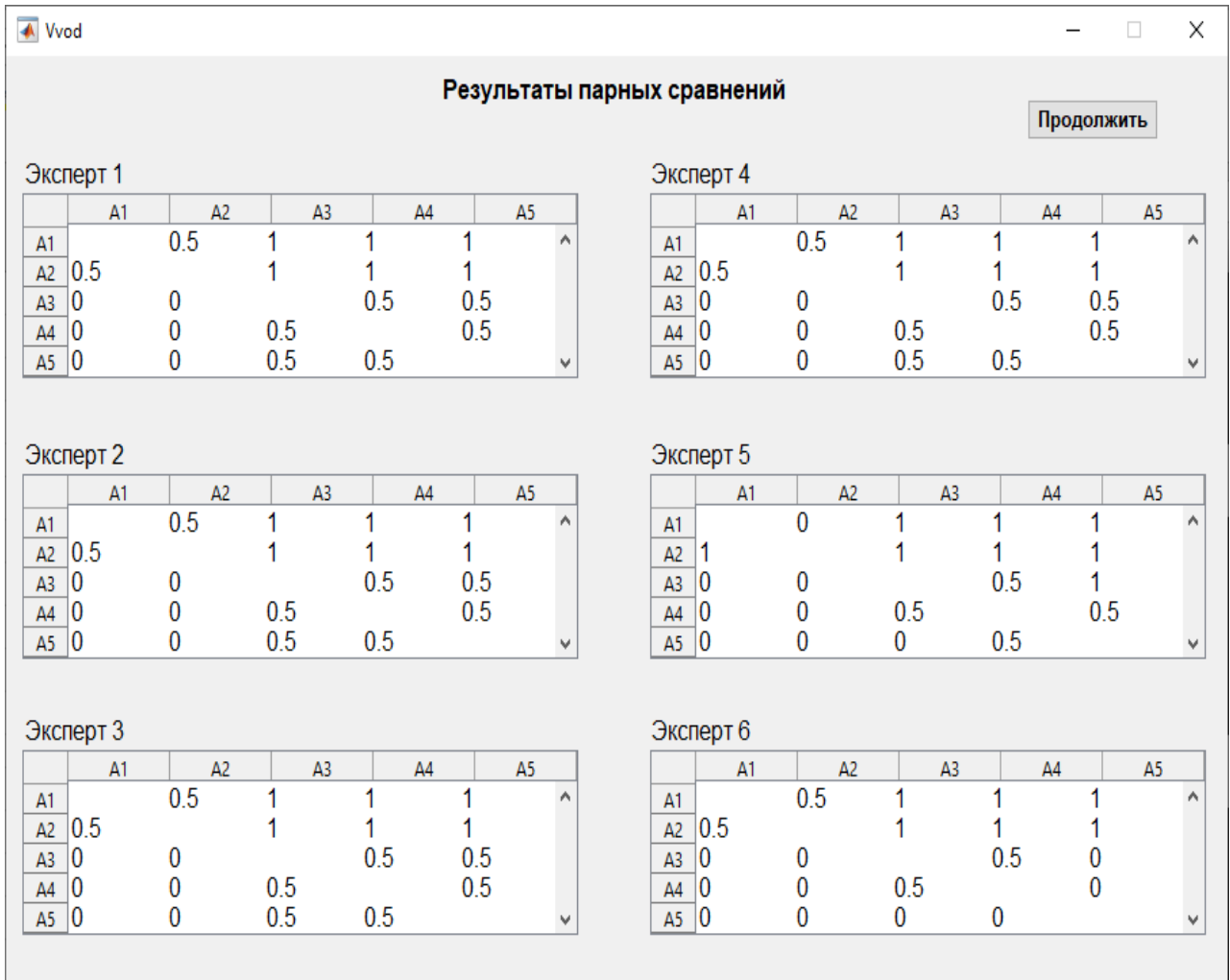


Рисунок 3.4 - Результаты парных сравнений

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

На основании данных экспертизы был произведен расчет коэффициента согласованности согласно следующему алгоритму

- математическое ожидание оценки  $i$ -го фактора

$$M(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{m}, \quad (3.2)$$

где  $A_{ij}$  – оценка  $j$ -го эксперта по  $i$ -му фактору;  $m$  – общее количество экспертов;

- дисперсия оценки  $i$ -го фактора

$$D(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (A_{ij} - M(A_i))^2}{m-1} \quad (3.3)$$

- среднее квадратическое отклонение оценки  $i$ -го фактора

$$\sigma(A_i) = \sqrt{D(A_i)} \quad (3.4)$$

- коэффициент согласованности экспертов по  $i$ -му фактору

$$\mu(A_i) = 1 - \frac{\sigma(A_i)}{M(A_i)} \quad (3.5)$$

Алгоритм расчета коэффициента конкордации приведен ниже

- суммарный ранг  $i$ -го фактора

$$R_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad (3.6)$$

- математическое ожидание рангов

$$T = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{n} \quad (3.7)$$

- отклонение  $i$ -го фактора

$$\Delta_i = R_{i\Sigma} - T \quad (3.8)$$

- сумма квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2 \quad (3.9)$$

- коэффициент конкордации

$$W = \frac{S}{S_{max}} \quad (3.10)$$

где

$$S_{max} = 1/12 * m^2 n(n^2 - 1) \quad (3.11)$$

Результаты расчетов приведены на рисунке 3.5.

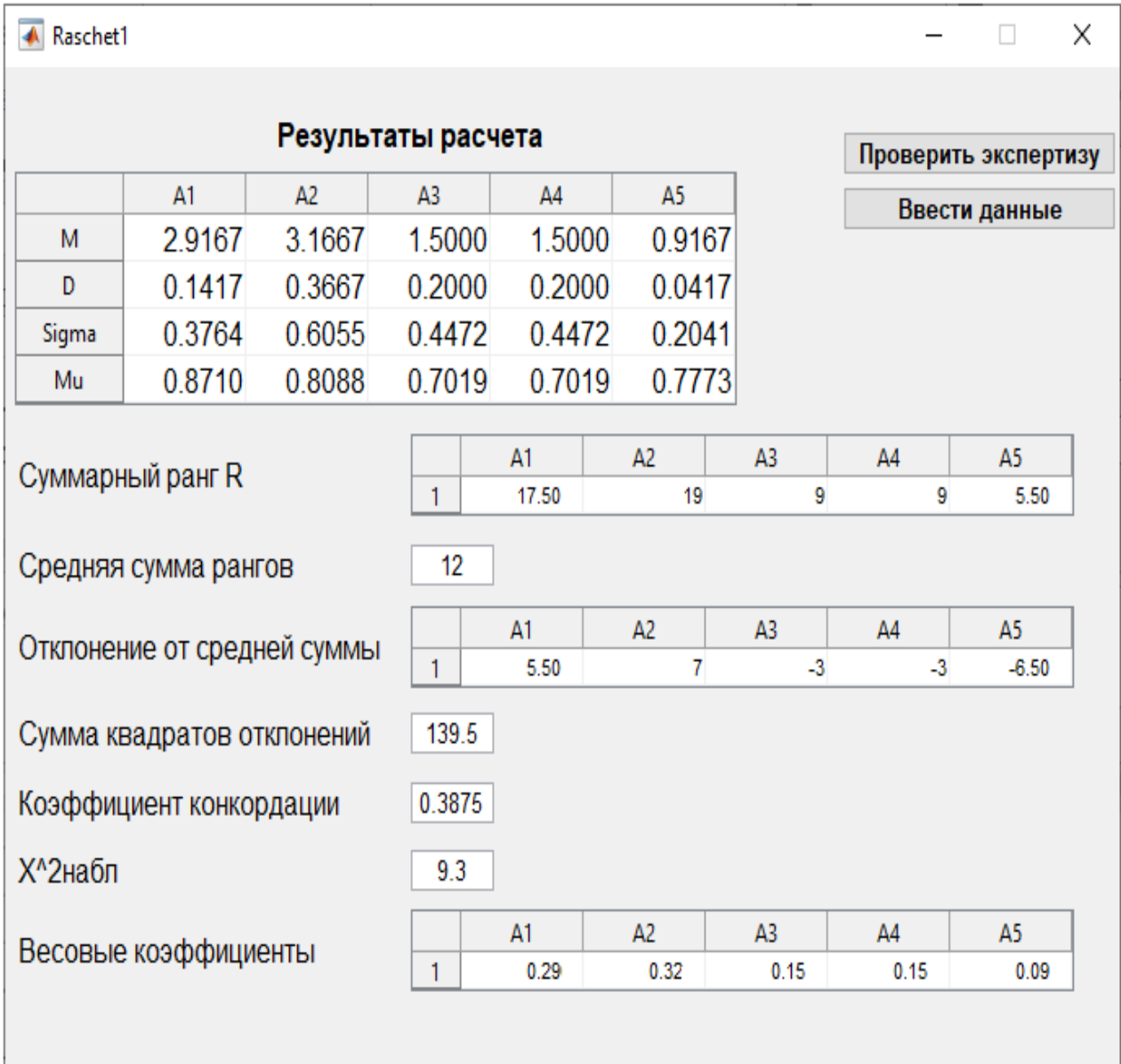


Рисунок 3.5 - Оценка согласованности мнений экспертов

Как видно на рисунке 3.5, коэффициент согласованности всех факторов не меньше общепринятого граничного значения (0,7-0,8), что соответствует согласованному мнению экспертов по всем факторам.

После получения окончательных значений коэффициентов в пределах допустимого диапазона проводятся процедуры, связанные с соответствиями полученных результатов.



Проверим полученный коэффициент конкордации на статистическую значимость по критерию  $\chi^2$ -Пирсона. Согласно данным рисунку 3.5 наблюдаемое значение критерия  $\chi^2$ -Пирсона

$$\chi^2_{\text{набл}}=9,3$$

Для оценки статистической значимости необходимо и достаточно, чтобы выполнялось следующее условие

$$\chi^2_{\text{набл}} > \chi^2_{\text{табл}} \quad (3.12)$$

где  $\chi^2=f(r,\alpha)$ ,  $\alpha$  – уровень значимости,  $r$  – число степеней свободы, равное  $n-1$ .

Если условие выполняется, значит, полученная величина степени согласованности мнений экспертов будет неслучайным значением. В противном случае экспертиза считается несостоявшейся.

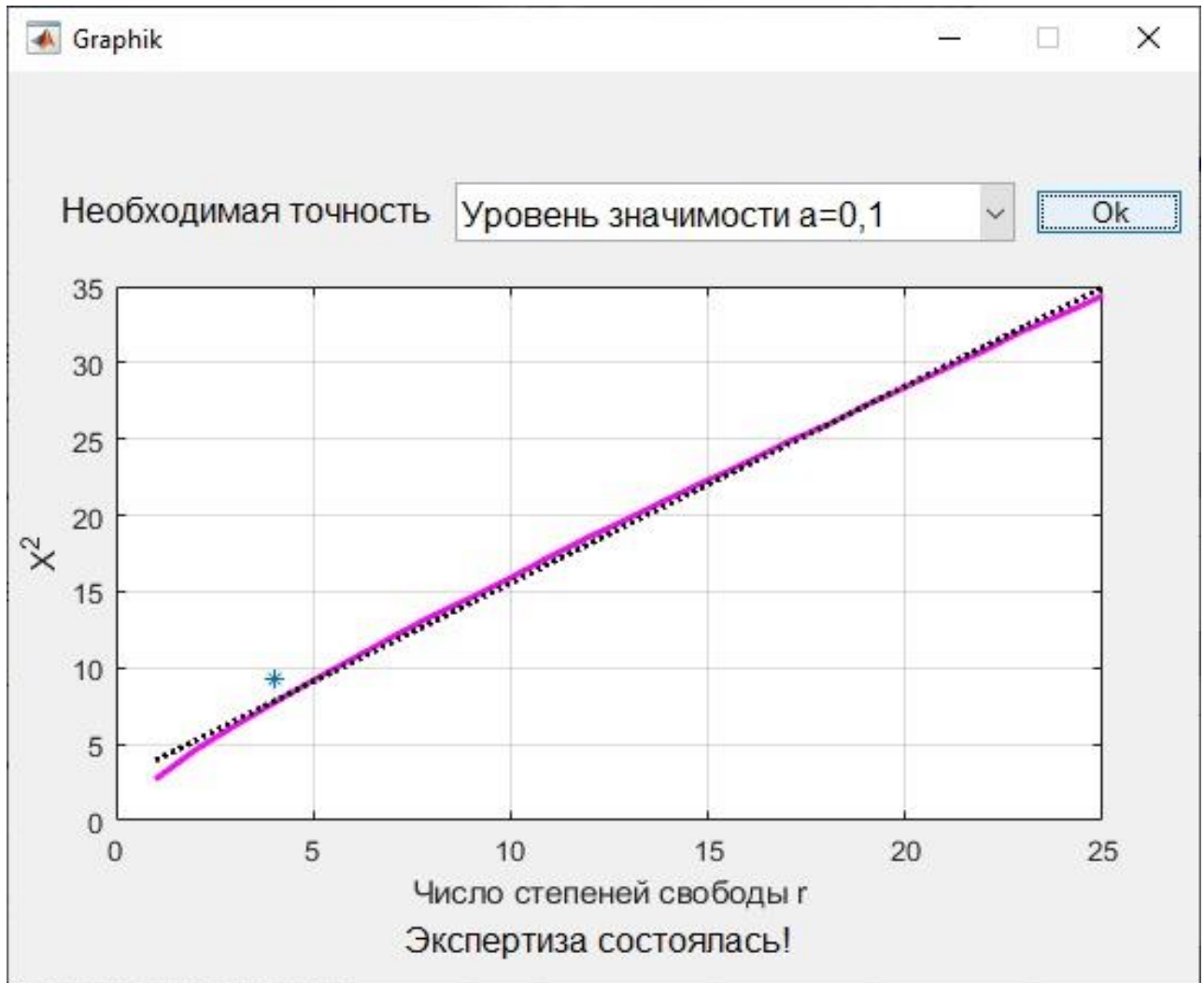


Рисунок 3.6 - Проверка по критерию  $\chi^2$ -Пирсона

На рисунке 3.6 приведена зависимость, соответствующая распределению табличного значения  $\chi^2_{\text{табл}}$  при уровне значимости  $\alpha=0,1$ . Как видно, условие выполняется, полученная величина степени согласованности мнений экспертов неслучайное значение, экспертиза считается состоявшейся.

По полученным индивидуальным оценкам экспертов можно перейти к групповым оценкам – весовым коэффициентам каждого из рассматриваемых факторов согласно

$$C_w^i = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij}}, \quad (3.13)$$

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

$$\text{Рейтинг} = 0,29S_{av} + 0,32I_{av} + 0,15L_{city} + 0,15S_{gas} + 0,09A_{free} \quad (3.14)$$

С использованием математической модели (3.14) был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения гибридных станций с комбинированным циклом. Результаты сравнения как по отдельным факторам, так и для итогового рейтинга провинций Ирака приведены на рисунках 3.7-3.12.

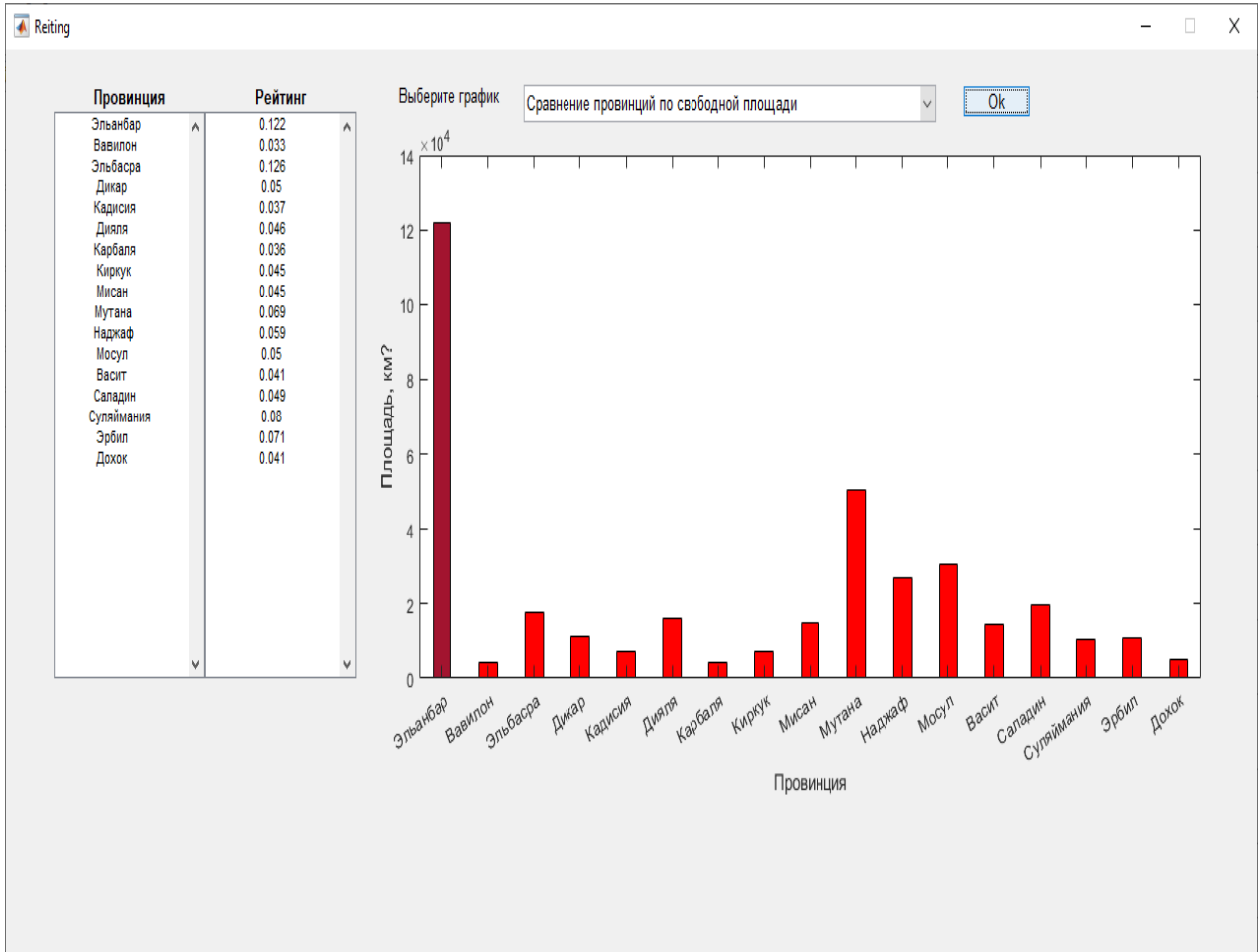


Рисунок 3.7 - Сравнение провинций Ирака по свободной площади для размещения солнечной электростанции

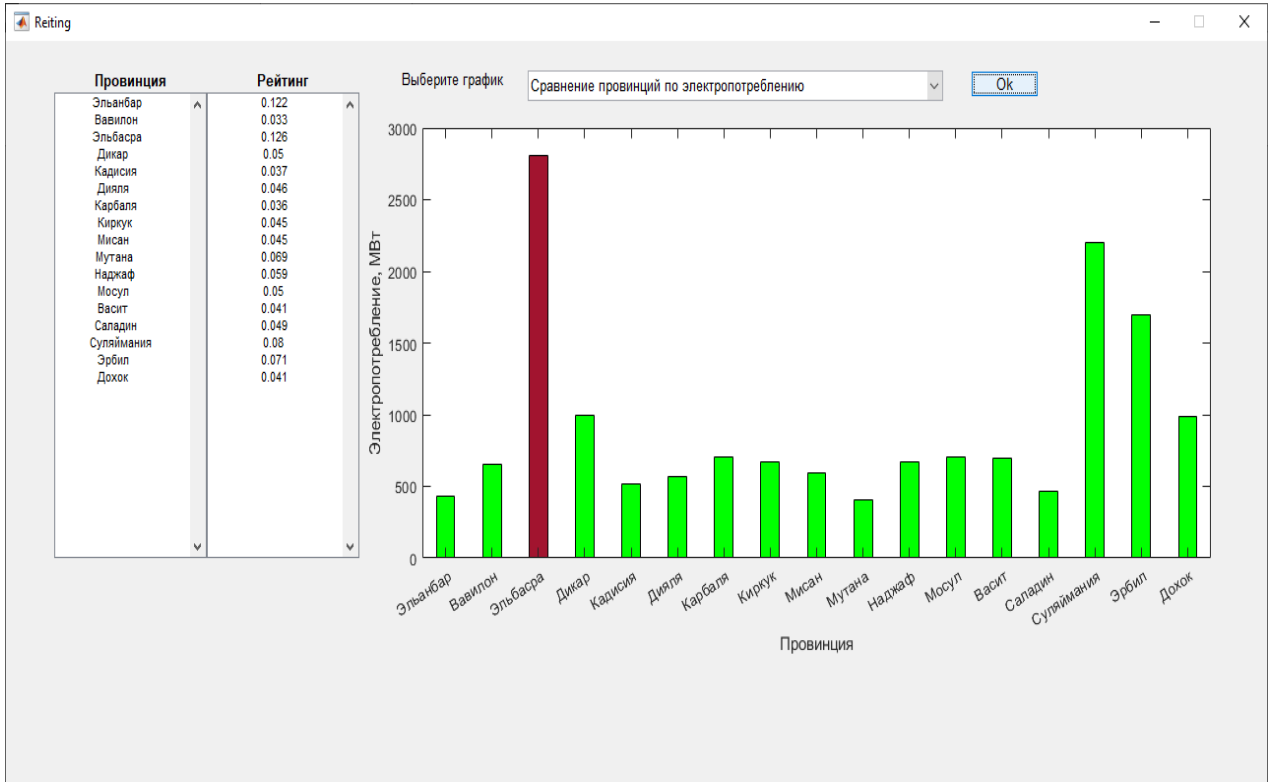


Рисунок 3.8 - Сравнение провинций Ирака по уровню электропотребления

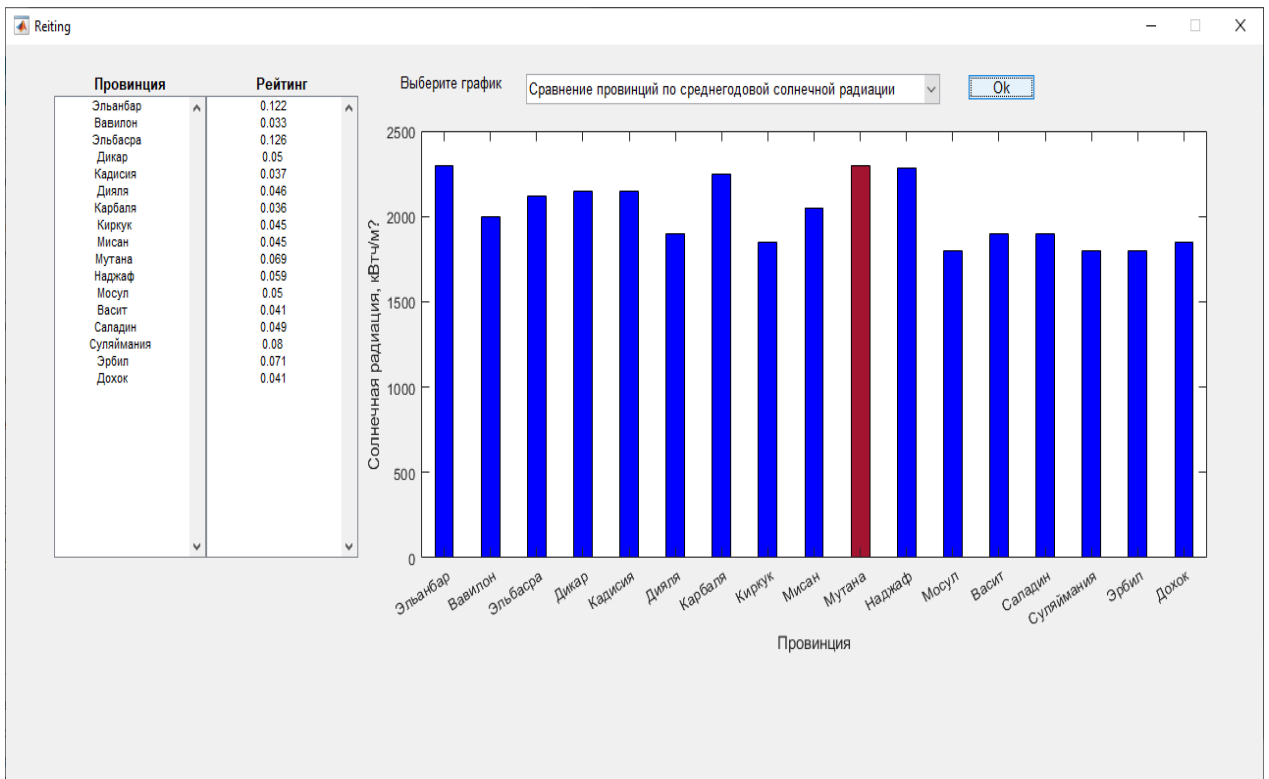


Рисунок 3.9 - Сравнение провинций Ирака по уровню среднегодовой солнечной радиации

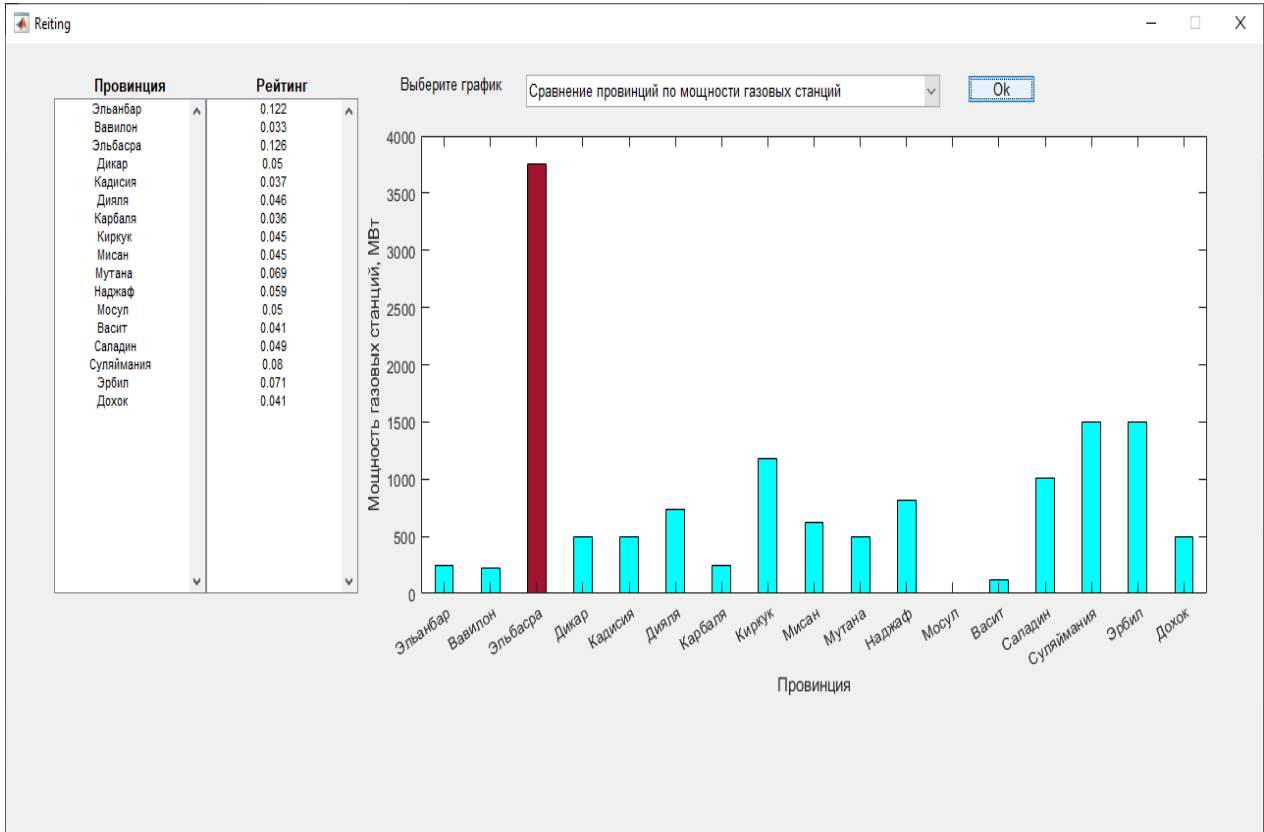


Рисунок 3.10 - Сравнение провинций Ирака по мощности существующих газовых станций

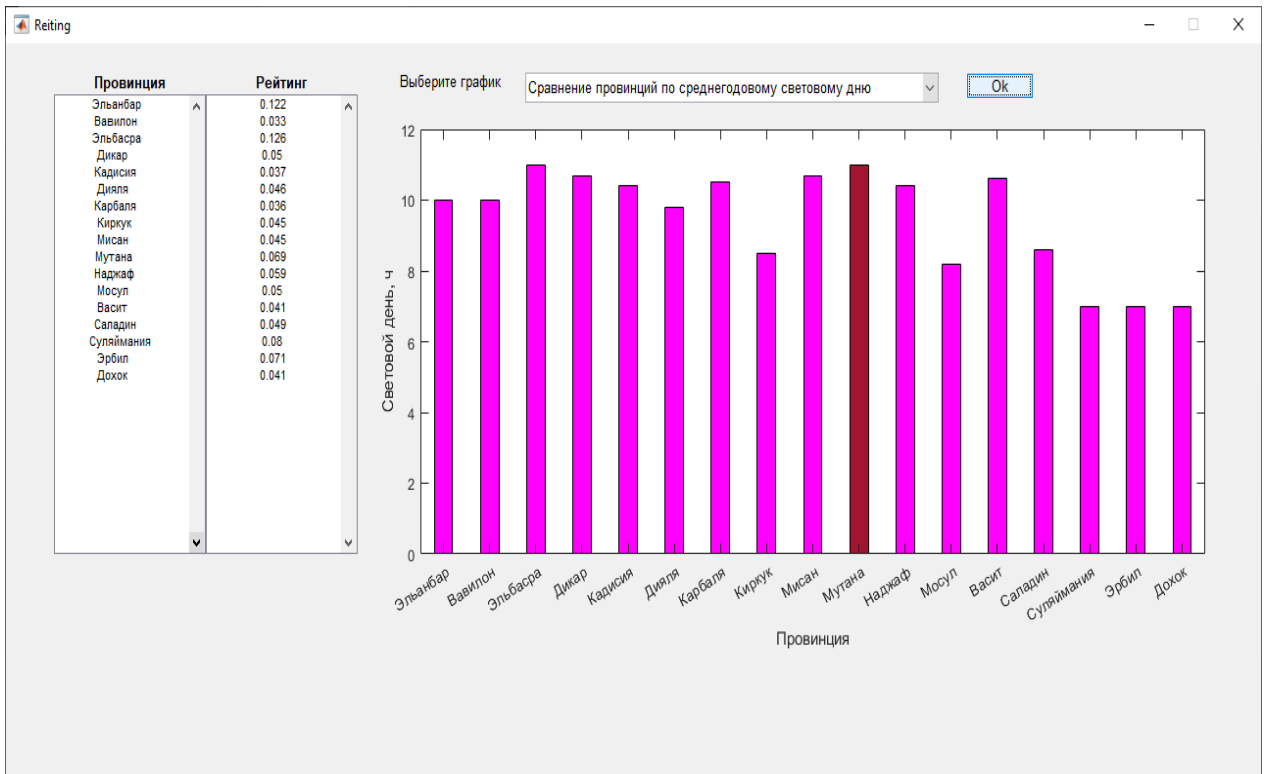


Рисунок 3.11 - Сравнение провинций Ирака по продолжительности среднегодового светового дня

Как видно на рисунках 3.7-3.11, при относительно близких значениях факторов, характеризующих солнечный энергетический потенциал провинций Ирака, Эльбасра характеризуется существенно большим уровнем электропотребления региона, так и более развитой инфраструктурой. Это, в целом, и предопределяет наибольший итоговый рейтинг среди всех провинций Ирака как оптимальный регион для размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом (рисунок 3.12). Данная математическая модель (3.14) может использоваться при дальнейшей локализации решения задачи, например, при рассмотрении наилучших условий для строительства гибридной электростанции уже в пределах провинции и т.д.

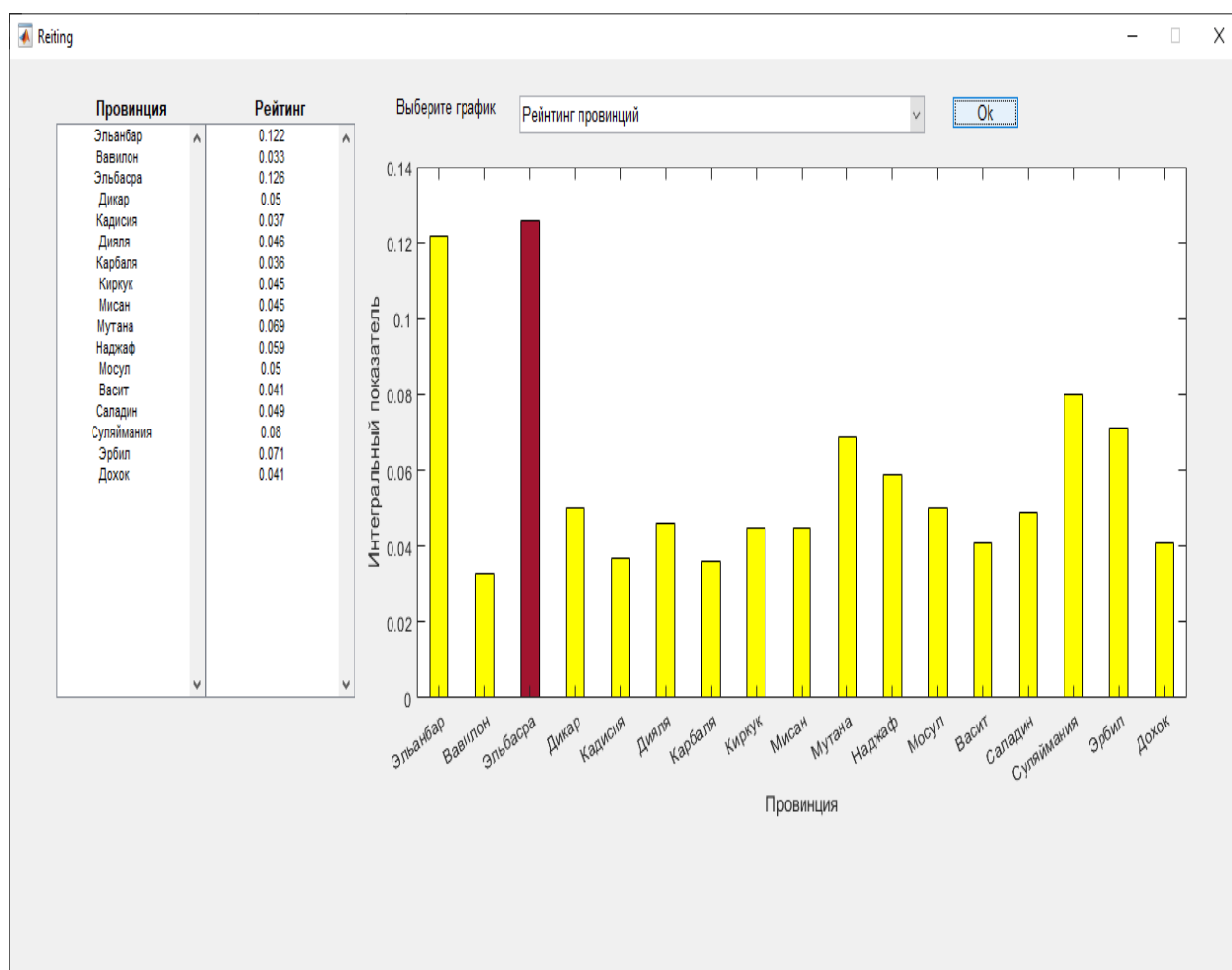


Рисунок 3.12 - Итоговый рейтинг провинций Ирака

### **3.3 Разработка математической модели оценки эффективности гибридной электростанции с комбинированным циклом**

В ходе анализа полученных результатов был выбран тип станции ISCCS и г. Басра как имеющий максимальный итоговый рейтинг среди всех городов и провинций Ирака.

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).

Основными компонентами гибридной электростанции с комбинированным циклом (ISCCS) являются газотурбинный агрегат, паротурбинный агрегат, парогенератор с рекуперацией тепла и солнечное поле, которое в основном состоит из солнечных коллекторов и солнечного парогенератора.

Принцип работы газовой части является типовым для электростанций с комбинированным циклом. Отходящие газы газовой турбины используются для выработки пара в рекуператоре для привода паровой турбины, который дополняется паром, вырабатываемым солнечным парогенератором. Таким образом, часть питательной воды предварительно нагревается в экономайзере перед поступлением в солнечный парогенератор, где она преобразуется в насыщенный пар. Этот насыщенный пар возвращается в рекуператор, где он перегревается отходящими газами газовой турбины.

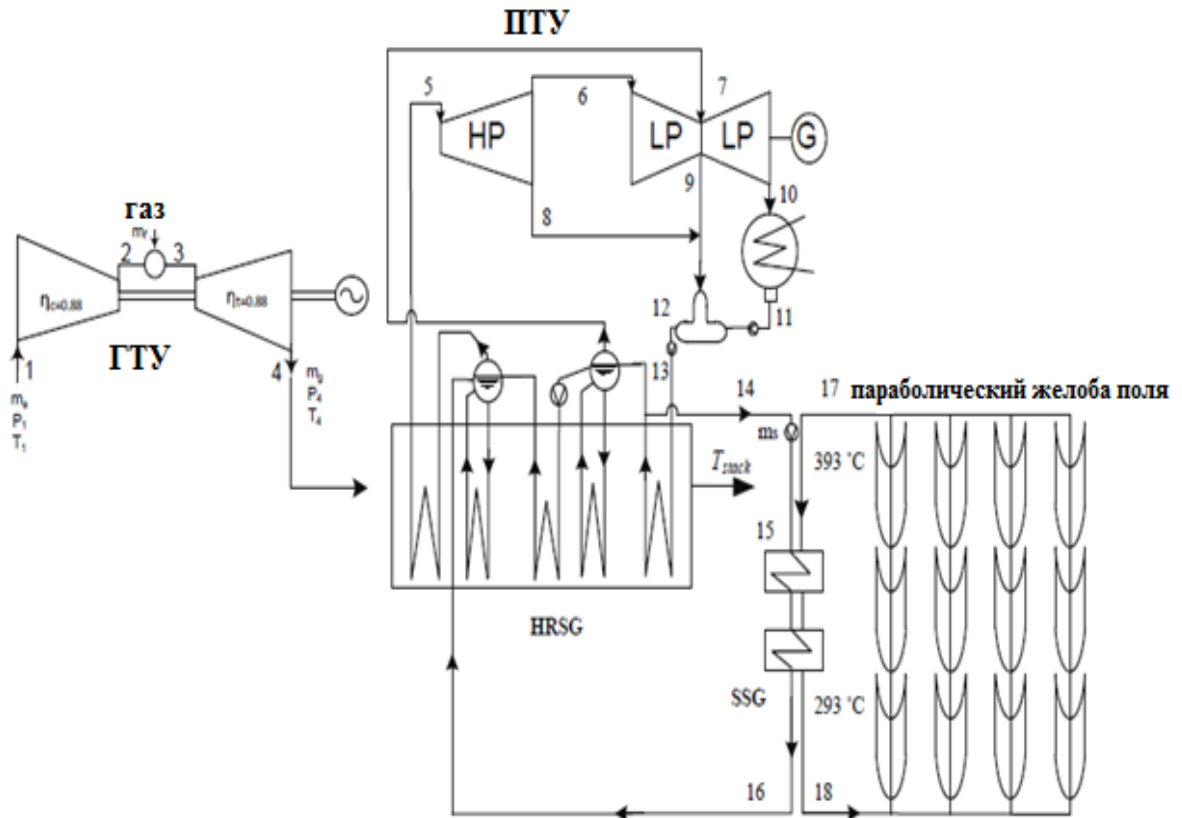


Рисунок 3.13 - Схема включения солнечных коллекторов в парогазовый цикл электростанции и пример ГТУ с полем солнечных коллекторов

Таблица 3.5 – Паровой генератор с рекуперацией тепла (HRSG)

№	Состояние	Фаза	Масса, кг/с	Давление, кПа	Температура, К
1	Воздух	-	200	101.3	288
2	Воздух	-	200	1570	647.5
3	газ	-	205	1539	1530
4	газ	-	205	101.3	893.6
5	вода	перегретый пар	97.65	9000	823
6	вода	перегретый пар	92.76	1100	553
7	вода	перегретый пар	16.84	650	503
8	вода	перегретый пар	4.882	1100	553
9	вода	перегретый пар	5.052	250	400



Продолжение таблицы 3.5

№	Состояние	Фаза	Масса, кг/с	Давление, кПа	Температура, К
10	вода	насыщенный пар	104.6	10	319
11	вода	конденсированная вода	104,6	10	319
12	вода	конденсированная вода	114.5	250	400.6
13	вода	конденсированная вода	57.24	650	400.6
14	вода	конденсированная вода	31.59	650	435.1
15	вода	конденсированная вода	31.59	9500	435.1
16	вода	насыщенный пар	31.59	9250	578.5
17	теплоноситель	насыщенный	306.6	1000	668
18	теплоноситель	насыщенный	306.6	1000	668
19	теплоноситель	насыщенный	306.6	217	568
20	теплоноситель	насыщенный	306.6	217	568

Паровой генератор с рекуперацией тепла (HRSG) состоит из 4-х основных компонентов:

1- Экономайзер элемент котлоагрегата, теплообменник, в котором питательная вода перед подачей в котёл подогревается уходящими из котла газами. При давлении до 22 кгс/см<sup>2</sup> (2,2 МПа) и температуре питательной воды ниже точки росы дымовых газов или недеаэрированной воде экономайзер изготавливают из гладких или ребристых чугунных труб, на более высокие давление и температуру — из стальных, преимущественно гладких, труб. Устройство повышает КПД установки.

2- Испаритель теплообменный аппарат, в котором осуществляется процесс фазового перехода жидкого теплоносителя в

парообразное и газообразное состояние за счёт подвода от более горячего теплоносителя. Таким горячим теплоносителем обычно являются вода, воздух, рассол или газообразные, жидкие или твердые технологические продукты. Когда процесс фазового перехода происходит на поверхности жидкости, то это называется испарением. Если процесс происходит на всей глубине жидкости с образованием паровых пузырьков, то это называется кипением. Фазовый переход может происходить как с однородной жидкостью, так и со смесью жидких компонентов. Испарители различаются по характеру происходящих в них процессов, а также по их назначению, и они при этом обычно имеют свои названия.

3- Пароперегреватель устройство, предназначенное для перегрева пара, то есть повышения его температуры выше точки насыщения. Использование перегретого пара позволяет значительно поднять КПД паровой установки. Перегретый пар широко применяется для питания турбин на тепловых электростанциях, с начала XX века использовался на всех типах паровозов. Также были разработаны проекты ядерных реакторов, где часть технологических каналов должны были использоваться для перегрева пара перед подачей в турбины (подробнее см. в статье РБМК).

Основной и промежуточный пароперегреватели Основной и промежуточный пароперегреватели повышают температуру насыщенного или близкого к состоянию насыщению пара до состояния перегрева для повышения термодинамической эффективности цикла Ренкина. Это кожухотрубные теплообменники, основным отличием которых является рабочее давление. В пароперегревателе тепловая энергия подводится к пару, чтобы довести его до перегретого состояния. В промежуточном пароперегревателе пар на выходе из турбины высокого давления повторно перегревается, чтобы избежать проблем с качеством пара в турбине низкого давления.

Жидкий теплоноситель (НТФ), идущий от солнечной энергоустановки, проходит в межтрубном пространстве теплообменника. Движение теплоносителей происходит по схеме противотока.

Максимальная теплоотдача в теплообменнике достигается, когда пар нагревается до температуры входной горячей жидкости теплоносителя, или когда он охлаждается до температуры входящего пара. Эти два граничных условия не могут быть достигнуты одновременно, если теплоемкости НТФ и пара не являются идентичными ( $C_{\text{НТФ}} = C_{\text{steam}}$ ).

4- Подогреватели питательной воды горячие отходящие газы из газотурбинной установки направляются в котел-утилизатор двойного давления. Для упрощения анализа в данном исследовании паротурбинная установка состоит из парового генератора с рекуперацией тепла двойного давления, паровых турбин высокого и низкого давления, конденсатора, водяных насосов и деаэратора. Предполагается, что в рекуператоре тепло от отходящих газов достаточно для повышения температуры питательной воды до температуры насыщения, преобразования воды в насыщенный пар и его перегрева. Образующиеся перегретые пары направляются в паровую турбину.

Солнечная парогенераторная установка (солнечный парогенератор)

Солнечная энергия поглощается параболическим желобом солнечного поля. Теплоносителем является разновидность синтетического масла. Dowtherm А или Therminol VP-1 - наиболее распространенные теплоносители, которые успешно используются в параболоцилиндрических солнечных системах. Диапазон рабочих температур таких теплоносителей составляет от 293°C до 393°C. Таким образом, тепло, поглощаемое полем солнечных коллекторов, используется для производства насыщенного пара высокого давления. Затем этот пар возвращается в рекуператор, где он перегревается отходящими газами газовой турбины. Клапаны между ними остаются закрытыми до тех пор, пока теплоноситель не достигнет своей рабочей температуры. В это время часть питательной воды отводится из рекуператора в экономайзер, где она

преобразуется в насыщенный пар, и возвращается в рекуператор для перегрева. В настоящем исследовании предполагается, что питательная вода предварительно нагревается в экономайзере, чтобы максимизировать рекуперацию энергии от отходящих газов, что обычно используется в большинстве современных систем с комбинированным циклом.

Уравнения баланса энергии для парогазового цикла написаны и решены с использованием программного обеспечения Engineering equation solver software (EES).

Решение реализовано на базе итеративного подхода. Уравнения, используемые для анализа ГТУ и ПТУ, а также полезный прирост тепловой мощности от использования DSG определяется по методике, приведенной в [82,109].

Основу предложенной модели оценки эффективности гибридной электростанции с комбинированным циклом составляют следующие математические зависимости:

$$K_{\theta} = 1 - 6,74e(-5) \cdot \theta^2 + 1,64e(-6) \cdot \theta^3 - 2,51e(-8) \cdot \theta^4, \quad (3.15)$$

$$Q_u = F_R \cdot (A_a \cdot \text{DNI} \cdot \cos(\theta) \cdot \eta_{\text{optical}} \cdot K_{\theta} - A_r \cdot U_{\text{abs}} \cdot (T_r - T_a)), \quad (3.16)$$

$$W_{\text{ISCCS}} = W_{\text{GT}} + W_{\text{th.T}}, \quad (3.17)$$

$$W_{\text{th.T}} = W_{\text{solar}} + W_{\text{th(GT)}}, \quad (3.18)$$

$$\eta_{\text{ISCCS}} = W_{\text{ISCCS}} / W_{\text{in}}, \quad (3.19)$$

$$F_{\text{solar}} = W_{\text{solar}} / W_{\text{ISCCS}}, \quad (3.20)$$

где  $Q_u$  – полезный отпуск тепла,  $F_R$  – коэффициент отвода тепла,  $A_a$  – площадь апертуры,  $\text{DNI}$  – прямая нормальная инсоляция,  $K_{\theta}$  – характеристика угла наклона,  $A_r$  – площадь абсорбера,  $U_{\text{abs}}$  – тепловые потери в абсорбере,  $T_r$  – температура абсорбера,  $T_a$  – температура окружающей среды,  $W_{\text{ISCCS}}$  – мощность гибридной электростанции,  $W_{\text{GT}}$  – мощность газовой турбины,  $W_{\text{thT}}$  – общая мощность паровой схемы,  $W_{\text{th(GT)}}$  – мощность парогенератора на отходящих газах,  $W_{\text{solar}}$  – мощность солнечной установки,  $\theta$  – угол наклона,  $\theta_z$

– угол зенита,  $\eta$  – эффективность (КПД).

Для Ирака характерны очень высокие температуры в летние месяцы (до  $+52^{\circ}\text{C}$ ) и умеренные – зимой, зафиксированная абсолютная минимальная температура в январе составляла  $+4^{\circ}\text{C}$  [109-111].

Скорость ветра ниже средней и колеблется от 2,5 м/с в декабре-январе до 4,1 м/с в июле. Ирак расположен недалеко от экватора. Периоды ясного времени в году колеблются от 2800 до 3300 часов в год. В ходе моделирования использовались статистические данные солнечной радиации в районе между Басрой и Нассирией за 2017 год, а также опыт предыдущих исследований [112-116] (табл.4.6).

Таблица 3.6 - Солнечная радиация, кВтч/м<sup>2</sup>

Широта	Долгота	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее
30,25	46,25	3,54	4,42	5,22	6,02	6,99	8,97	7,93	7,07	6,36	5,04	3,52	3,29	5,57
30,25	47,25	3,44	4,12	5,06	5,86	6,96	8,91	7,97	7,00	6,31	4,99	3,52	3,21	5,47
30,25	48,25	3,27	4,16	5,02	5,67	6,95	8,87	7,98	6,90	6,28	4,98	3,52	3,14	5,41
31,25	46,75	3,18	4,24	5,05	5,67	6,74	8,87	7,91	6,94	6,19	4,83	3,22	3,03	5,35
31,25	47,25	3,13	4,13	5,06	5,61	6,90	8,82	7,90	6,87	6,16	4,85	3,31	3,01	5,33
31,25	48,25	3,14	4,14	5,09	5,68	7,01	8,94	7,97	6,63	6,19	4,94	3,41	3,09	5,37

### 3.4 Анализ результатов моделирования

Для города Басра выполнена климатическая выборка для марта, июня, сентября и декабря. На рисунке 3.14. представлена прямая нормальная инсоляция (DNI), которая, как видно, была наиболее высокой в полдень в июне (более  $800\text{ Вт/м}^2$ ) и наименьшей в декабре (около  $400\text{ Вт/м}^2$ ) [37].

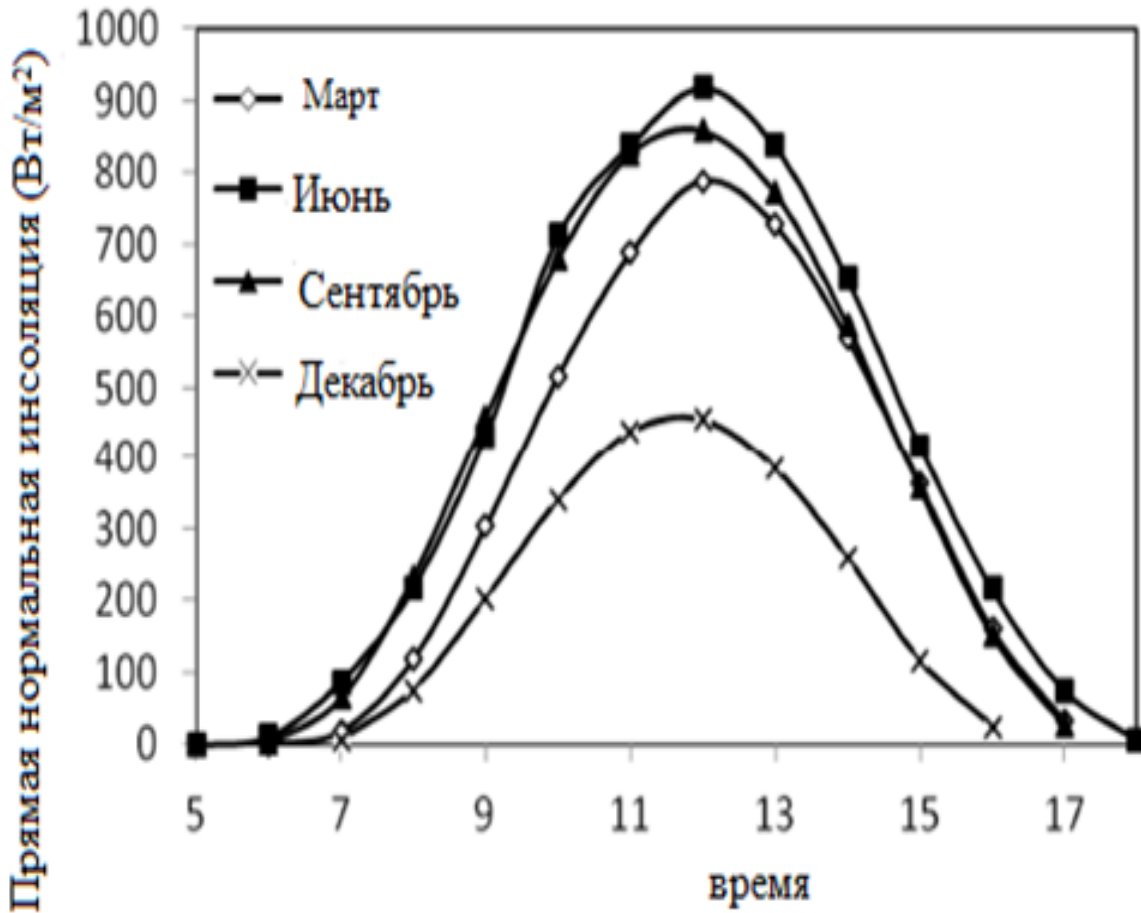


Рисунок 3.14 - Прямая нормальная инсоляция

Ожидаемая производительность солнечной станции приведена на рисунке 3.15. Мощность, генерируемая солнечными коллекторами, указана на вертикальной оси графика. Как видно, генерируемая мощность в июне выше, чем в декабре, что связано с низким DNI зимой.

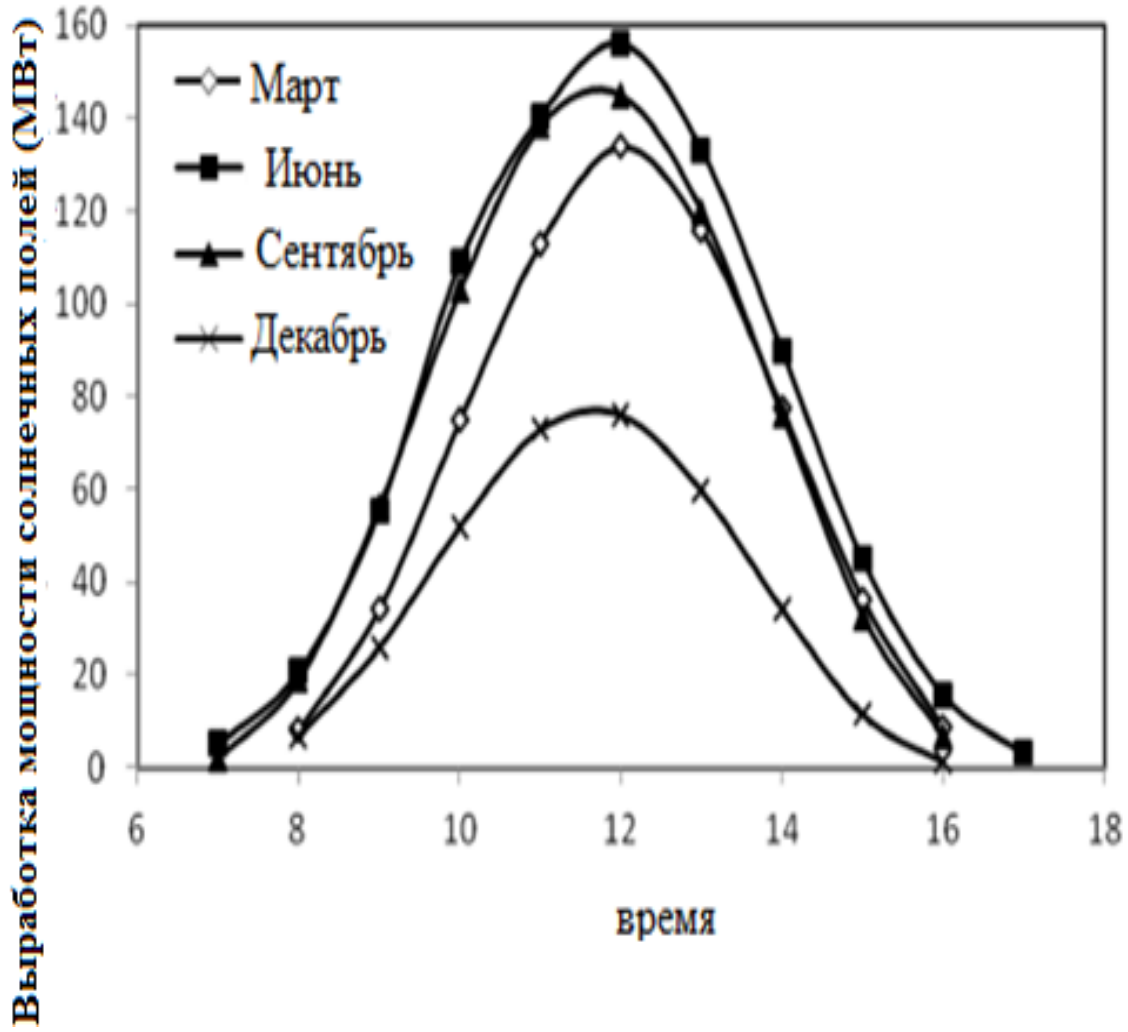


Рисунок 3.15 - Выработка мощности солнечных полей (МВт)

Результат интегрального энергетического анализа предлагаемых установок, представлен на рисунке 3.16.

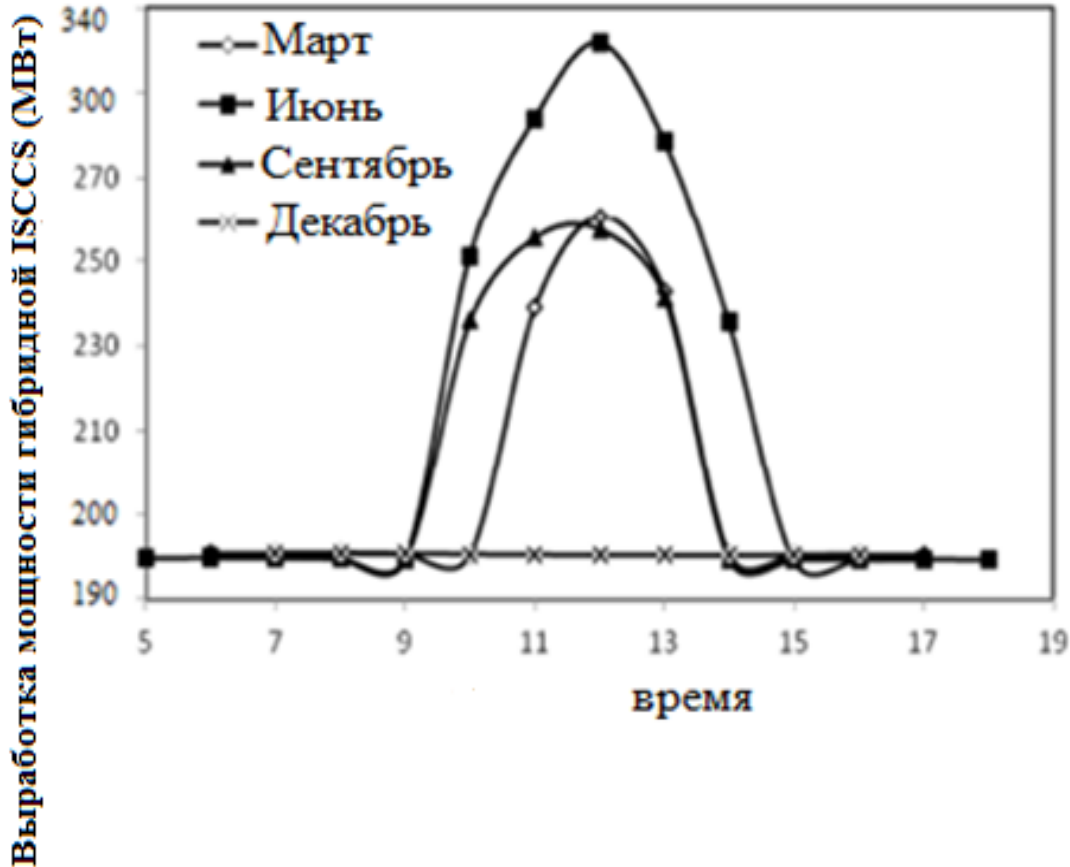


Рисунок 3.16 - Выработка мощности гибридной электростанции ISCCS

Пик вырабатываемой мощности приходится на период с 9 до 15 часов, что совпадает с пиком потребления. Как видно из графика, 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 комбинированного цикла от 38 до 55%, как показано на рисунке 3.17.



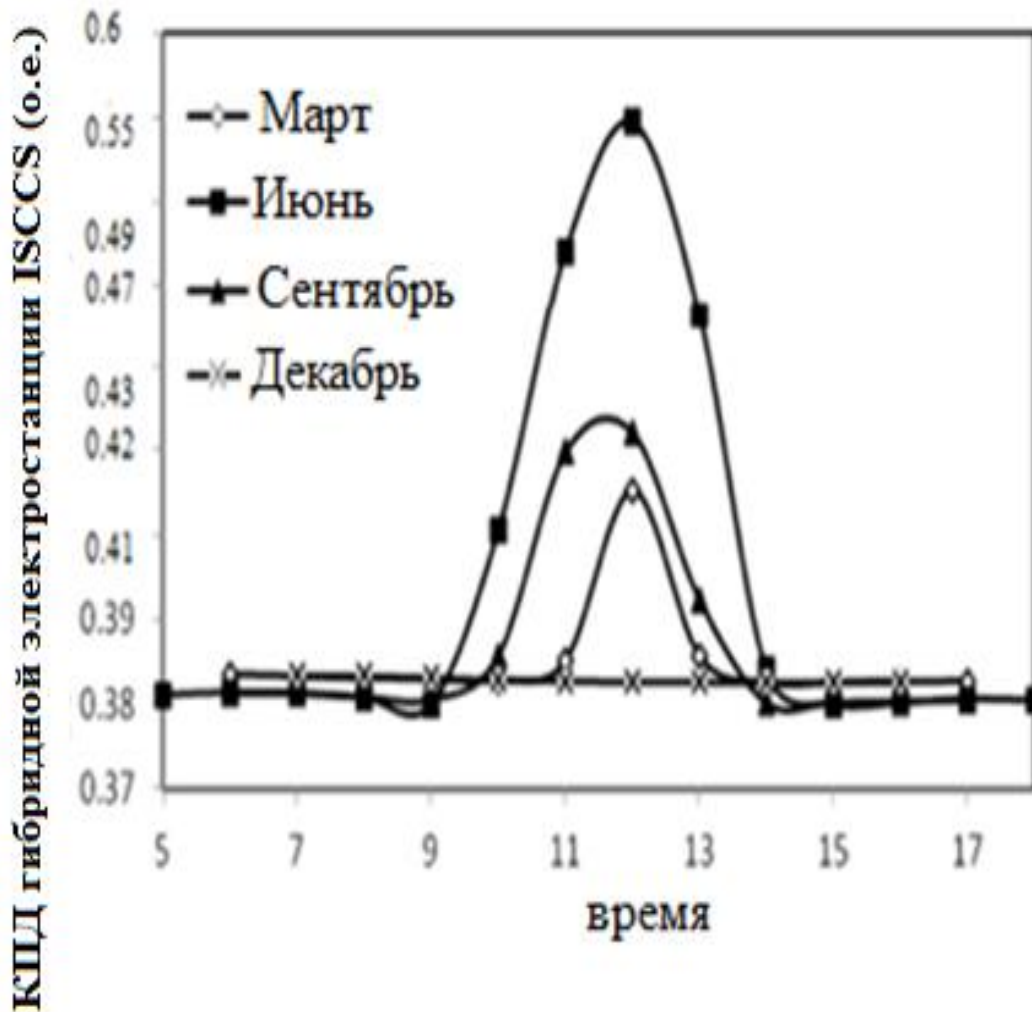


Рисунок 3.17 - КПД гибридной электростанции ISCCS (о.е.)

Процент мощности, производимой за счет преобразования солнечной энергии (названной солнечной фракцией) представлен на рисунке 3.18. Как было показано на рисунке 3.15, уровень солнечной энергии в декабре низкий. Поэтому кривая за декабрь не представлена на рисунке 3.18. В полдень в июне месяце солнечная фракция может составлять 25% (при DNI не менее 800 Вт/м<sup>2</sup>), что технико-экономически является приемлемым результатом.

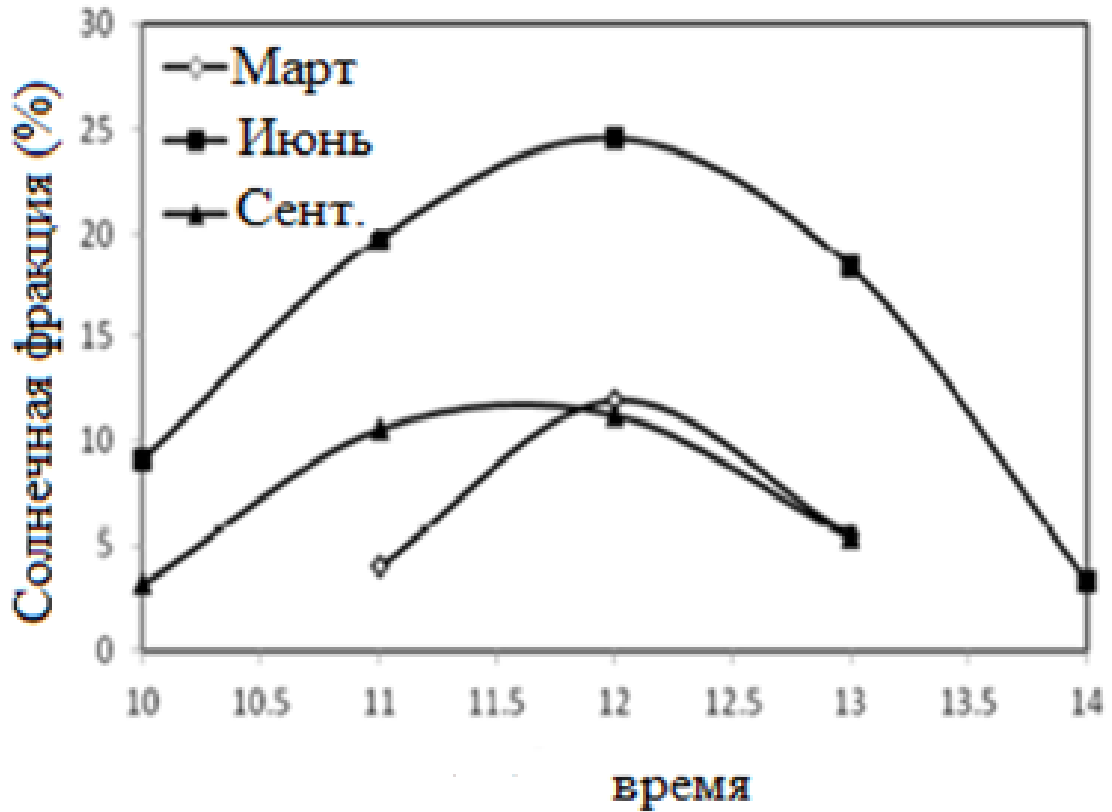


Рисунок 3.18 - Солнечная фракция

На рисунке 3.18. представлено сравнение эффективности электростанций на базе технологии ISCCS и типичных ГТУ. Энергия солнечной станции используется для снижения себестоимости электроэнергии. При увеличении числа солнечных коллекторов с 450 до 600 доля солнечной энергии увеличивается с 24% до  $\approx 40\%$ .

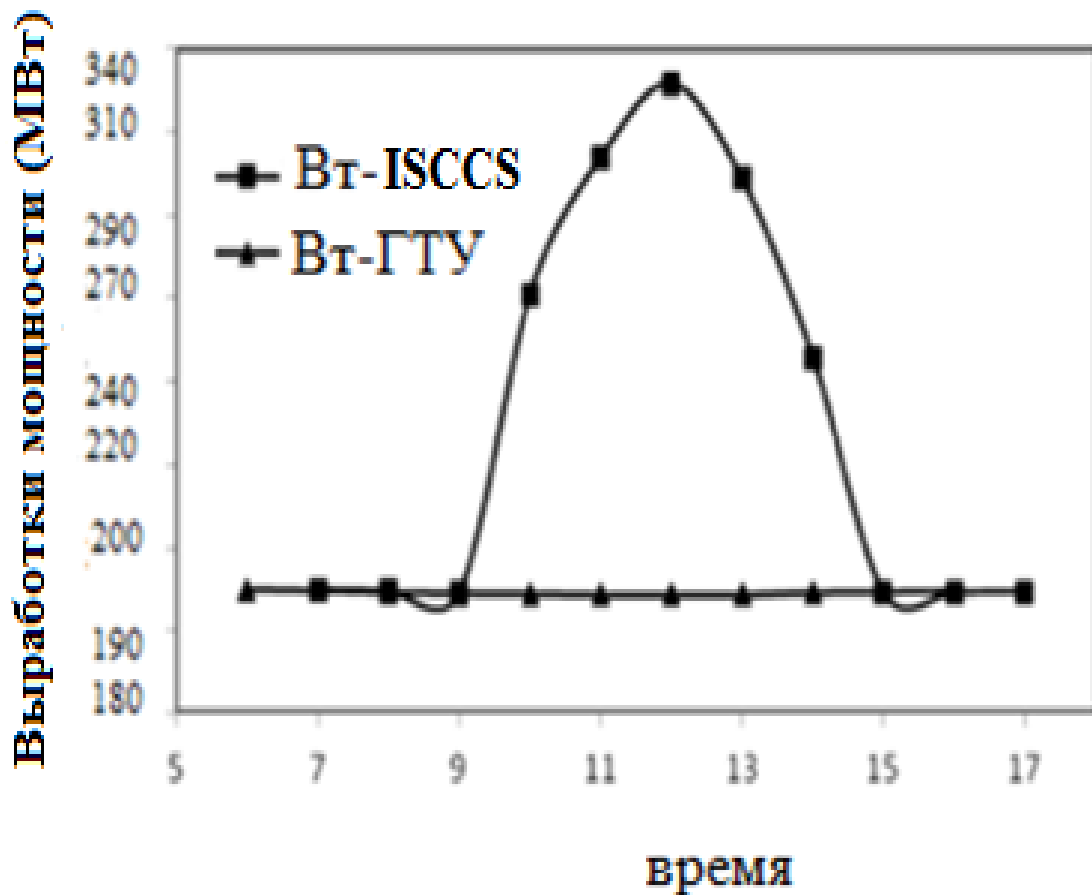


Рисунок 3.19 - Сравнение мощности ISCCS и ГТУ

КПД существующей в г. Басра газотурбинной электростанции составляет  $\approx 38\%$ . Предложенная модель гибридной электростанции с комбинированным циклом ISCCS-DSG показала рост КПД с 38% до 55%, т.е. на 17%, что сопоставимо с результатами других исследователей.

### 3.5 Оценка экономической и экологической эффективности предлагаемых мероприятий

Главная задача энергетики Ирака – это получение максимально возможной прибыли, которая пойдет на восстановление и развитие инфраструктуры. Для достижения цели необходимы радикальные решения.

Сегодня это переход на новые схемы – ISCCS.

Модель ISCCS с РТС в Алжире показывает, что максимальный КПД гибридных электростанций следует ожидать при соблюдении условий – высокий DNI, низкая скорость ветра, наличие воды и природного газа. Максимальная генерация солнечной энергии ожидается в июне, до 18% [117-120].

Результаты моделирования ISCCS в ОАЭ показывают, что общая эффективность станции увеличивается с 52,4 до 61,8%, т.е. на 9,4%.

Для сравнения, эффективность гибридной схемы ISCCS электростанции Behar et al в Алжире мощностью 150 МВт составляет 67%, при вкладе солнечной генерации 15%.

Переход с РТС на централизованную приемную систему - CRS может увеличить общий КПД электростанции еще на  $\approx 3\%$  [121-125].

Схема ISCCS с РТС, в зависимости от доли затрат, позволяет снизить себестоимость энергии примерно на 20%. Ожидаемая эффективность технологии CSP в районах Ирака - Мусол, Энбар, Карбала, Эл-наджаф, Диваня, Эл-басра должна составить не менее 11,3% от общей выработки электроэнергии (около 145 854 МВт в год) [3]. При детальной проработке проектных решений рост мощности гибридных электростанций может составить 13%.

К недостаткам перехода на гибридную схему следует отнести зависимость от солнечной инсоляции, т.е. фактический простой в зимние месяцы. Экономический анализ показывает, что расходы на капитальное строительство концентратора солнечной энергии - CSP выше, чем только турбины CCGT. На CSP приходится 67% от общего объема капитальных вложений, но зато эксплуатационные расходы CSP составляют всего около 5% от общей стоимости электростанции ISCCS, т.е. 34 \$/кВт для CSP и 164 \$/кВт для CCGT соответственно.

За планируемый срок эксплуатации электростанции г. Басра - 30 лет модернизированная станция позволит сэкономить топлива на  $\approx 46$  млн.

долларов, и при этом существенно снизятся объемы выбросов CO<sub>2</sub>. Углеродный кредит позволит значительно сократить срок окупаемости модернизации [126].

### **Технические и экономические параметры гибридной электростанции с комбинированным циклом в г. Басра**

Основные технические параметры, используемые впоследствии для оценки капитальных затрат на строительство предлагаемой гибридной электростанции с комбинированным циклом мощностью 140 МВт в г. Басра приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Основные технические параметры гибридной электростанции с комбинированным циклом мощностью 140 МВт в г. Басра

Параметр	Единица	Водяное охлаждение без накопителя	Воздушное охлаждение без накопителя	Воздушное охлаждение с накопителем
Прямая нормальная инсоляция (расчетное значение)	Вт/м <sup>2</sup>	660	660	660
Площадь поля солнечных коллекторов	га	102,5	108,0	186,8
Время работы накопителя	часов	нет	нет	6,0
Емкость накопителя	МВтч	нет	нет	2712,08
Номинальный КПД энергоустановки	%	37,6	35,6	35,6
Общая занимаемая площадь	км <sup>2</sup>	3,5	3.89	6.8

В таблице 3.8 приведены укрупненные составляющие затрат на сооружение гибридной электростанции с комбинированным циклом мощностью 140 МВт в г. Басра

Таблица 3.8 - Основные экономические параметры 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	Процент %
Прямые затраты				
Проектные работы	26,8	28	48,16	10,6%
Поле солнечных коллекторов	56,56	61,88	99,12	22,4%
Система теплоносителя	35,28	38,36	61,32	14%
Накопитель	-	-	125,16	-
Энергоблок	28	41,72	41,72	11,1%
Непредвиденные расходы	10,36	11,76	26,32	4,1%
Косвенные затраты				
Инженерные работы и строительство	43,44	39,76	88,48	17,2%
Земельный участок	18,76	19,88	34,16	7,7%
Налоги, деградация системы и преимуществ	32,48	37,52	83,16	12,9%
Итого:	251,76	269,92	607,6	100%

Как видно в таблицы 3.8, из сравнения итоговой стоимости установки с воздушным охлаждением и установки с водяным охлаждением аналогичной мощности (140 МВт) можно отметить, что капитальные затраты на установку с воздушным охлаждением на 15% выше, чем на установку с водяным охлаждением. Это может быть связано с тем, что для установки с воздушным охлаждением КПД энергоустановки ниже на 5,3%, а возникающие дополнительные затраты на 30% выше по сравнению с установкой с водяным охлаждением. Чтобы компенсировать ту же мощность электростанции, требуется на 9,1% больше тепловой энергии (для выработки такой же выходной

мощности), для чего необходимо установить дополнительные 5,4% солнечного поля [127].

Кроме того, переход на установку с воздушным охлаждением значительно увеличивает капитальные затраты, поскольку конденсатор с воздушным охлаждением и связанный с ним баланс компонентов установки являются очень материалоемкими. Например, установка с воздушным охлаждением требует в 20 раз больше алюминия и примерно вдвое больше компонентов на основе углеродистой стали, включая ребристые трубы, большие вентиляторы и опорную конструкцию. Требования к некоторым другим материалам также на 2-12% выше в установке с воздушным охлаждением по сравнению с соответствующими требованиями к материалам для установки с водяным охлаждением.

Однако отдельно следует отметить, что несмотря на повышенные затраты на установки с воздушным охлаждением, зачастую предполагаемое места строительства подстанций находятся в засушливых и маловодных регионах. В таких регионах вода может быть недоступна для охлаждения конденсатора, следовательно, может потребоваться применение воздушного охлаждения, поскольку это может привести к снижению потребности в воде на 97% по сравнению с установками с водяным охлаждением [129].

Таким образом, как видно из таблицы 3.8, существуют значительные различия в заявленных значениях удельных капитальных затрат на единицу мощности (\$/кВт) действующих, строящихся и проектируемых электростанций, использующий солнечные тепловые технологии. Без накопителя это составляет около 1800-1900 \$/кВт, с накопителем - 4340 \$/кВт. В диссертационном исследовании рассматривается установка без накопителя.

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 ( $U_{\text{эксуд}}$ );
- 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 ( $P_{\text{эл/ст}}$ ).

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{вл}} + U_{\text{экс}}}{K_{\text{срг}}}, \quad (3.21)$$

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

$$U_{\text{экс}} = U_{\text{эксуд}} * P_{\text{эл/ст}} \quad (3.22)$$

$$K_{\text{срг}} = C_{\text{эн}} * P_{\text{эл/ст}} * T_{\text{мах}} \quad (3.23)$$

В результате расчетов по выражениям (3.21) 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.3.8, 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 таблице 3.9 приведены подобные удельные капитальные затраты для различных типов электростанций при их строительстве в настоящее время по данным Министерства электроэнергетики Ирака [130].



Таблица 3.9 - Удельные капитальные затраты для различных типов электростанций

Тип электростанции	Удельные капитальные затраты, \$/кВт
Тепловая (уголь)	2300
Тепловая (нефть)	1100
Газовая	1100
Гибридная (солнечная часть)	1800

В заключении следует отметить, что исследуемая в диссертационной работе газово/солнечная гибридная электростанция с комбинированным циклом по общей величине капитальных вложений сопоставима со стоимостью строительства других объектов, но при этом обладает существенно меньшим экологическим воздействием на окружающую среду, что также является немаловажным для развития любой страны, в том числе Ирака.

В то же время проектирование гибридной электростанции с долей солнечной энергии уменьшает финансовый риск, поскольку большая часть электроэнергии вырабатывается с использованием уже проверенной технологии на ископаемом топливе.

#### **Экологический аспект**

В Ираке производство электроэнергии (особенно с помощью автономных дизель-генераторов) и нефтепереработка в значительной степени способствуют загрязнению воздуха, вызывая серьезные экологические проблемы. Кроме того, постоянное сжигание нефтяных месторождений приводит к высоким уровням выбросов, которые связаны с ухудшением качества воздуха. Ухудшение качества воздуха также связано с использованием некачественного топлива в транспортном, энергетическом и промышленном секторах; выбросами промышленных производств; песчаными бурями; открытым сжиганием отходов.

Во всем мире к распространенным загрязнителям окружающего воздуха относятся твердые частицы (PM10 и PM2,5), озон, оксид углерода, диоксид серы и оксид азота.

Частицы диаметром менее 2,5 микрон (PM2,5) называются мелкими. Источники таких частиц: продукты всех типов сгорания (в том числе сжигание древесины дома, лесные пожары), выхлопные газы, выбросы электростанций и некоторых других промышленных отраслей. При этом выбросы таких частиц при производстве электроэнергии на электрических станциях, использующих ископаемое топливо (нефть, газ, уголь) в Ираке являются определяющими. В частицах размера PM2,5 содержатся более токсичные тяжелые металлы и опасные органические загрязнители, которые также легко могут попасть в легкие. Они легко переносятся по окружающей среде на бактериях и вирусах, поэтому такие частицы наносят более серьезный вред экологии и здоровью человека.

Для отчета о ежедневном качестве воздуха используется Индекс качества воздуха. Он показывает, насколько чист или вреден для здоровья воздух, а также возможные последствия для здоровья, которые следует учитывать в течение нескольких часов или дней вдыхания загрязненного воздуха.

Выбросы от электростанций на ископаемом топливе, нефтеперерабатывающих заводов и автотранспортных средств являются основными источниками загрязнения воздуха в Южном Ираке, в частности в г. Басра [131]. В таблице 3.10 приведены средние значения концентраций различных загрязняющих веществ за год и количество дней, в течение которых эти концентрации превышали стандартное значение качества воздуха. Очевидно, что мелкие частицы PM2,5 являются одним из наиболее загрязняющих веществ, превышающими стандартное значение качества воздуха по сравнению с другими загрязняющими веществами. Например, за отчетный период 2019-2020 гг. концентрация PM2,5 превышалась ( $35 \text{ мкг/м}^3$ ) в течение 188 дней.

Таблица 3.10 - Среднегодовые значения концентрации загрязняющих веществ за исследуемый период (мкг/м<sup>3</sup>) / количество дней, превышающих стандартные значения качества воздуха для различных городов Ирака.

Город	Индекс качества воздуха	<b>PM<sub>2,5</sub></b>	PM <sub>10</sub>	Диоксид серы	Оксид азота	Озон	Оксид углерода
Басра	109,79	<b><u>41,20/188</u></b>	158,55/112	29,12/15	7,22/1	79,8/87	178,8/0

В таблице 3.11 показано согласно исследованиям [132] распределение Индекса качества воздуха для г. Басра. Как видно, 58 дней в году являются «нездоровыми», в основном только из-за PM<sub>2,5</sub>. Таким образом, качество воздуха в г. Басра можно считать крайне низким при высокой численности населения, что является следствием существенных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу нефтяной промышленностью и электростанциями на ископаемом топливе.

Таблица 3.11 - Индекса качества воздуха для г. Басра.

Характеристика воздуха	Количество дней, шт.
Хороший	4
Умеренный	145
Нездоровый для чувствительных групп	130
Нездоровый	58
Крайне нездоровый	11
Опасный	18

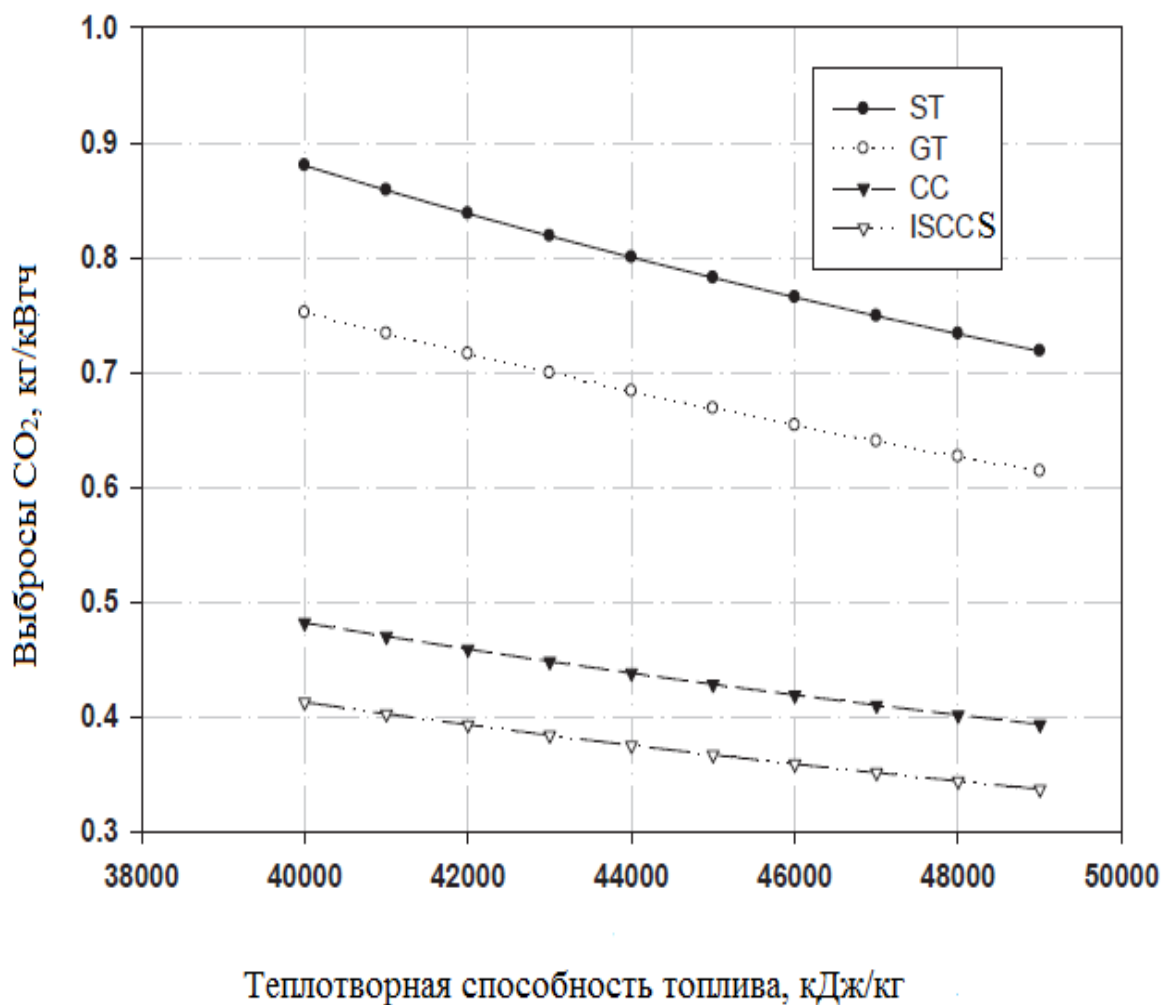
Таким образом, минимизация выбросов при производстве электроэнергии на электрических станциях, использующих ископаемое топливо (нефть, газ, уголь), как следствие, развитие экологически чистых технологий в электроэнергетике, широкое применение возобновляемых источников энергии является критически важным для Ирака [133].

## Выбросы CO<sub>2</sub>

Количество выделяемого углекислого газа CO<sub>2</sub> может быть рассчитано при известном составе топлива (например, анализ тяжелого нефтяного топлива в процентах составляет: 87% С, 9% Н<sub>2</sub>, 2,4% S, 1,2% N<sub>2</sub>, 0,8% O<sub>2</sub>, 0,1% золы и 0,3% влаги).

Для производства одного кВтч (3600 кДж) электроэнергии с помощью паровой турбины с КПД 30 % требуется 12000 кДж тепловой энергии. При теплотворной способности топлива 44000 кДж/кг для производства одного кВтч требуется сжигание  $(12000/44000) = 0,273$  кг топлива. При содержании углерода в топливе 87%, сжигается  $0,27*0,87 = 0,2372$  кг углерода. Таким образом при полном сгорании выделяется CO<sub>2</sub> в количестве, равном  $(0,2372*44)/12 = 0,87$  кг CO<sub>2</sub> на кВтч [131].

Влияние КПД электростанции на количество выбросов углекислого газа CO<sub>2</sub> при различных теплотворных способностях топлива показано на рисунке 3.20. Выбросы CO<sub>2</sub> уменьшаются при увеличении эффективности электростанции и при более высоких значениях теплоты сгорания.

Рисунок 3.20 - Выбросы CO<sub>2</sub>

Как видно на рисунке 3.21, стоимость выработанной энергии существенно зависит от стоимости топлива и типа электростанции. Например, для электростанции с комбинированным циклом это снижение составляет почти 50% (60 долларов за баррель) по сравнению с обычной солнечной тепловой электростанцией. Также существенно влияет и стоимость топлива. При более высокой цене на нефть (110 долларов за баррель) стоимость выработанной энергии на ISCCS составляет около 100 \$/МВтч, а, например, при более низкой цене на нефть (20 долларов за баррель) будет составлять всего 20 \$/МВтч.

Таким образом, использование чистого и недорогого топлива, такого как природный газ, приведет к снижению затрат на стоимость выработанной

энергии и выбросы CO<sub>2</sub> [132].

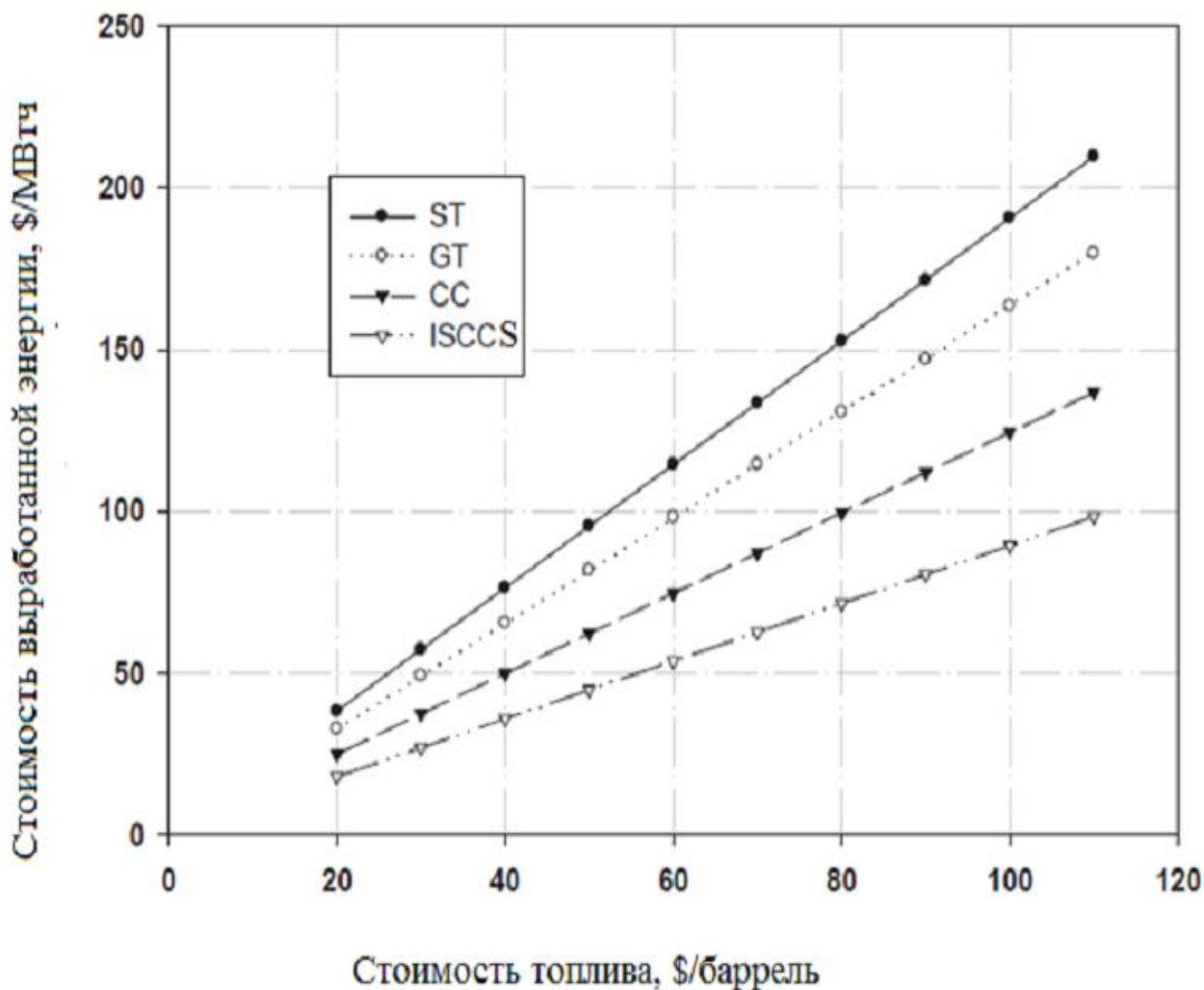


Рисунок 3.21 - Стоимость выработанной энергии

### Выводы по главе 3

Ирак обладает высоким потенциалом для развития солнечной энергетики. Математическое моделирование показало следующие результаты:

- основными факторами, влияющими на производительность электростанции, являются: вид топлива, температура окружающей среды, температура теплоносителя на входе в турбину, объем подводимого тепла, генерируемого солнцем;
- мощность электростанции в г. Басра можно увеличить до 330 МВт

при существующей ГТУ 200 МВт;

- КПД электростанции в г. Басра может быть увеличено до 55% (до 38% сегодня), т.е. при работе в течение года выдаваемая генерируемая мощность увеличится на 20-80% по сравнению с существующей схемой на базе ГТУ;
- основными преимуществами схемы 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  $\text{CO}_2$  составит около 170 672 т/год;
- потенциальный объем торговли углеродным кредитом выброса  $\text{CO}_2$  позволит значительно сократить срок окупаемости строительства модернизации ГТУ по схеме ISCCS.

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЮЖНОГО ИРАКА С ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ

### 4.1 Постановка задачи

Анализ потокораспределения, напряжений и токов короткого замыкания всегда требуется 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.

Стабильностью напряжения энергосистемы является ее способность поддерживать допустимое напряжение на всех своих шинах при возмущениях в системе. Это зависит от способности поддерживать равновесие между нагрузкой и генерацией. Понижение напряжения, вызванное возмущениями, негативно влияет на систему распределения [133-135].

Нестабильность вызывает постепенное повышение или наоборот падение напряжения на некоторых шинах, что приводит к отключению нагрузок, линий электропередачи и других элементов системы, вследствие чего из-за этих отключений некоторые генераторы могут выйти из синхронизма.

Оптимальное значение для реактивной мощности установки играет жизненно важную роль в определении улучшения стабильности напряжения. Компенсация реактивной мощности на «слабых» шинах в целом улучшает стабильность напряжения.

Целью анализа токов короткого замыкания является определение величины тока повреждения в разных точках.



Электрооборудование на станции должно быть способным нести динамические и термические воздействия, создаваемые этим током повреждения.

Результаты анализа короткого замыкания полезны для определения номинальных токов короткого замыкания электрооборудования.

В работе проведено моделирование системы электроснабжения в программном комплексе Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). Данный комплекс предлагает набор полностью интегрированных программных решений для электротехники [136].

## **4.2 Характеристика объекта исследования**

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 [38,82]. 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, Фао - 21,6 МВт, Bab Zubair - 20,5 МВт, месторождение Румайла - 80

МВт, город Ум-Касер и порт - 220 МВт, месторождение Zubair - 45 МВт, порт Альбакер - 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 ETAP (рисунки 4.1-4.2).

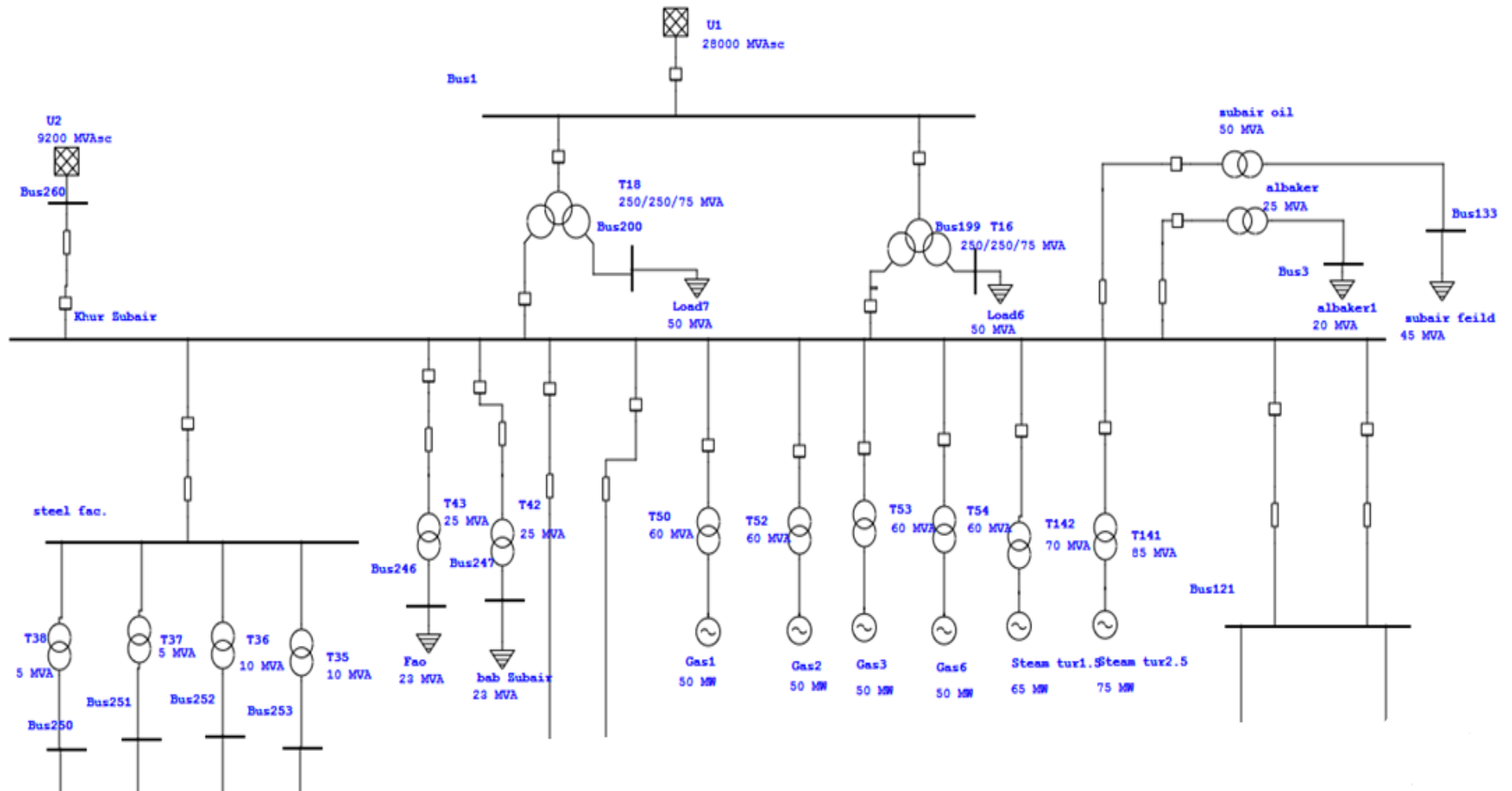


Рисунок 4.1 - Модель однолинейной схемы системы электроснабжения Южного Ирака с электростанцией с комбинированным циклом мощностью 340 МВт (Верхний фрагмент)

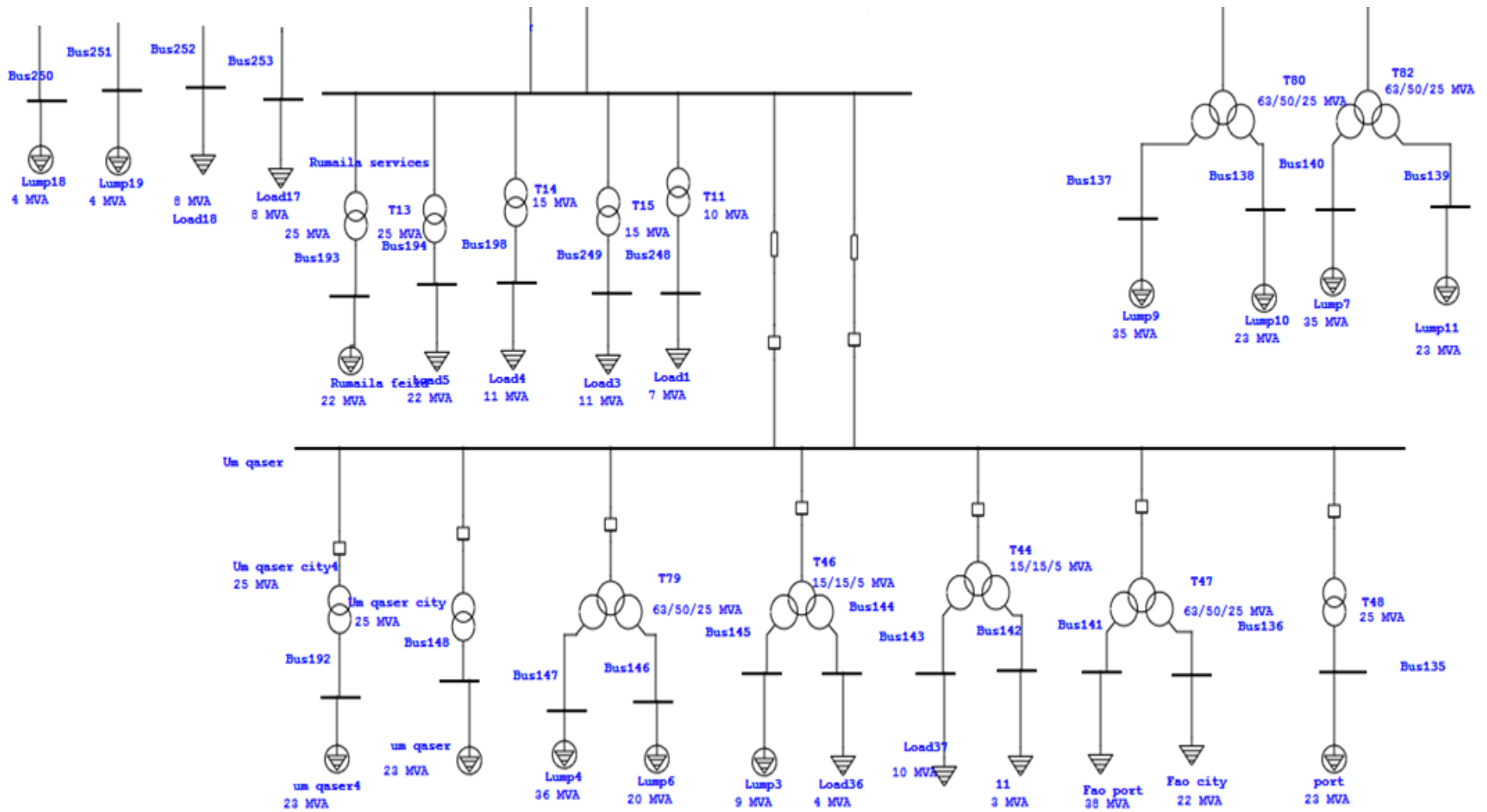


Рисунок 4.2 - Модель однолинейной схемы системы электроснабжения Южного Ирака с электростанцией с комбинированным циклом мощностью 340 МВт (Нижний фрагмент)

### 4.3 Моделирование исходного режима

Как упоминалось ранее, рассматриваемая электростанция в настоящее время состоит из 4 газовых блоков мощностью 50 МВт на единицу и общей мощностью 200 МВт с выдачей в электрическую сеть 132 кВ. Эта сеть соединена с общенациональной электрической сетью 400 кВ повышающими трансформаторами.

Система электроснабжения Южного Ирака в текущей ситуации страдает от нескольких проблем, наиболее важными из которых являются пониженное напряжение и постоянные отключения.

Поскольку имеющиеся электростанции региона не обеспечивают нагрузку потребителей, следовательно, дефицит импортируется из общенациональной сети 400 кВ [38,82].

#### Анализ потокораспределения

Расчетная схема и результаты моделирования исходного режима приведены на рисунках 4.3 – 4.4

Чтобы выполнить анализ потокораспределения, сначала необходимо построить матрицу узловых проводимостей ( $Y_{bus}$ ). Используя  $Y_{bus}$ , можно записать узловые уравнения для электрической системы следующим образом

$$I = Y_{bus} * U , \quad (4.1)$$

где  $I$ ,  $Y_{bus}$  и  $U$  - ток, узловая проводимость и напряжение соответственно.

Узловое уравнение в обобщенном виде для системы шин  $n$ :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j \quad \text{где } i=1,2,3,\dots,n \quad (4.2)$$

Полная мощность, подводимая к узлу  $i$

$$P_i + jQ_i = U_i I_i^* , \quad (4.3)$$

$$I_i = \frac{(P_i - jQ_i)}{V_i^*}, \quad (4.4)$$

где  $P_i$  и  $Q_i$  - активная и реактивная мощность для узла  $i$ .

Подставляя  $I_i$  через  $P_i$  и  $Q_i$ , получаем

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (4.5)$$

Различные методы расчёта потокораспределения применяются для анализа устойчивого состояния электрической системы. В работе используется алгоритм Ньютона-Рафсона по причине более быстрой сходимости и наименьшего количества итераций по сравнению с другими методами. Выражая уравнение (4.2) в полярной форме и подставляя его в уравнение (4.3), действительные и мнимые составляющие результирующего уравнения будут иметь вид:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad (4.6)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad (4.7)$$

где  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  и  $\theta_{ij}$  - углы элементов  $V_i$ ,  $V_j$  и  $Y_{ij}$  соответственно. Уравнения (4.6) и (4.7) разложены в ряды Тейлора относительно начальной оценки, пренебрегая всеми членами более высокого порядка, запишем их в матричной форме.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

где  $J_1$ - $J_4$  - элементы матрицы Якоби.

Диагональ и недиагональные элементы  $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.10)$$

Разница между графиком и расчетными значениями мощности, известная как невязки мощности для  $\Delta P_i^{(k)}$  и  $\Delta Q_i^{(k)}$ , равна:

$$\Delta P_i^{(k)} = \Delta P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (4.11)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = \Delta Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (4.12)$$

Новые оценки напряжения на шине:

$$\delta^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (4.13)$$

$$|V^{k+1}| = |V_i^{(k)}| \Delta |V_i^{(k)}| \quad (4.14)$$

Следует отметить, что на шине 121, шине Румайла и шине Um qaser, а также на их ответвлениях присутствует пониженное напряжение, что хорошо видно на рисунках 4.3 – 4.4 и в табл. 4.1 [137-140].

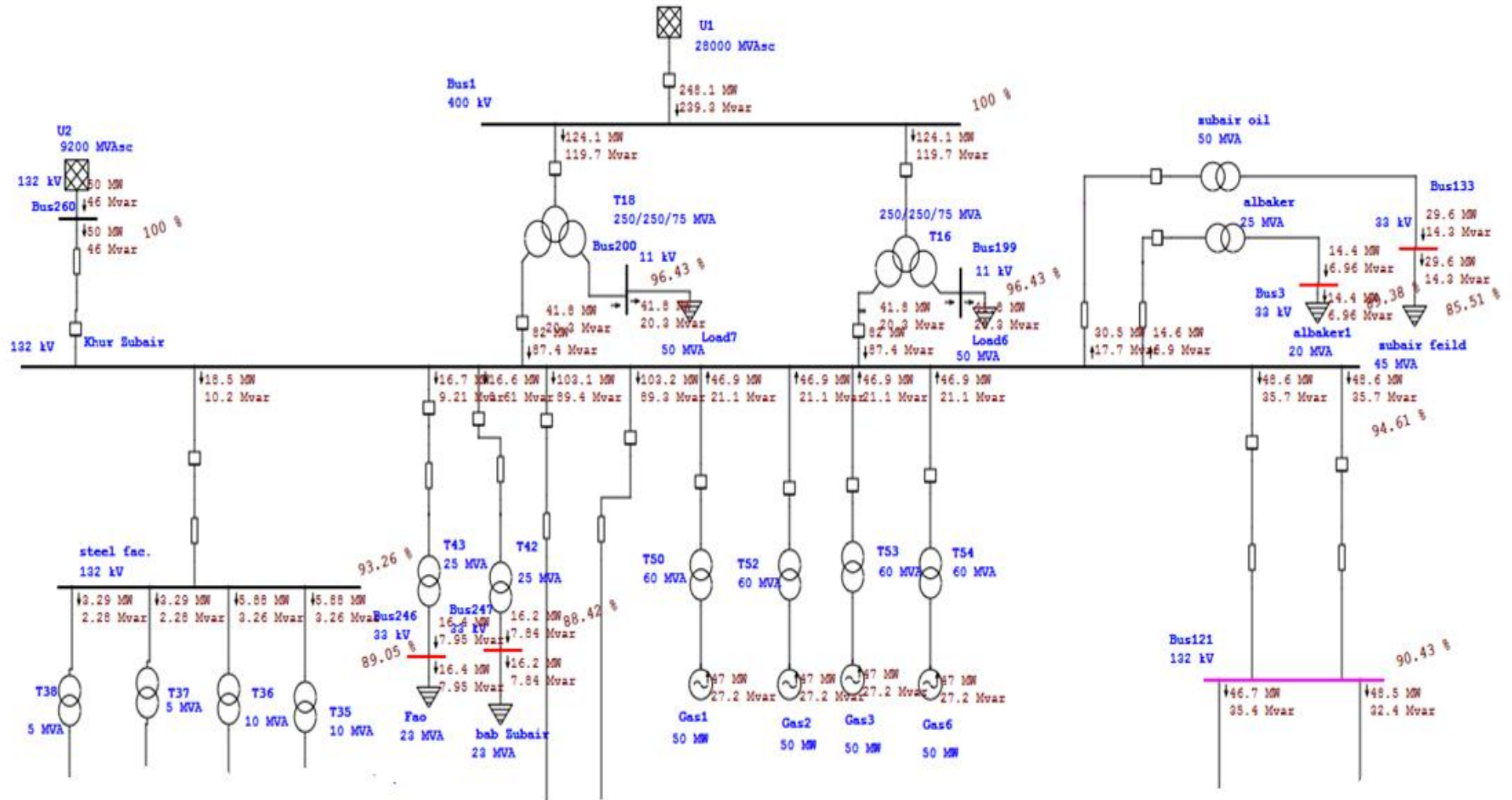


Рисунок 4.3 - Результаты расчета потокораспределения (Верхний фрагмент)



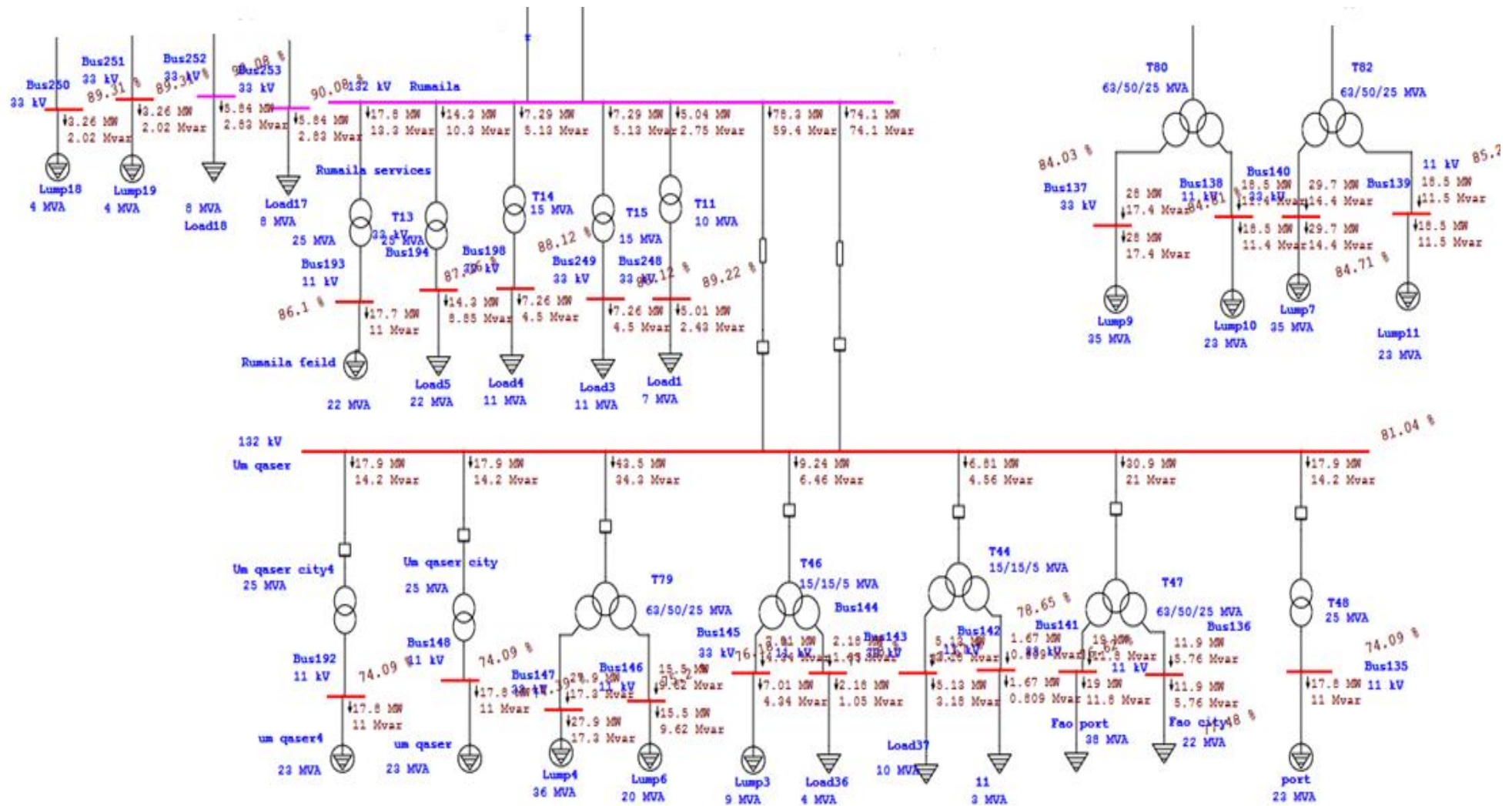


Рисунок 4.4 - Результаты расчета потокораспределения (Нижний фрагмент)

Таблица 4.1 - Результаты анализа потокораспределения исходного режима

ID шин	Напряжение		Перетоки мощности			
			Из общенациональной сети		В нагрузку	
	Номинал, кВ	%	МВт	Мвар	МВт	Мвар
1 swing	400	100	252,011	242,194	0	0
260	132	100	50,000	46,765	0	0
121	132	88,8	0	0	101,4	75,6
Rumaila	132	86,5	0	0	206,2	178,6
Um qaser	132	80,4	0	0	152,3	133,5

### Анализ токов короткого замыкания

В работе рассмотрены все виды коротких замыканий: замыкание на землю (LG), двухфазное замыкание (LL), двухфазное замыкание на землю (LLG), трехфазное замыкание (LLL) трехфазное замыкание на землю (LLLG), результаты соответствует стандарту IEC 60909-0 [141].

В табл. 4.2 приведены результаты анализа короткого замыкания на главной шине Khur Zubair с номинальным напряжением 132 кВ.

Таблица 4.2 - Результаты анализа токов короткого замыкания исходного режима

Параметр	Вид короткого замыкания			
	LLL	LG	LL	LLG
Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{п0}$ , кА	29,114	27,165	25,264	28,405
Ударный ток КЗ, $i_{уд}$ , кА	75,530	70,474	65,542	73,691
Действующее значение установившегося тока КЗ, $I_{\infty}$ , кА	25,160	27,165	25,264	28,405

### Анализ устойчивости

Определяется реакция системы на различные помехи, которые являются источником нестабильности, то есть приводят к потере синхронности, остановке или перегрузке генераторов и двигателей.

В данном случае показана нестабильность электрической системы, когда она теряет одну из своих нагрузок (um qaser), при этом один из генераторов выходит из синхронизма. На рисунках 4.5 - 4.6 показаны угол мощности системы и частота вращения генераторов соответственно [142].

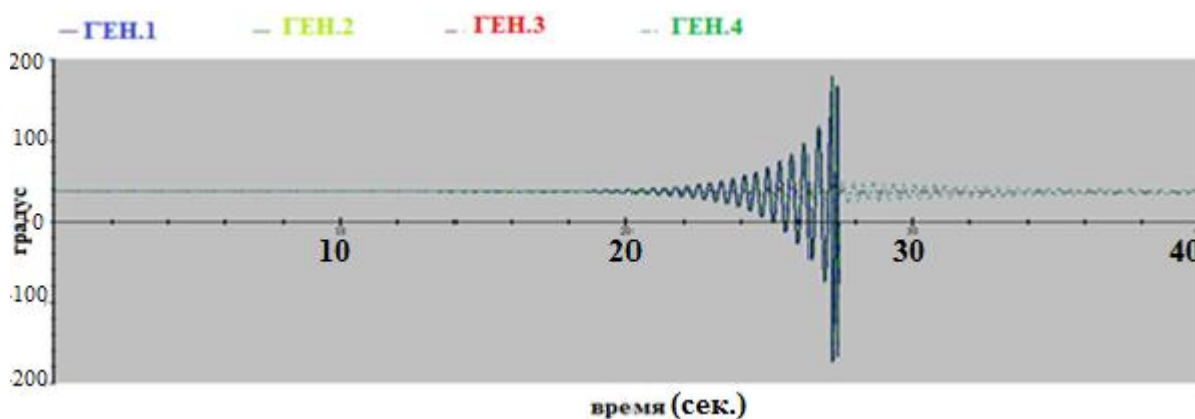


Рисунок 4.5 - Угол мощности

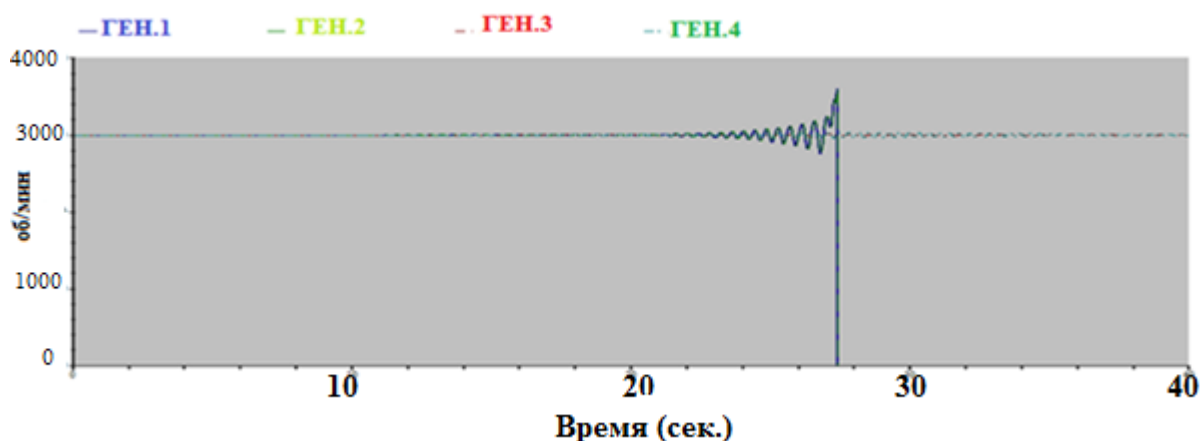


Рисунок 4.6 - Скорость генераторов

#### 4.4 Моделирование режима с гибридной электростанцией с комбинированным циклом

Для реализации гибридной электростанции с комбинированным циклом в расчетную модель были добавлены две паровые турбины мощностью 75 МВт и 65 МВт, работающие от солнечного поля и выхлопные газотурбинные двигатели, на имеющуюся газотурбинную установку мощностью 200 МВт.

Благодаря высокой инсоляции в течение летнего месяца июня рассматриваемая электростанция может достичь до 25% солнечной фракции с помощью установки с интегрированным солнечным комбинированным циклом. В этом разделе выполнен для четырех сезонов года [38,82,142].

### **Анализ потокораспределения**

Результаты анализа потокораспределения в случае комбинированной газовой электростанции с солнечной тепловой установкой мощностью 130 МВт для различных сезонов в течение года показаны на рисунках 4.7-4.12 и приведены в табл. 4.3-4.5.

Летний сезон в Ираке – самый длинный сезон в году, который длится с середины апреля до сентября. Он также характеризуется наибольшей солнечной радиацией, как было показано в главе 1. В этом сезоне наибольшее потребление электроэнергии приходится на всю страну, поэтому много проблем с подачей электроэнергии из-за перебоев, отключений и низкого напряжения.

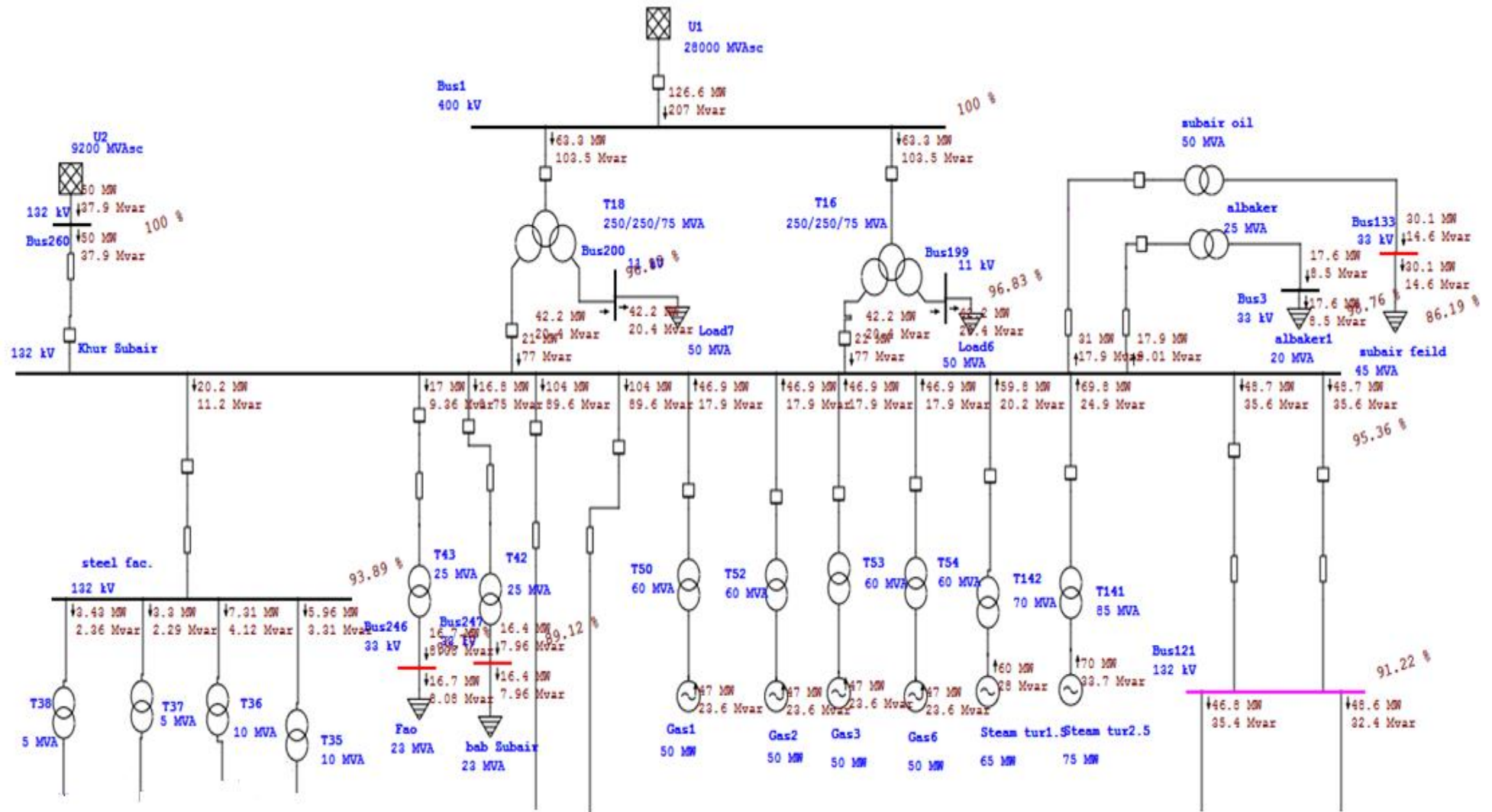


Рисунок 4.7 - Результаты расчета потокораспределения для летнего сезона (Верхний фрагмент)



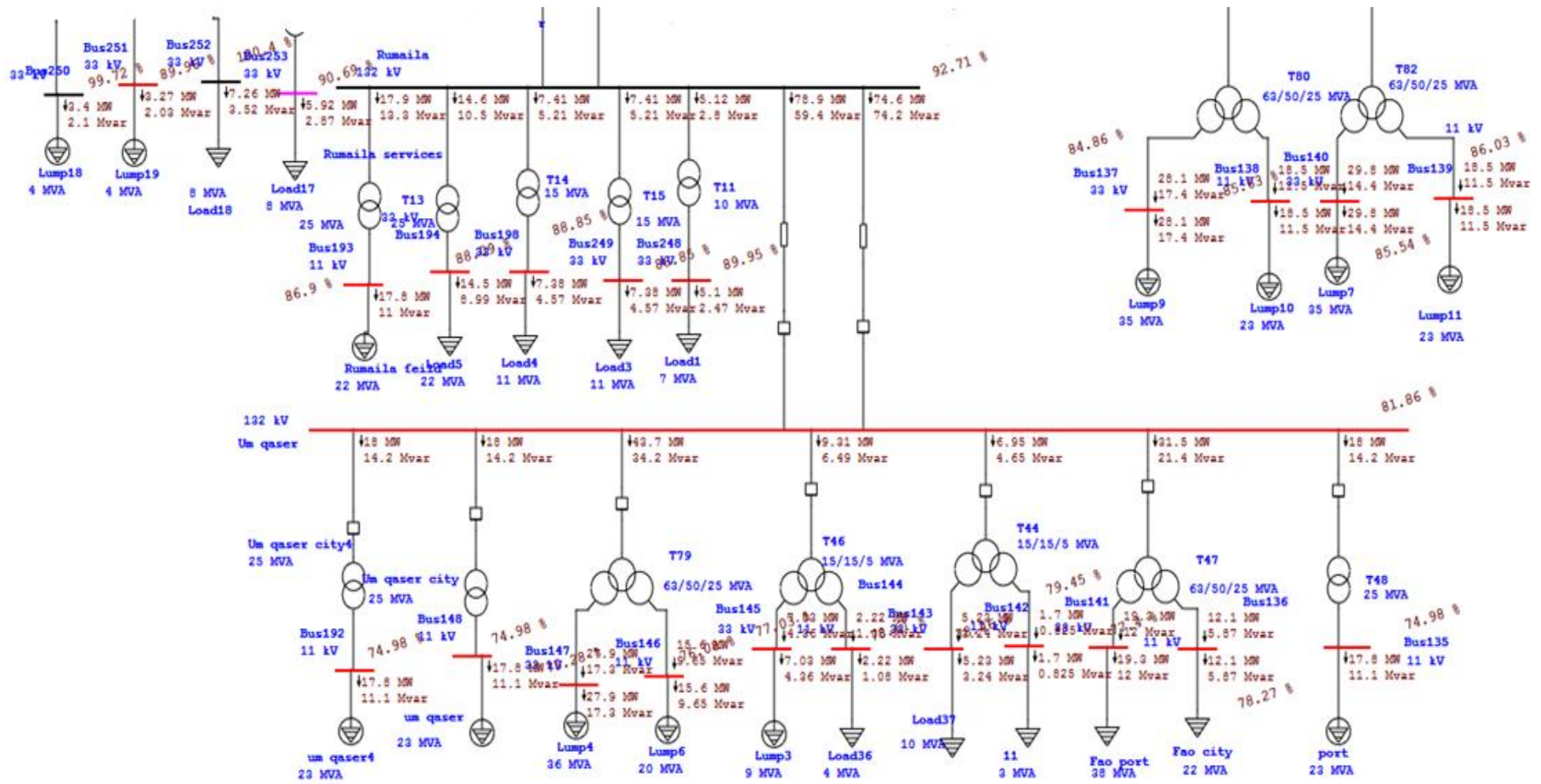


Рисунок 4.8 - Результаты расчета потокораспределения для летнего сезона (Нижний фрагмент)

Таблица 4.5 - Результаты для летнего сезона

ID шин	Напряжение		Перетоки мощности		Ток	cosφ
	Номинал, кВ	%	МВт	Мвар	А	о.е.
шина 135	11,000	85,440	18,494	14,456	129,1	79,0
шина 136	11,000	87,9	15,3	7,414	265,5	82,1
шина 137	33,000	88,34	29,020	17,985	291,4	80,1
шина 138	11,000	87,5	19,129	11,855	290,4	80,0
шина139	11,000	88,3	19,129	11,855	290,1	83,5
шина 140	33,000	86,2	30,810	14,922	290,7	83,5
шина 141	33,000	86,796	24,33	15,1	265,5	82,1
шина 142	11,000	89,21	2,162	1,047	140,9	82,4
шина 143	33,000	88,45	6,6	5,997	58,7	82,6
шина 144	11,000	89	2,848	1,379	186,7	89,0
шина 145	33,000	87,4	7,3	4,517	171,4	85,0
шина 146	11,000	86,6	16,15	10	1151,6	85,0
шина 147	33,000	85,75	28,98	18	695,6	86,0
шина 148	11,000	85,440	18,5	14,456	129,6	79,0
шина192	11,000	85,3	18,49	14,462	129,6	79,0
шина 193	11,000	91,4	18,4	11,4	1186,9	85,0
шина 199	11,000	96,6	42	20,345	2535,5	90,0
шина 200	11,000	96,6	42	20,345	2535,5	90,0

После летнего сезона рассчитывается режим на весну и осень, поскольку погодные условия несколько схожи, кроме потребления электрической энергии, они очень близки. Весеннее и осеннее время года в Ираке самое короткое, так как весна продолжается с конца февраля до середины апреля. А осенний сезон продлится с октября по ноябрь. Как упоминалось в главах 1 и 3, Ирак в это время года обладает хорошей солнечной радиацией и может покрывать большую часть выработки электроэнергии с помощью предлагаемой гибридной электростанции, что позволит решить проблемы, такие как низкое напряжение, отключения и перебои в электроснабжении.

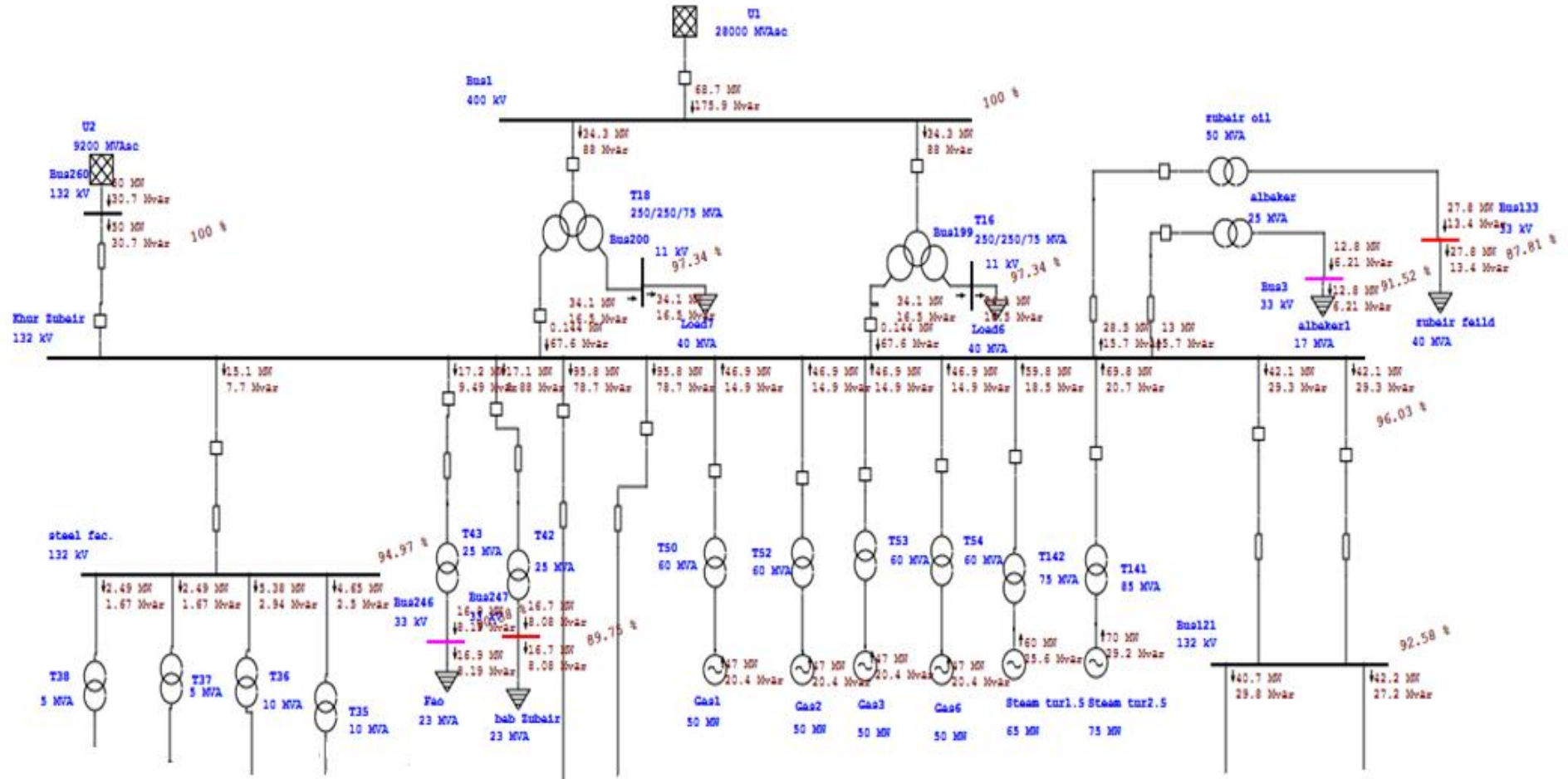


Рисунок 4.9 - Результаты расчета потокораспределения для весеннего и осеннего сезонов (Верхний фрагмент)



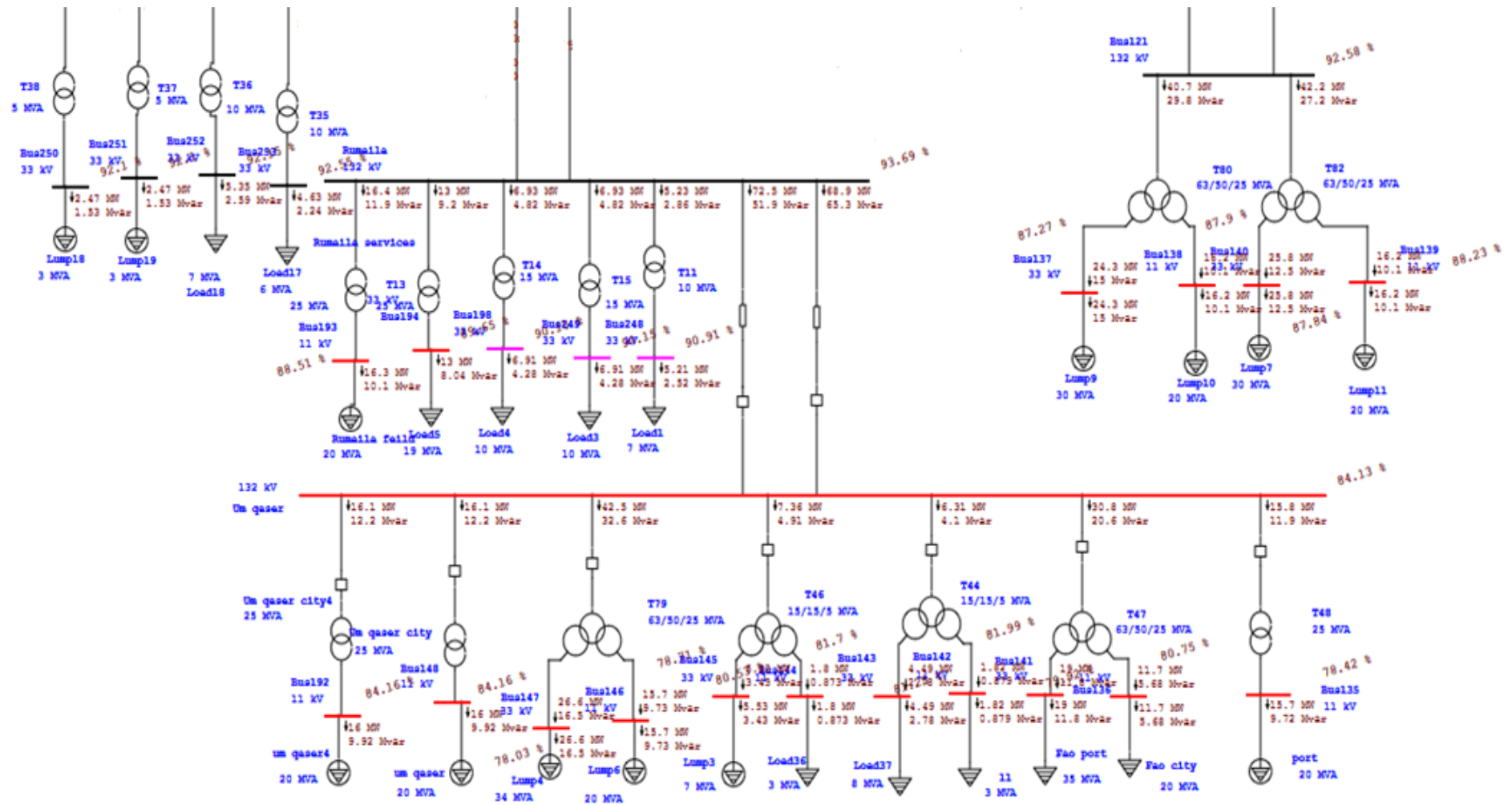


Рисунок 4.10 - Результаты расчета потоков распределения для весеннего и осеннего сезонов (нижний фрагмент)

Таблица 4.6 - Результаты для весеннего и осеннего сезонов

ID шин	Напряжение		Перетоки мощности		Ток	cosφ
	Номинал, кВ	%	МВт	Мвар	А	о.е.
шина 135	11,000	78,421	15,802	11,938	103,0	79,8
шина 136	11,000	80,752	11,738	5,685	847,7	88,1
шина 137	33,000	87,34	24,284	15,05	572,8	85,0
шина 138	11,000	87,898	16,227	10,056	1139,9	85,0
шина 139	11,000	88,227	16,227	10,056	1137,9	85,0
шина 140	33,000	87,839	25,766	12,479	570,7	89,5
шина 141	33,000	79,916	19	11,3	192,7	83,1
шина 142	11,000	81,994	1,815	0,88	129,1	90,0
шина 143	33,000	81,248	4,49	2,782	113,7	85,0
шина 144	11,000	81,698	1,802	0,873	128,7	89,0
шина 145	33,000	80,532	5,532	3,4	141,4	85,0
шина 146	11,000	78,706	15,706	9,73	1232,2	85,0
шина 147	33,000	78,030	26,639	16,51	702,7	85,0
шина 148	11,000	84,160	16,125	12,233	105,6	79,0
шина 192	11,000	84,160	16,124	12,233	105,6	79,0
шина 193	11,000	88,508	16,263	10,079	1134,6	85,0
шина 199	11,000	97,338	34,109	16,520	2043,6	90,0
шина 200	11,000	97,338	34,109	16,520	2043,6	90,0

Зимний сезон является одним из коротких сезонов в Ираке, где он длится с ноября до конца января, а потребление электрической энергии минимально.

Люди используют масляные обогреватели для приготовления пищи и отопления, что положительно отражается на потреблении электрической энергии и снижении перетока из общенациональной сети.



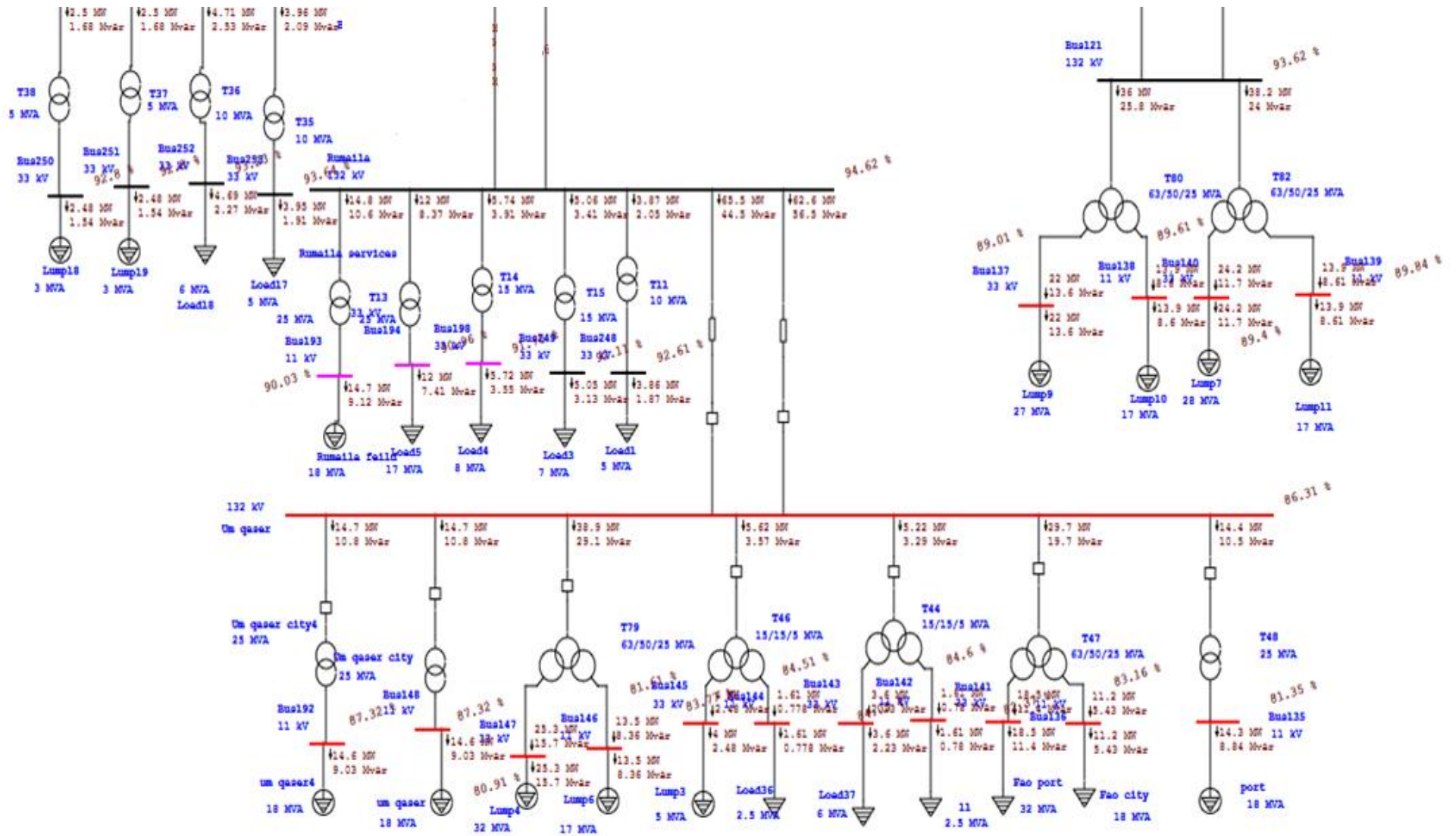


Рисунок 4.12 - Результаты расчета потокораспределения для зимнего сезона (Нижний фрагмент)

Таблица 4.7 - Результатов для зимнего сезона

ID шин	Напряжение		Перетоки мощности		Ток	cosφ
	Номинал, кВ	%	МВт	Мвар	А	о.е.
шина 135	11,000	81,34	14,350	10,541	90,2	80,8
шина 136	11,000	83,164	11,204	5425	785,7	90,0
шина 137	33,000	89,011	21,984	13,632	508,8	85,0
шина 138	11,000	89,614	13,881	8,603	956,9	85,0
шина 139	11,000	89,836	13,881	8,603	956,9	85,0
шина 140	33,000	89,439	24,188	11,7	525,9	85,5
шина 141	33,000	82,368	18,454	11,4	461,1	85,0
шина 142	11,000	84,600	1,615	0,78	111,0	90,0
шина 143	33,000	84,054	3,6	2,2	88,2	85,0
шина 144	11,000	84,507	1,607	0,778	110	85,0
шина 145	33,000	83,770	4	2,4	98	85,0
шина 146	11,000	81,611	13,485	8,73	1020,3	85,0
шина 147	33,000	80,910	25,639	15,51	702,7	85,0
шина 148	11,000	87,320	14,662	10,811	92,6	80,5
шина 192	11,000	87,320	14,662	10,811	92,5	80,5
шина 193	11,000	90,029	14,720	9,123	1009,6	85,0
шина 199	11,000	97,715	30,077	14,567	1795,0	90,0
шина 200	11,000	97,715	30,077	14,567	1744,1	90,0

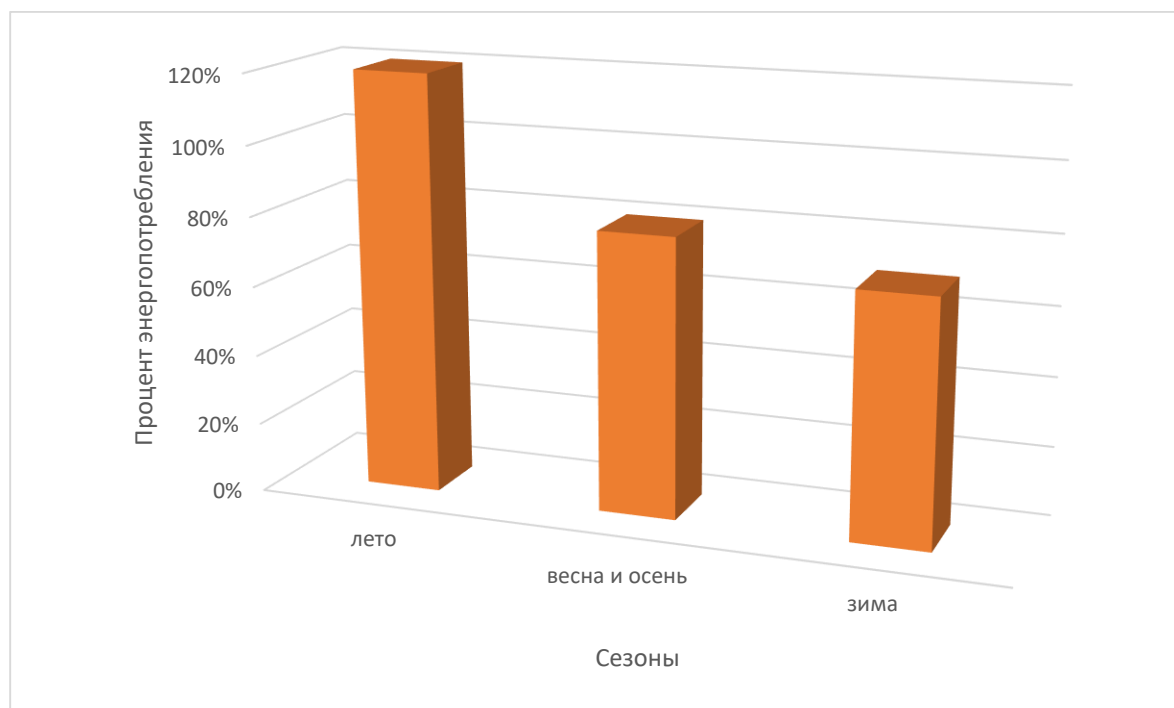


Рисунок 4.13 - Процент энергопотребления в зависимости от времени года

### Анализ токов короткого замыкания

Расчет выполнен для всех сезонов года, полученные результаты приведены в табл. 4.8-4.10.

Таблица 4.8 - Токи короткого замыкания для летнего сезона

Параметр	Вид короткого замыкания			
	LLL	LG	LL	LLG
Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{п0}$ , кА	32,242	29,025	28,006	31,067
Ударный ток КЗ, $i_{уд}$ , кА	83,641	75,293	72,651	80,590
Действующее значение установившегося тока КЗ, $I_{\infty}$ , кА	27,641	29,025	28,006	31,067

Таблица 4.9 - Токи короткого замыкания для весеннего и осеннего сезонов

Параметр	Вид короткого замыкания			
	LLL	LG	LL	LLG
Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{п0}$ , кА	31,341	28,437	27,226	30,279
Ударный ток КЗ, $i_{уд}$ , кА	81,558	74,001	70,849	78,794
Действующее значение установившегося тока КЗ, $I_{\infty}$ , кА	27,673	28,437	27,226	30,279

Таблица 4.10 - Токи короткого замыкания для зимнего сезона

Параметр	Вид короткого замыкания			
	LLL	LG	LL	LLG
Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{п0}$ , кА	31,104	28,307	27,020	30,077
Ударный ток КЗ, $i_{уд}$ , кА	80,997	73,716	70,364	78,324
Действующее значение установившегося тока КЗ, $I_{\infty}$ , кА	27,673	28,307	27,020	30,077

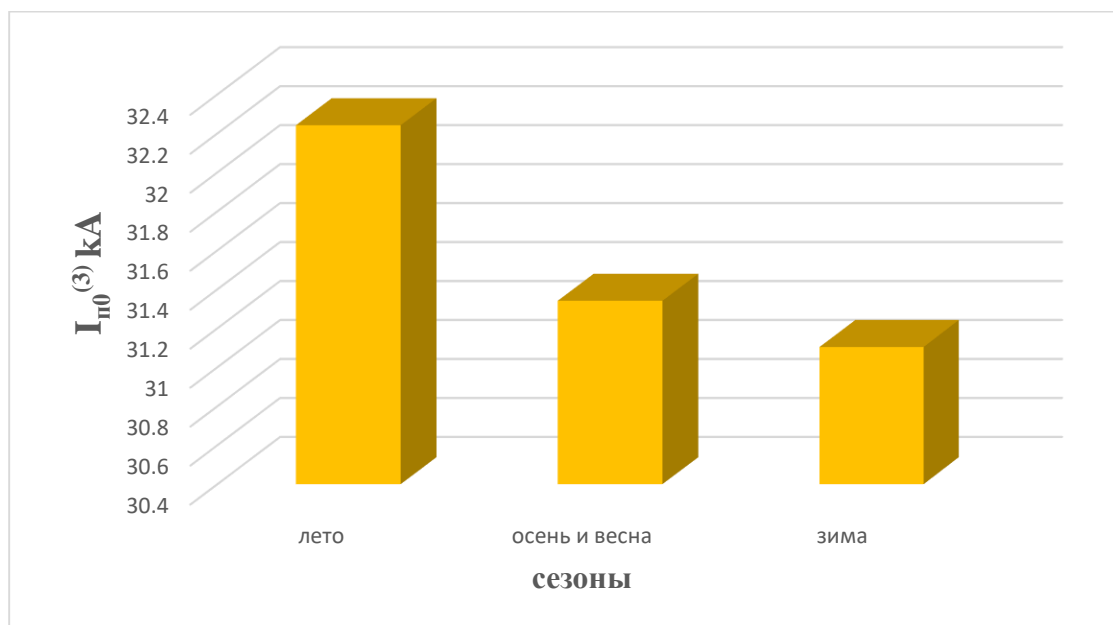


Рисунок 4.14 - Уровни токов короткого замыкания для всех сезонов

### Анализ устойчивости

В данном случае показана стабильность электрической системы, когда она теряет одну из своих нагрузок ( $U_m$  qaser), затем система сохраняет синхронизацию всех генераторов. На рисунках 4.15-4.16 показаны угол мощности системы и частота вращения генераторов соответственно.

Как видно, в отличие от текущей ситуации после интегрирования рассматриваемой гибридной электростанции в электрическую сеть стабильная работа всей электрической системы и синхронизм генераторов [143].

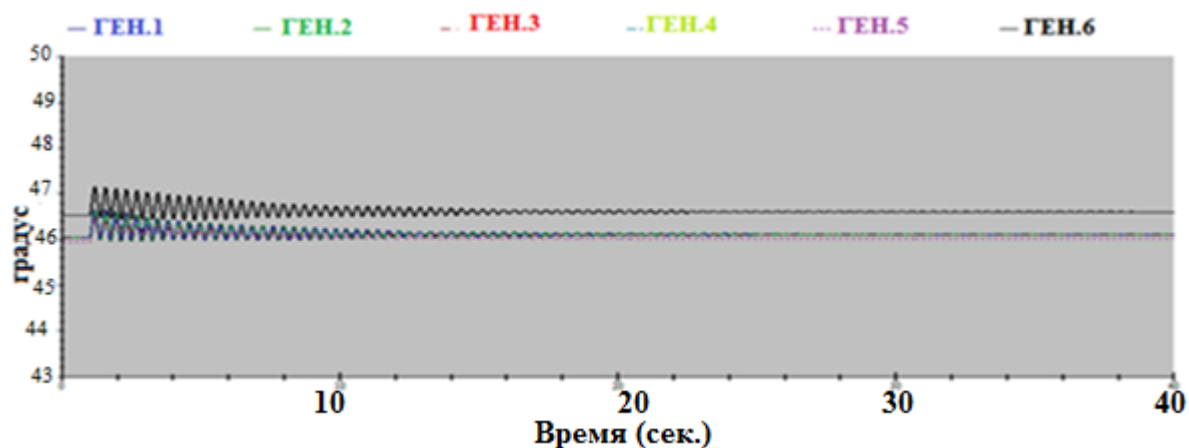


Рисунок 4.15 - Угол мощности всех генераторов

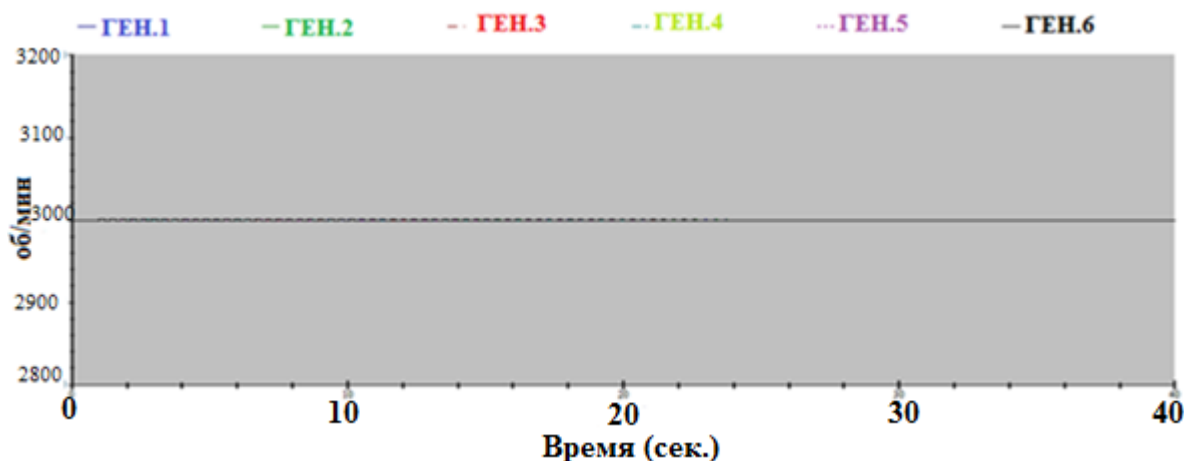


Рисунок 4.16 - Скорость генераторов

#### 4.5 Анализ балансов активной мощности

Для примера рассмотрим влияние на баланс активной мощности включение в состав системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) предлагаемой гибридной электростанции с комбинированным циклом.

В таблицах 4.11-4.14 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 соответственно.

Таблица 4.11 - 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 4.12 - Баланс активной мощности до модернизации в зимний сезон

Сезон	Приход, МВт		Расход, МВт	
	Зима	Из сети 400 кВ	121,8	Нагрузка
Из сети 132 кВ		50	Потери мощности	10,74
ГТУ		188		
Итого		359,8		359,79

Таблица 4.13 - 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

Таблица 4.14 - Баланс активной мощности после модернизации в зимний сезон

Сезон	Приход, МВт		Расход, МВт	
	Зима	Из сети 400 кВ	6,46	Нагрузка
Из сети 132 кВ		50	Потери мощности	10,83
ГТУ		188		
ПТУ		100		
Итого		344,46		344,46

В результате анализа значений в приведенных выше таблицах 4.11-4.14, которые показывают нам результаты анализа сети до модернизации и после модернизации для двух характерных сезонов (лето и зима), 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 этом, необходимая потребность в мощности из общенациональной сети 400 кВ до модернизации летом составляет 250 048 МВт, что является максимальной мощностью, потребляемой в течение года, и эта мощность уменьшается вдвое после модернизации, около 123 424 МВт, как показано в таблице 4.13

Использование электроэнергии несколько снижается в зимний период, примерно на 20-30%, как это показано в таблицах 4.12 и 4.14. Также отметим снижение выработки электроэнергии паровой частью гибридной электростанции в зимний период из-за уменьшения солнечной радиации и, как следствие, снижения эффективности использования поля солнечных коллекторов, что составляет порядка 100 МВт.

#### **4.6 Оптимизация режима системы электроснабжения по реактивной мощности с гибридной электростанцией с комбинированным циклом**

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 параметрах модуля указываются также ограничения по напряжению, напряжение на шинах и номиналы доступных конденсаторных батарей [144,145].

##### **Математическая модель задачи оптимизации**

Данная задача представляет собой задачу комбинаторной оптимизации, поскольку искомое количество конденсаторных батарей в качестве переменной имеет целочисленную дискретную природу, а их стоимость меняется нелинейно в зависимости от мощности батареи. Критерием оптимальности решения в задаче такого типа традиционно является минимум суммарных затрат на

установку конденсаторных батарей и затрат на потери мощности в электрической сети [146]. В соответствии с этим целевая функция, минимизирующая суммарные затраты, представлена следующим образом:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} (x_i C_{0i} + Q_{ci} C_{1i} + B_i C_{2i} T) + C_2 \sum_{l=1}^{N_{load}} T_l P_L^l, \quad (4.15)$$

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;  $B_i$  - количество конденсаторных батарей;  $Q_{ci}$  - мощность конденсаторной батареи;  $T$  - период планирования;  $C_2$  - стоимость потерь электроэнергии;  $l$  - ступень графика нагрузки;  $T_l$  - продолжительность ступени нагрузки  $l$ ;  $P_L^l$  - суммарные потери мощности для ступни графика нагрузки  $L$ .

Также в математической модели задачи представлены ограничения по допустимому уровню напряжения в узлах электрической сети, а также коэффициенту мощности [142].

$$\begin{aligned} U_{\min} &\leq U \leq U_{\max}, \\ PF_{\min} &\leq PF \leq PF_{\max} \end{aligned} \quad (4.16)$$

### Анализ результатов

Описанный выше метод был применен для оптимизации режима на примере объекта исследования - системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) в составе с предлагаемой гибридной электростанцией с комбинированным циклом.

Данный фрагмент электроэнергетической системы Ирака состоит из 10 основных шин, 24 ветвей и 30 узлов нагрузки (промышленных и жилых).

Можно отметить, что размещение конденсаторных батарей в этой системе улучшает профиль напряжения при достижении предельного коэффициента мощности и уменьшает потери активной и реактивной мощности. Основные результаты приведены на рисунках 4.17 – 4.18 и в таблице 4.15.

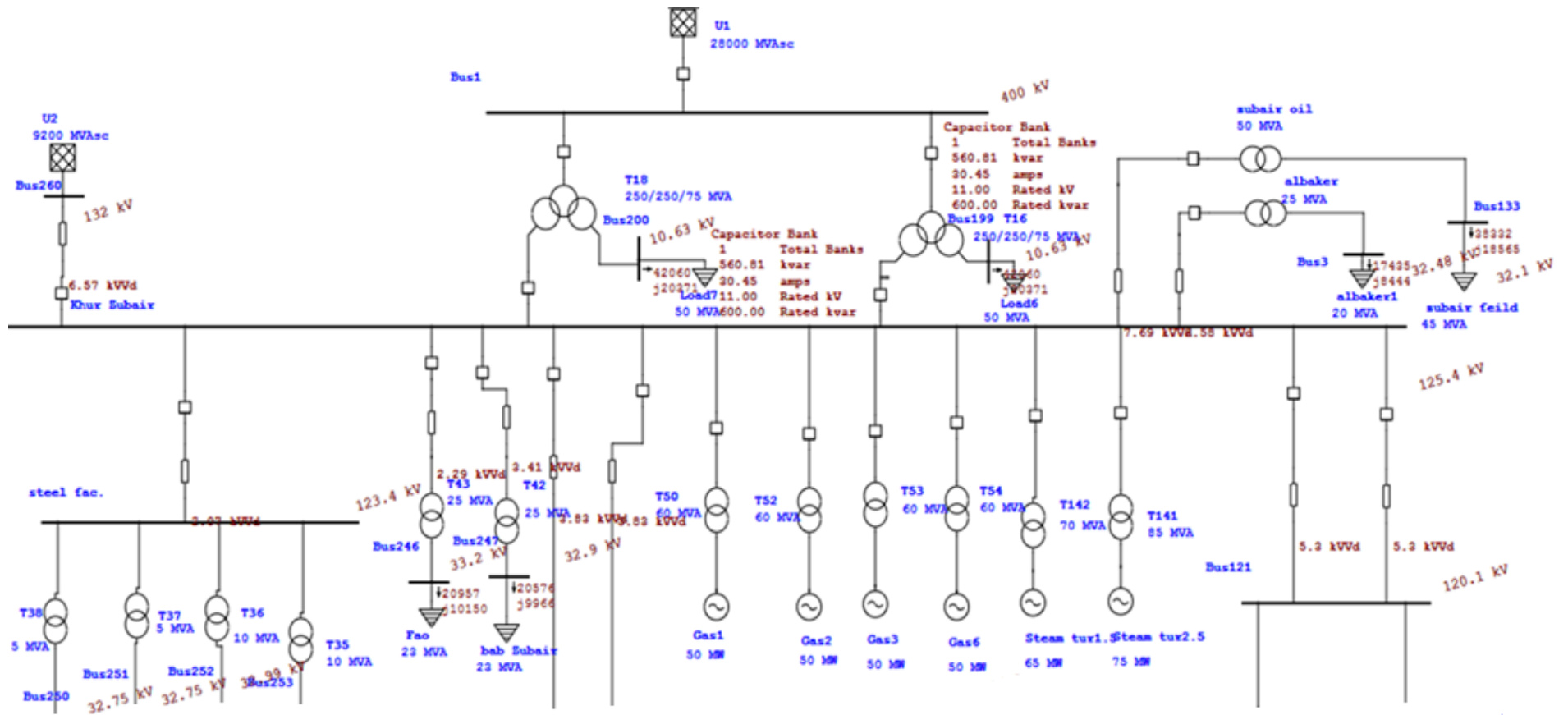


Рисунок 4.17 - Результаты оптимального размещения конденсаторных батарей (Верхний фрагмент)

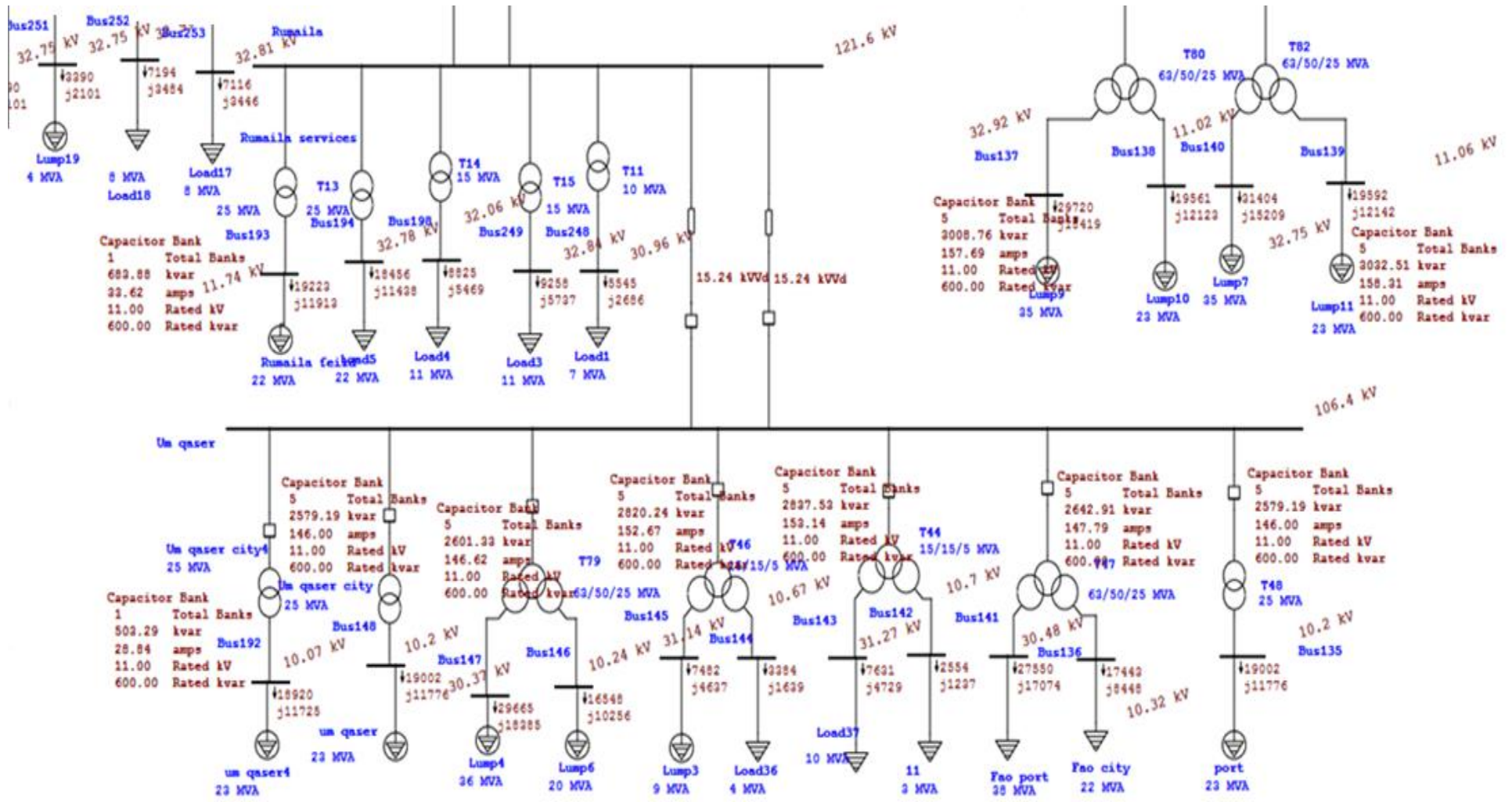


Рисунок 4.18 - Результаты оптимального размещения конденсаторных батарей (Нижний фрагмент)

Таблица 4.15 - Результаты оптимального размещения конденсаторных батарей

ID шин	Напряжение		Cosφ, %	Конденсаторные батареи			Стоимость,\$		
	Номинал, кВ	%		Единичная мощность, кВар	Кол-во	Суммарная мощность, кВар	Монтаж	Покупка	Эксплуатация
Шина 135	11	92,734	91	600	5	3000	600	4300	500
Шина 136	11	93,87	90	600	5	3000	600	4300	500
Шина 138	11	100,15	91	600	5	3000	600	4300	500
Шина 139	11	100,54	90	600	5	3000	600	4300	500
Шина 142	11	97,266	91	600	5	3000	600	4300	500
Шина 144	11	96,9	90	600	5	3000	600	4300	500
Шина 146	11	93,13	90	600	5	3000	600	4300	500
Шина 148	11	92,7	90	600	5	3000	600	4300	500
Шина 192	11	91,6	92	600	1	600	600	860	100
Шина 193	11	98,66	91,2	600	1	600	600	860	100
Шина 199	11	96,681	92	600	1	600	600	860	100
Шина 200	11	96,681	93	600	1	600	600	860	100
Итого					44	26400	7200	37840	4400

#### **4.7 Сравнительный анализ методов оптимизации режима по реактивной мощности**

В целом, для решения вопросов оптимизации используются две группы методов. Первые опираются на арифметический анализ, вторые - на численные вычисления.

Методы численной оптимизации можно разделить на использующие или не использующие дифференцирование. Последние применяются для решения задач, в которых невозможно или крайне сложно найти производные.

Эти методы в целом основаны на явлениях природы. Наиболее известными являются генетические алгоритмы (ГА), которые моделируют процесс эволюции в природе. Также существуют методы, основанные на поведении животных и насекомых (оптимизация роя частиц (ОРЧ)), на деятельности музыкального коллектива (поиск гармонии), а также ориентация поиска пути мотыльков в природе (оптимизация пути мотылька (ОПМ)).

##### **Генетический алгоритм**

Теоретические основы генетических алгоритмов были сначала охарактеризованы Джоном Холландом, а затем развиты Дэвидом Голдбергом. ГА — это алгоритмы исследования, опирающиеся на операции биологической эволюции. ГА использует "хромосомное" представление, которое требует кодирования решения как цепи ограниченной длины. Основное тело ГА, которое используется в данной работе, выглядит следующим образом.

Сначала производится произвольно построенная популяция решений. В этой популяции новые решения получаются за счет генетических операторов кроссовера и мутации. Кроссовер создает новое решение, обеспечивающее наследование некоторых фундаментальных характеристик родителей в новом решении. Мутация приводит к небольшим изменениям в организме нового решения и сохраняет разнообразие решений. Все новые решения расшифровываются, и оцениваются значения "приспособленности" к требованиям задачи. Эти величины представляют собой измерения

характеристик, которые используются для сравнения различных решений.

Сравнение проводится по выбранному методу, который определяет, какое решение является наилучшим, лучшее добавляется в популяцию, а худшее игнорируется [147].

Если после отбора в состав популяции входят равные решения, то избытки исключаются, а размер популяции уменьшается. Для пополнения популяции вырабатываются новые, случайно построенные решения, и начинается новый жизненный цикл. Это процесс выполняется до условия остановки. Это условие выполняется, если операция сошлась или достигнуто фиксированное наибольшее число поколений.

Степень вариабельности характеристик индивидуумов в популяции в течение нескольких поколений может служить мерой сходимости. Перед окончательным завершением работы алгоритма в качестве решения оптимизации возвращается лучший индивид последнего поколения. На рисунке 4.19 приведена блок-схема генетического алгоритма.

ГА — это алгоритм, зависящий от механики естественного отбора. По сути, ГА создает популяцию, которая развивается с течением времени, используя операции кроссовера и мутации. Наиболее важными аспектами использования ГА являются: определение критерия оптимизации, определение и кодирования оптимизируемых параметров, а также определение и представление генетических операторов [148].



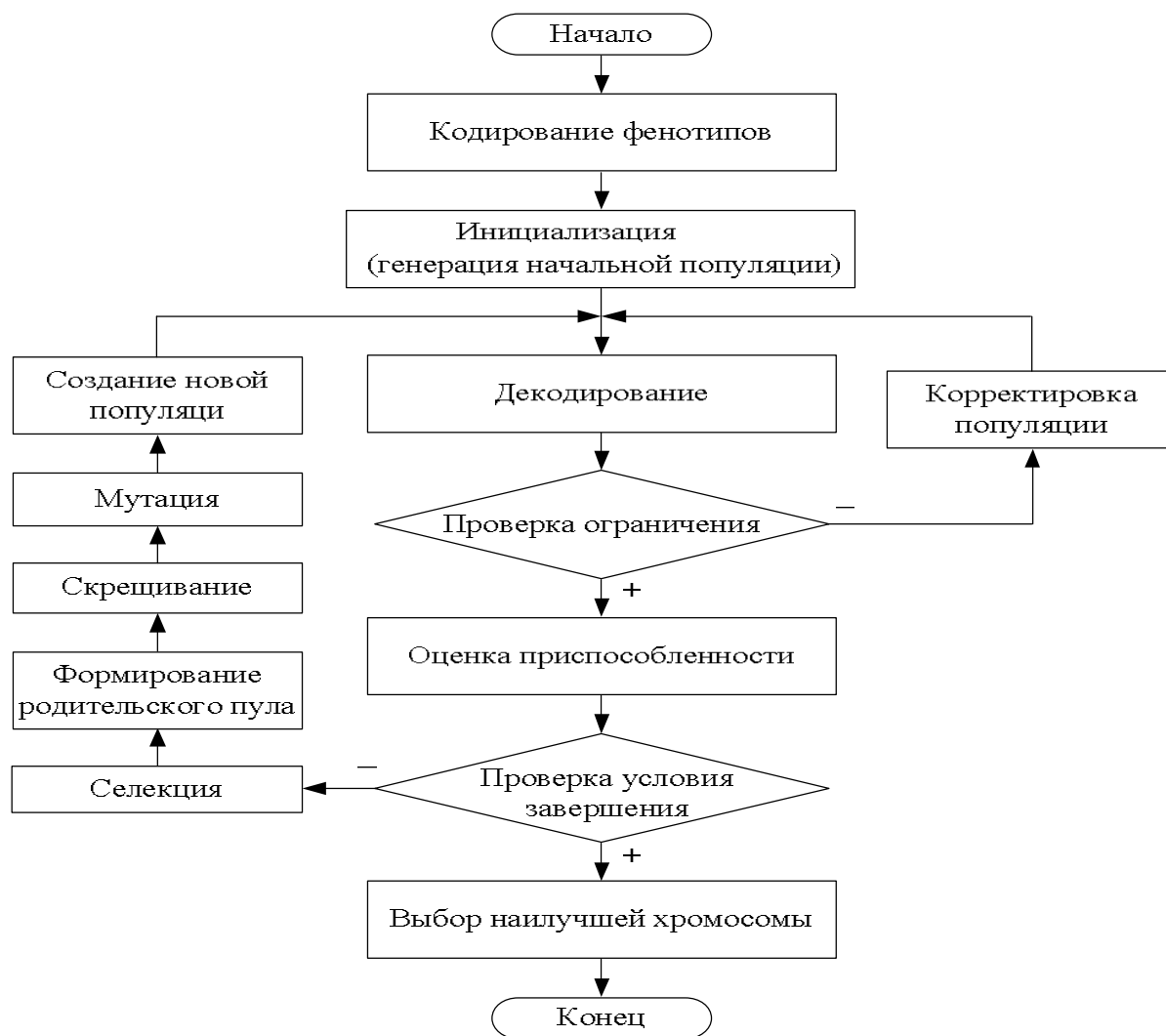


Рисунок 4.19 - Блок-схема генетического алгоритма

В рассматриваемой задаче, расположение и количество используемых конденсаторных батарей кодируются как хромосома. Выбор представления для этого устройства — это разделение хромосомы на две части. Первая часть указывает положение конденсаторных батарей. Во второй указывается количество используемых конденсаторных батарей. В процедуре размножения исходные случайно выбранные пары хромосом имеют одинаковую структуру. Затем хромосомы обрабатываются отдельно; двоичные и целочисленные. При двоичных переменных для данного местоположения, если два родителя имеют одинаковое количество (значение), сгенерированная хромосома сохранит его. Если значения не равны, результат для новой хромосомы выбирается случайным образом. В целочисленной части

хромосомы для данного местоположения результатом будет количество сумм (значений), которые существуют в родительских элементах. Когда результат не является целым числом (значением), он будет приближаться к ближайшему значению случайным образом. При операции мутации изменяется тело хромосомы. Эта мутация выполняется случайным образом, но есть различия между целочисленными и двоичными переменными. ГА может быстро улучшить качество случайно созданной популяции, а затем за довольно короткое время выработать оптимальное решения [149].

### **Оптимизация пути мотылька**

ОПМ — это мета-эвристический алгоритм, разработанный Мирджалили в 2015 году. Оптимизация в данном случае отражает поперечную навигацию, которая является стилем перемещения мотыльков в пространстве. В природе обитает более 150 000 групп насекомых, в том числе мотыльков. У мотыльков есть две фазы жизни: личинка и зрелая фаза. Эти насекомые имеют большое сходство с группой бабочек только в ночное время. При этом мотыльки проходят длинные участки и прямые линии, сохраняя фиксированный вид вместе при лунном свете. Этот способ подходит для изучения данных насекомых именно во время, когда освещение далеко от них. Если свет (пламя) близко, моль летит по спирали пока не попадет в пламя.

Мотыльки показывают путь к выбранному решению, а пламя является наилучшим на текущий момент решением. Таким образом, мотыльки имеют возможность летать в одном измерении или дальше с изменением векторов положения [150].

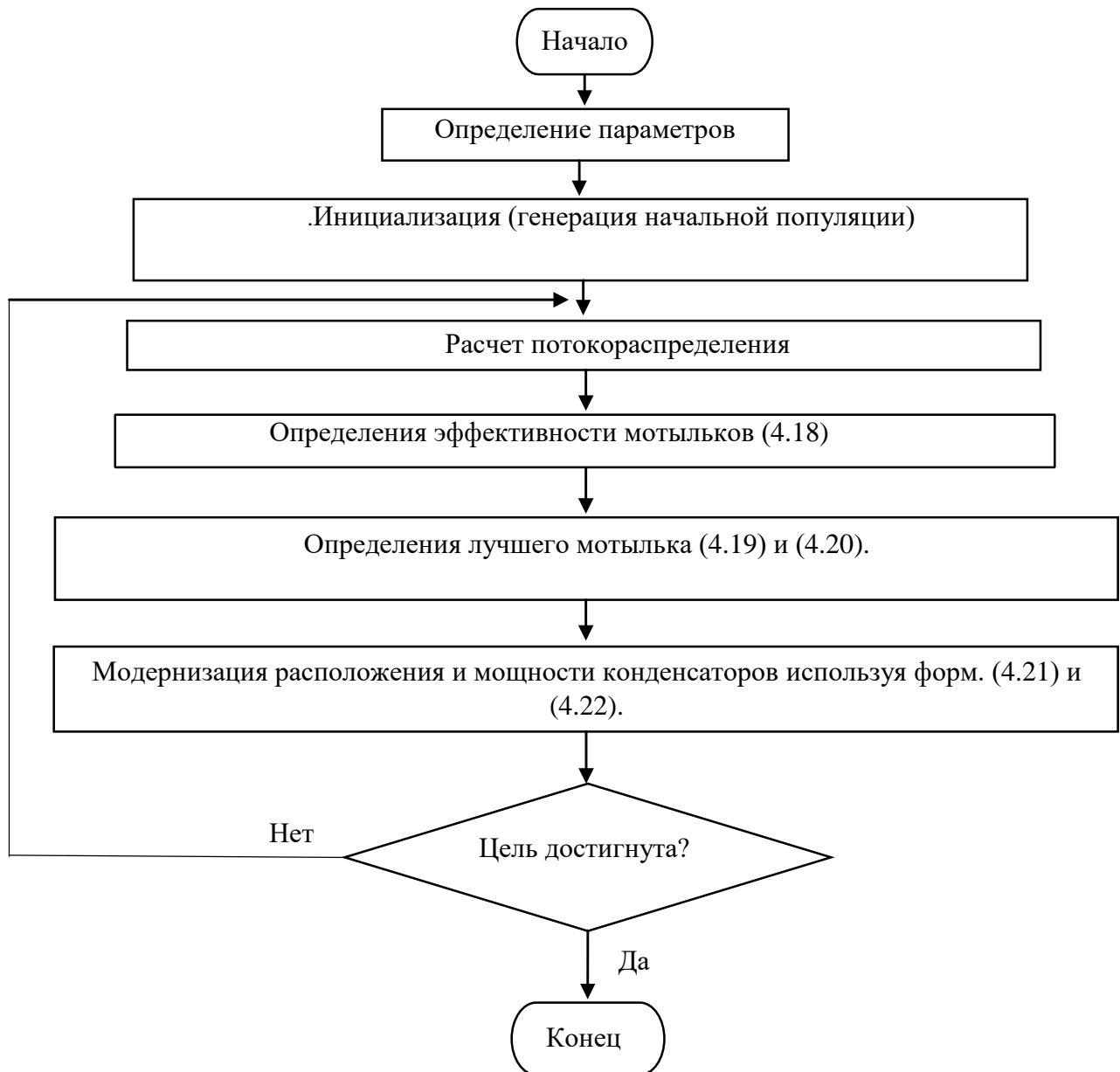


Рисунок 4.20 - Блок-схема алгоритма ОПМ

На рисунке 4.20 показана блок-схема модифицированного алгоритма ОПМ, а также процедуры, описанные ниже:

1. Инициализирование переменных, таких как: количество мотыльков  $N$ , размер пространства  $D$ , максимальное число повторений  $Max_{it}$ , минимальное граничное значение  $lb$ , максимальное граничное значение  $ub$ , значение напряжения, а также места расположения конденсаторной батареи.

2. Случайное воспроизведение положения и количества конденсаторных батарей и форматирование положения начальной моли, как в уравнении (4.17):

$$Mo = \begin{bmatrix} Mo11 & Mo12 & \dots & Mo1d \\ Mo21 & Mo22 & \dots & Mo2d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Mon1 & Mon2 & \dots & Mond \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

3. С использованием данных о нагрузке и результатах расчёта режима рассчитывается эффективность с помощью уравнения (4.18).

$$Minimize = \sum_{i=1}^{Nb} P_{cost} * P_{loss}^i + \sum_{j=1}^{Nc} Cap_{cost}^j * Cap^j + \sum_{k=1}^{Nb} |V_k - 1|, \quad (4.18)$$

где  $x$  обозначает лучшее размещение и количество конденсаторных батарей,  $Nb$  - количество узлов,  $P_{cost}$  - стоимость реальных потерь мощности,  $P_{loss}^i$  - потери мощности на шине  $i$ ,  $Nc$  - количество конденсаторной батарей.  $Cap_{cost}^j$  - стоимость конденсаторной батарей  $j$ ,  $Cap^j$  - мощность конденсаторной батарей  $j$ ,  $V_k$  - величина напряжения на шине  $k$ .

4. Выбрали лучшее местоположение моли с учетом положения пламени и лучшую величину стоимости моли с учетом стоимости пламени, используя уравнения (4.19) и (4.20).

$$F = \text{Sort}(Mo_{i-1}, Mo_i) \quad (4.19)$$

$$OF = \text{Sort}(OMo_{i-1}, OMo_i) \quad (4.20)$$

5. Рассчитывается расстояние между пламенем и молью, после чего рассчитывается другое местоположение моли с использованием уравнений (4.21) и (4.22).

$$D_i = |F_j - Mo_i| \quad (4.21)$$

$$Mo_i = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j, \quad (4.22)$$

где  $D_i$  - пространство,  $b$  - фиксированное число ( $b=1$ ), и  $t$  - случайное число в диапазоне  $[-1, 1]$

6. Повторение шагов 3–5, пока не появится конечный результат.

### Империалистический конкурентный алгоритм

ИКА — это новый мета-эвристический алгоритм, предложенный для решения задач оптимизации. Он разработан Эсмаила Аташпаз-Гаргари и Лукаса в 2007 году [151]. Данный алгоритм представляет собой новую социально-политически мотивированную глобальную поисковую стратегию, которая была добавлена для решения различных задач оптимизации. На рисунке 4.21. показана блок-схема ИКА.

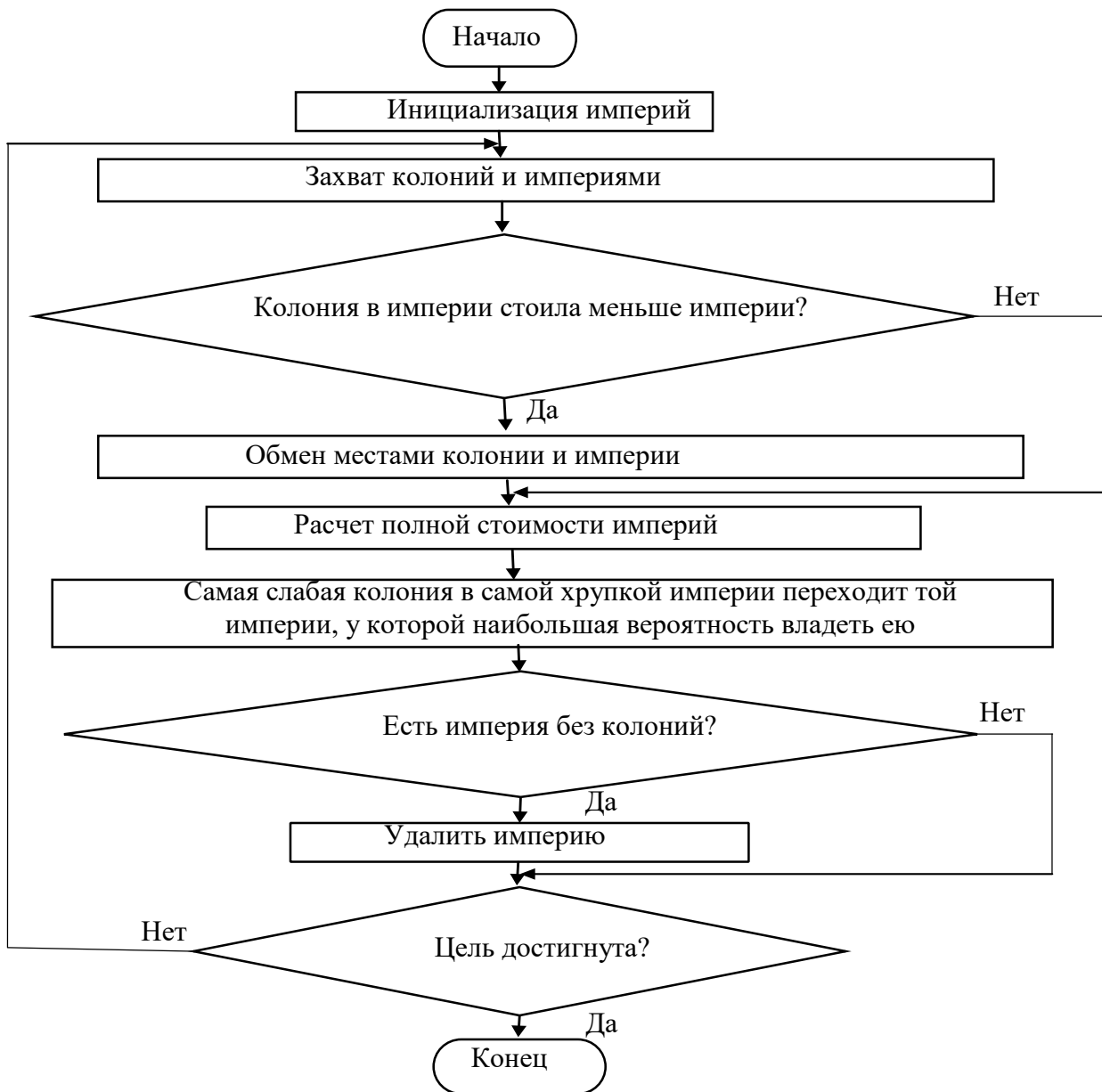


Рисунок 4.21 - Блок-схема ИКА

На рисунке 4.21 показана блок-схема алгоритма ИКА, а сами процедуры таковы:

1. Инициализирование переменных, таких как: численность населения  $N_{pop}$ , максимальное число итераций  $Max_{it}$ , число империалистических стран  $N_{imp}$ , и число колоний стран  $N_{col}$ , напряжения, а также местоположение конденсаторных батарей.

2. Случайное расположение и количество конденсаторных батарей и форматирование первой страны следующим образом:

$$country_i = [l_1, \dots, l_m, Cap_1, \dots, Cap_m], \quad (4.23)$$

где  $m$  – количество конденсаторных батарей.

3. При определенной нагрузке и возможных решениях выполняется расчет потока мощности системы, как в уравнениях (4.18).

4. Определение колонизированных стран и империалистов, опираясь на стоимость, как в уравнениях (4.24) и (4.25)

$$f(country_i) = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{DN}), \quad (4.24)$$

$$C_n = c_n - \max(c_i) \quad (4.25)$$

где,  $c_n$  представляют собой стоимость  $n$ -го империалиста и  $C_n$ .

5. Изменение расположения и мощности конденсаторных батарей для всех империй, как в уравнении (4.26).  $Mx$  является случайной величиной с регулярным распределением и может быть выражено следующим образом:

$$Mx \sim U(0, \beta \cdot ds), \quad (4.26)$$

где  $\beta$  - это цифра больше 1 ( $\beta = 2$ ), а  $ds$  - это пространство между колонией и империалистом.

1. Повторение шагов 3–5, пока не появится конечный результат.

## Моделирование и результаты

В качестве объект исследования используется рассматриваемый фрагмент системы электроснабжения Южного Ирака (г. Басра) с гибридной электростанцией с комбинированным циклом. Расчеты выполнены с помощью программного обеспечения ETAP, Open DSS, MATLAB для трех вышеизложенных методов оптимизации. В таблице 4.16 приведены полученные результаты и их сравнение. На рисунке 4.22 показан уровень напряжения в исходном режиме, при использовании РПН, а также при оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Таблица 4.16 - Сравнение полученных результатов

Название	Исходный режим	Стандартное решение с РПН	Генетический алгоритм (ГА)	Импералистический конкурентный алгоритм (ИКА)	Оптимизация пути мотылька (ОПМ)
Суммарные потери (МВт)	21,4	18,6	14,2	15,8	15,4
Сокращение потерь (%)	-	24,6	35,4	30,3	31,6
Суммарная мощность конденсаторных батарей (кВАр)	-	30000	28000	33500	33000
Годовая стоимость потерь мощности (\$/кВт)	3252800	2827200	2158400	2401600	2340800
Годовая стоимость конденсаторных батарей (\$/кВАр)	-	108000	56000	67000	66000
Экономия (%)	-	32,7%	35,6%	32,1%	30,9%
Номинальный коэффициент мощности (%)	80%	>90%	92%	90%	91,4%
Среднее напряжение (о.е.)	0,88	1,024	1,023	1,019	1,019
Отклонение напряжения (о.е.)	0,06	0,015	0,013	0,014	0,014
Минимальное напряжение (о.е.)	0,633	0,996	0,997	0,999	0,99
Максимальное напряжение (о.е.)	0,899	1,048	1,047	1,039	1,04

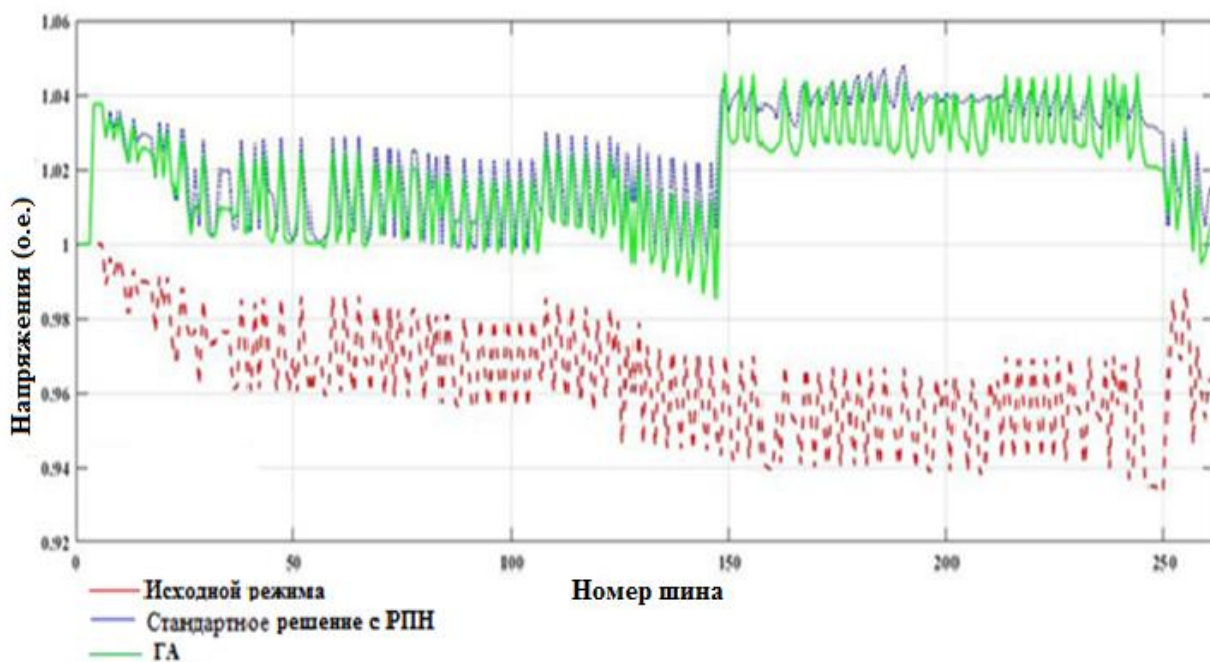


Рисунок 4.22 - Уровень напряжения в исходном режиме, при использовании РПН, а также при оптимизации с помощью генетического алгоритма

Получение оптимального решения генетическим алгоритмом показано на рисунке 4.23.

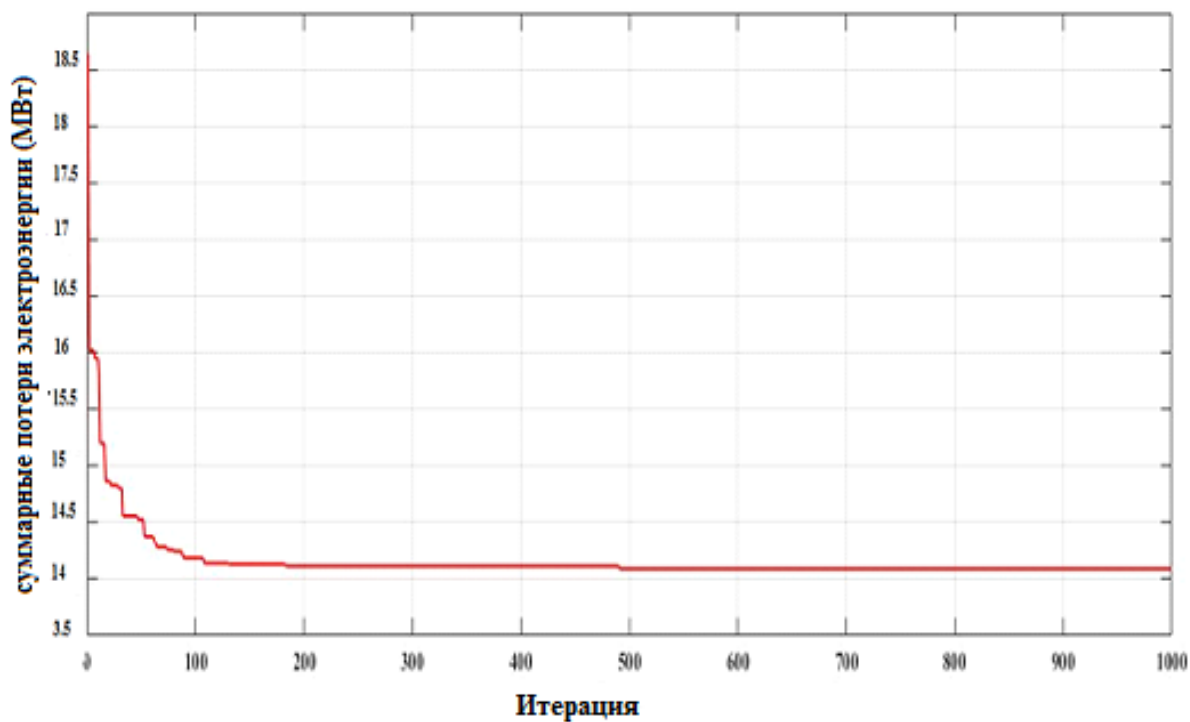


Рисунок 4.23 - Сходимость ГА и суммарные потери электроэнергии (МВт)



## Выводы по главе 4

В главе рассмотрен вопрос комплексного анализа режимов системы электроснабжения с интегрированием в нее гибридной электростанции с комбинированным циклом.

Объектом исследования является фрагмент системы электроснабжения Южного Ирака с гибридной электростанцией с комбинированным циклом. Рассмотренная электростанция предлагается для модернизации путем добавления комбинированного цикла для существующей газовой станции на юге Ирака в промышленном и густонаселенном городе - Басра.

Исследованная система электроснабжения страдает от постоянных отключений, больших потерь электрической энергии и значительных нарушений напряжения, вызванных несколькими факторами, одним из которых является дефицит электрической энергии.

С использованием программы ETAP выполнено моделирование системы электроснабжения и проведён анализ ее режимов, а с помощью модуля оптимального размещения конденсаторных батарей были выявлены слабые узлы и была добавлена группа конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

Показаны положительные результаты, полученные с помощью модуля оптимального размещения конденсаторных батарей, вследствие наблюдается улучшение характеристик напряжения, уменьшение потерь электрической энергии и улучшение коэффициента мощности.

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, империалистический конкурентный алгоритм, оптимизация пути мотылька. Из полученных результатов и их сравнения рекомендуется использовать метод ГА, благодаря скорости работы и точности получаемой информации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы отражены в следующих положениях:

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 многофакторная 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 комбинированным 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 анализ потокораспределения и устойчивости с использованием программного комплекса ETAP 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  $\text{CO}_2$  составит около 170 672 т/год.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Iraqi Ministry of Electricity [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moelc.gov.iq/> .
2. Al-Khatteeb Luay, Harry Istepanian, Turn a Light On: Electricity Sector Reform in Iraq, 2015 Brookings Institution, pp 213.
3. World Energy Outlook Special Report, Iraq Energy Outlook, 9 October 2012, [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.iea.org](http://www.iea.org) .
4. Al-Rikabi, Hashim, Al-Bayan, Center for Planning and Studies, An Assessment of Electricity Sector Reforms in Iraq- 2017, pp 322, [www.bayancenter.org](http://www.bayancenter.org) .
5. Yasen, Mohammed Hammed, 'Enhancing the Control of Iraqi Power System Using FACTS Devices and Renewable Energy with Matlab Simulation', India, 2014.
6. Yasen, Mohammed Hammed. New Overview and Classification of Power System Stability, *Advances in Energy Engineering*, Volume 4, 2016. doi: 10.14355/aee.2016.04.002.
7. Аль Зухаири, Али Мохаммед Кадхим, профессор А. А. Виноградов, специальные вопросы повышения энергетической Эффективности распределительных сетей Ирака [Text]/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Белгород – 2015.
8. Haadi Saadat, *Power System Analysis* [Text]/ by McGraw-Hill, 1999, 720 pp.
9. Rafah Ibraheem Jabbar. Enhancement of Iraqi Power Distribution Systems Performance using Optimal System Reconfiguration [Text]/ Alwash, Shamam Fadhil // *Journal of Babylon University/Engineering Sciences/ No. (5)/ Vol. (25): 2017.*
10. Uqaili, Thamir. the integrated national energy strategy of Iraq “2010-2030”, [Text] Analysis of the Executive Summary of the INES, June 2013.
11. Ghassan, Abdullah Salman, Voltage Collapse Detection in Iraqi Electrical Network Using Different Types of Indices [Text]// *International Journal of Science and Research (IJSR)*, ISSN: 2319-7064, Value (2013): 6.14.

12. Nizam, M. Dynamic Voltage Collapse Prediction In Power Systems Using Power Transfer Stability Index [Text]/ A.Mohamed, A.Hussain // 1<sup>st</sup> Power and Energy Conference PECon, pp 246-250, 2006.
13. Hasani, M. Method of Combined Static and Dynamic Analysis of Voltage collapse in Voltage Stability Assessment [Text]/ M. Parniani // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, China,2005.
14. The world bank [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://data.worldbank.org/>.
15. Harry Istepanian, Iraq's Electricity from Crisis to ISIS, Power Engineering International September 2014, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tej.2014.04.006>.
16. Hamada Dara Zahawi, Legal Guide to Investing in Power Generation in Iraq, 2016 [Text]/ Ahmed Dawood, Mohammed Shaikley, Tom Eldert, Alex Evans.
17. Ministry of electricity “Iraq electricity masterplan”, December 2010, 63pp.
18. Electricity sector in Iraq, From Wikipedia, [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity\\_sector\\_in\\_Iraq](https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_sector_in_Iraq) .
19. Sachs, J., Asad, S., & Qaragholi, H, Iraq’s Power Crisis and The Need To Re-Engage The Private Sector – Smartly. Washington-Baghdad: MEES, (2011).
20. Saif Rashid, Electricity Problem in Iraq, Economics and Planning of Technical Urban Infrastructure Systems, March 18-2012, 22pp.
21. IAU Iraq. (2010, July). Electricity Factsheet. Baghdad, Iraq, 2p.
22. Library of Congress – Federal Research Division. (2006, August). Country Studies. Retrieved September 2011, from Library of Congress: <http://lcweb2.loc.gov/frd/cs/profiles/Iraq.pdf>
23. Ministry of Planning. (2010). National Development Plan for the Years 2010-2014. Baghdad: Ministry of Planning, 186pp.
24. O’Hanlon, M. E., & Livingston, I. (2011, January 31). Iraq Index. USA: Brookings, 200pp.
25. UNAMI; UNDP Iraq. (2008, October). Overview of Iraq's Electricity. Baghdad, Iraq, 130pp.

26. 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.
27. UNDP. (2008). Opportunities for IPP Investment in Iraq. Partnership for Power Generation. Dead Sea, Jordan: UNDP, 32p.
28. Jeff Larkin, Parsons Brinckerhoff, “Iraq’s electricity master plans”, Iraq Future Energy 2011, Istanbul 26th September 2011.
29. Kazem, H. A. Status and future prospects of renewable energy in Iraq [Text]/ Chaichan, M. T.// Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 6007–6012.
30. Gautier, Michel, UNDP agencies participating: UNDP, world bank, joint Iraq needs assessment electricity, October 2003.
31. Chaichan, M. T. Thermal storage comparison for variable baseload kinds of a solar chimney prototype in Baghdad - Iraq weathers [Text]/ Kazem, Hussein A.// International Journal of Applied Science (IJAS) 2011;2(2).
32. CIA World Factbook. 2011. Iraq country study. Central Intelligence Agency. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/geos/iz.html>.
33. Iraqi General Organization for Meteorology and Seismic Monitoring, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.meteoseism.gov.iq/>.
34. International Renewable Energy Agency (IRENA) [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.irena.org/publications/2016/Jan/Renewable-Energy-Market-Analysis-The-GCC-Region>.
35. Abass, A. Z. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy [Text]/ Pavlyuchenko, D. A. // International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(6), 2019, p. 4617-4624.
36. Solar and meteorological data sets from NASA research for support of renewable energy, building energy efficiency and agricultural needs. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.



37. Abass, Ahmed. Z. Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land [Text]/ Pavlyuchenko, D.A // E3S Web of Conferences 114, 05009 (2019). Energy Systems Research 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405009>.
38. General Electric, Iraq Exploration Team Trip Report, briefing slides, June 2003, Occupying Iraq: A History of the Coalition Provisional Authority, pp. 107-148 (42 pages).
39. Government of Iraq Ministry of Electricity; Government of Iraq budget figures, cited in Centre for Strategic and International Studies, “Iraq after the Election: Meeting the Challenges of 2010, Presentation July 2010, 30pp.
40. Hadi, J.M, Experimental & Theoretical Study to Enhance Solar Air Heater by Using Vortex Generator [Text]/ M.Sc. Thesis, University of technology, Iraq, 2005.
41. Al-Rawi, A.M, An Experimental And Theoretical Study To Improve The Performance Of A Solar Water Heater of Pyramidal Right Triangular Cross-Sectional Area [Text]/ M.Sc. Thesis, University of technology, Iraq, 2007.
42. Abass, Kh.I. Experimental study of using solar energy storage wall for heating Iraqi houses purposes [Text]/ Chaichan, M.T.// Wassit Journal for Science & Medicine, 2009;2(2):212–21.
43. Ahmed, I. Solar Radiation Maps For Iraq [Text]/ Al-Hamad. N., Ibrahim, K. // SE 1983;31(1-D):29–44.
44. Абасс, А.З., Перспективы использования солнечной энергии в Ираке [Text]/ Павлюченко, Д.А., Кобобель, И.В.// Вестник Казанского Государственного Энергического Университета, №1, 2020 (45); С. 63-70.
45. United State Department of Agriculture, Fact sheet for USDA at work for agriculture in Iraq, November 2009.
46. Al-Karaghoul, A. Current Status of Renewable Energies in the Middle East –North African Region [Text]/ Study by UNEP/ROWA, 2009.
47. Al-Waeli, A. A. K. Analysis of Stand-Alone Solar Photovoltaic for Desert in Iraq [Text]/ Al-Asadi, Kadhem A. N.// International Research Journal of Advanced Engineering and Science.

48. Chaichan, M. T. Optimal sizing of a hybrid system of renewable energy for lighting street in Salalah-Oman using Homer software [Text]/ Kazem, H. A., Mahdy, A. M. J. & Al-Waeely, A. A.// International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS), vol. 2, no. 5, pp. 157-164, 2016.
49. Kazem, H. A. The impact of using solar colored filters to cover the PV panel on its outcomes [Text]/ Chaichan, M. T. // Bulletin Journal, vol.2, no. 7, pp. 464-469, 2016.
50. Chaichan, M. T. Optimization of hybrid solar PV/ diesel system for powering telecommunication tower [Text]/ Kazem, H. A., Mahdy, A. M. J. & Al-Waeely, A. A.// IJESSET, vol. 8, no. 6, pp. 1-10, 2016.
51. Al-Waeli, A. H. A., An experimental investigation on using of nano-SiC-water as base-fluid for photovoltaic thermal system [Text]/ Sopian, K., Chaichan, M. T. and Kazem, H. A., H.A. Hasan, Al-Shamani, A. N. // Energy Conservation and Management, vol. 142, pp. 547-558, 2017.
52. Al-Waeli, H. A. Comparative study to use nano-(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors [Text]/ M. T. Chaichan, H. A. Kazem, K. Sopian// Energy Conversion and Management, vol. 148, no. 15, pp. 963-973, 2017.
53. Darwish, Z. A. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status [Text]/ H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Alghoul and M. T. Chaichan // International J of Energy and Environment, vol. 7, no. 4, pp. 152-159, 2013.
54. Chaichan, M. T. Experimental analysis of solar intensity on photovoltaic in hot and humid weather conditions [Text]/ H. A. Kazem // International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, no. 3, pp. 91-96, 2016.
55. Kazem, H. A. Design, measurement and evaluation of photovoltaic pumping system for rural areas in Oman [Text]/ A. H. A. Al-Waeli, M. T. Chaichan, A. S. Al-Mamari, A. H. Al-Kabi// Environment Development and Sustainability, 2016.
56. Kazem, H. A. Design and analysis of stand-alone solar photovoltaic for desert in Oman [Text]/ F. Hasson and M. T. Chaichan // The 3rd Scientific International Conference, Technical College, Najaf, Iraq, 2013.

57. Al-Waeli, A. H. A. Evaluation of the economic and environmental aspects of using photovoltaic water pumping system [Text]/ A. S. A. Al-Mamari, A. H. K. Al-Kabi, M. T. Chaichan, H. A. Kazem // 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications, Malaysia, 2016.
58. Chaichan, M. T. Generating Electricity Using Photovoltaic Solar Plants in Iraq [Text]/ H. A. Kazem // Springer, ISBN: 978-3-319-75030-9.
59. Chaichan, M. T. The effect of environmental conditions on concentrated solar system in desertec weathers [Text]/ H. A. Kazem, A. A. Kazem, K. I. Abass, K. A. H. Al-Asadi // International Journal of Scientific and Engineering Research, vol. 6, no. 5, pp. 850-856, 2015.
60. Kazem, H. A. Design and analysis of standalone solar cells in the desert of Oman [Text]/ M. T. Chaichan, // Journal of Scientific and Engineering Research, vol. 3, No. 4, pp. 62-72, 2016.
61. Kazem, H. A. Effect of humidity on photovoltaic performance based on experimental study [Text]/ M. T. Chaichan, // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), vol.10, no. 23, pp. 43572-43577, 2015.
62. Chaichan, M. T. Effect of sand, ash and solar photovoltaic performance: An experimental study [Text]/ H. A. Kazem, // Internat Journal of Scientific Engineering and Science, vol. 1, no. 2, pp 32, 2017.
63. Chaichan, M. T. Novel technique for enhancement of diesel fuel: Impact of aqueous alumina nanofluid on engine's performance and emissions [Text]/ A. H. Kadhum, A. A. Al-Amiery, // Case Studies in Thermal Engineering, vol. 10, pp. 611–620, 2017.
64. Chaichan, M. T. Performance and emissions characteristics of CIE using hydrogen, biodiesel, and massive EGR [Text]/ International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, pp. 5415-5435, 2018.
65. Chaichan, M. T. Operational parameters influence on resulted noise of multi-cylinders engine runs on dual fuels mode [Text]/ D. S. M. Al-Zubaidi, // Journal of Al-Rafidain University Collage for Science, vol. 35, pp. 186-204, 2014.

66. Chaichan, M. T. Traffic and outdoor air pollution levels near highways in Baghdad, Iraq [Text]/ H. A. Kazem, T. A. Abid, // *Environment, Development and Sustainability*, vol. 20, no. 2, pp. 589-603, 2018.
67. Al-Waeli, A. H. A. Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study [Text]/ K. Sopian, M. T. Chaichan, H. A. Kazem, A. Ibrahim, S. Mat and M. H. Ruslan // *Energy Conversion and Management*, vol. 151, pp. 693–708, 2017.
68. Al-Waeli, A. H. A. Photovoltaic thermal PV/T systems: A review [Text]/ K. Sopian, H. A. Kazem and M. T. Chaichan // *International Journal of Computation and Applied Sciences IJOCAAS*, vol. 2, no. 2, pp. 62-67, 2017.
69. Kazmerski, L. L. Photovoltaic: History, technology, markets, manufacturing, applications, and outlook [Text]/ 83rd International Seminar in Brighton, Renewable Energy Policy, Security, Electricity, Sustainable Transport, Water Resources/Management and Environment, Brighton, UK, 4-10 December 2010.
70. Al-Waeli, A. H. A. Comparison study of indoor/outdoor experiments of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system enhancement [Text]/ M. T. Chaichan, K. Sopian and H. A. Kazem, // *Energy*, vol. 151, pp. 33-44, 2018.
71. Govinda, R. Timilsina. A Review of Solar Energy Markets, Economics and Policies [Text]/ Lado Kurdgelashvili, Patrick A. Narbel, // *The World Bank Development Research Group, Environment and Energy Team* October 2011.
72. Fayadh, M. Abed. Review on the energy and renewable energy status in Iraq: The outlooks [Text]/ Y. Al-Douri, Ghazy .M. Y. Al-Shahery, // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 816–827.
73. Kazem, H A. Status and future prospects of renewable energy in Iraq [Text]/ Chaichan M T. // *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:6007–12.
74. Chaichan, M. T. Experimental study of water heating salt gradient solar pond performance in Iraq [Text]/ K. I. Abass, and F. F. Hatem // *Industrial Applications of Energy Systems (IAES09)*, Sohar University, Oman, 2009.

75. Chaichan, M. T. Practical study of basement kind effect on solar chimney air temperature in Baghdad-Iraq weather [Text]/ Al Khwarizmi Eng. Journal, vol. 7, no. 1, pp. 30-38, 2011.
76. Chaichan, M. T. Practical investigation for improving concentrating solar power stations efficiency in Iraqi weathers [Text]/ K. I. Abass // Anbar J for Engineering Science, vol. 5, no. 1, pp. 76-87, 2012.
77. Al-Maamary, H. M. S. The impact of the oil price fluctuations on common renewable energies in GCC countries [Text]/ H. A. Kazem, M. T. Chaichan, // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp.989-1007, 2017.
78. Mazin, H. Linear and nonlinear modeling for solar energy prediction for zone, region and global areas [Text]/ H. A. Kazem, H. A. Fadhil, S. A. Aljunid, Q. M. Abdulmajeed, and M. T. Chaichan, // Chapter in Renewable Energy in the Service of Mankind, vol. II, Springer, pp. 21-34, 2015.
79. Al-Maamary, H. M. S. Changing the energy profile of the GCC States: A review [Text]/ H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), vol. 11, no. 3, pp. 1980-1988, 2016.
80. Chaichan, M. T. Control of hydraulic transients in the water piping system in Badra-pumping station No.5 [Text]/ D. S. M. Al-Zubaidi, // Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ), vol.18, no. 2, pp. 229-239, 2015.
81. Al-Waeli, A. H. A. Optimum design and evaluation of solar water pumping system for rural areas [Text]/ M. M. El-Din, A. H. Al-Kabi, A. Al-Mamari, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, // International Journal of Renewable Energy Research, vol.7, no. 1, pp. 12-20, 2017.
82. Абасс, А.З. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций Ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны [Text]/ Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., Лесс В.М. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(2):98-107. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-98-107> .

83. Kazem, A. A. Effect of dust on photovoltaic utilization in Iraq: review article [Text]/ M. T. Chaichan, and H. A. Kazem, // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 37, pp. 734-749, 2014.
84. Chaichan, M. T. Status and future prospects of renewable energy in Iraq [Text]/ H. A. Kazem, // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1, pp. 6007–6012, 2012.
85. Chaichan, M. T. Optimization of hybrid solar PV/ diesel system for powering telecommunication tower [Text]/ H. A. Kazem, A. M. J. Mahdy & A. A. Al-Waely, // IJESSET, vol. 8, no. 6, pp. 1-10, 2016.
86. Al-Waely, A. A. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq [Text]/ S. D. Salman, W. K. Abdol-Reza, M. T. Chaichan, H. A. Kazem and H. S. S. Al-Jibori, // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, vol. 14, no. 2, pp. 16-23, 2014.
87. Yaseen, B. R. Environmental impacts of salt tide in Shatt al-Arab-Basra/Iraq [Text]/ K. A. Al Asaady, A. A. Kazem, M. T. Chaichan, // IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, vol. 10, No. 1-2, 35-43, 2016.
88. Al-waely, A. A. The environmental aftermath resulted from chemical bombardment of Halabja Territory for the period 1988-2014 [Text]/ H. N. Al-qaralocy, K. A. N. Al-Asadi, M. T. Chaichan, H. A. Kazem // International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 6, n0. 9, pp. 40-44, 2015.
89. Al-Waeli, A. H. A. Techno-economical assessment of grid connected PV/T using nanoparticles and water as base-fluid systems in Malaysia [Text]/ H. A. Kazem, K. Sopian and M. T. Chaichan, // International Journal of Sustainable Energy, 2017.
90. Chaichan, M. T. Practical investigation for measurement of concentrating solar power prototype for several target cases at Iraqi summertime weathers [Text]/ K. I. Abass, // 1st Scientific Conference for Energy & Renewable Energies Applications, UOT, Baghdad, Iraq, 2011.
91. Khelifa, A. Approach for the modelling of hybrid photovoltaic–thermal solar collector [Text]/ Touafek K., & Moussa H. B., // IET Renewable Power Generation, Vol. 9, Issue 3, pp. 207 – 217.

92. Ahmed, Fudholi. Energy and Exergy Analyses on Water based Photovoltaic Thermal (PVT) Collector with Spiral Flow Absorber [Text]/ Adnan Ibrahim, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, Hussein A. Kazem, Azami Zaharim, K. Sopian, // 2nd International Conference on Energy Systems, Environment, Antalya, Turkey, October 8-10, 2013, ISBN: 978-960-474-338-4, pp. 70-74.
93. Abass, Ahmed. Z. Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle [Text]/ Pavlyuchenko.D.A // E3S Web of Conferences 114, 05008 (2019). Energy Systems Research 2019. [ <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008> ] .
94. Sopian, K. Experimental Studies on Building Integrated Photovoltaic Thermal Collectors with Different Absorber Design [Text]/ Adnan Ibrahim, Ahmed Fudhol, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, Hussein A. Kazem, // 2nd International Conference on Energy Systems, Environment, Antalya, Turkey, October 8-10, 2013, ISBN: 978-960-474-346-9, pp. 50-54.
95. Hajji, M. A comparative study between two structures of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collectors for water pumping systems [Text]/ Naimi S. E., Hajji B., & El Hafyani M. L.// 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 235 - 240.
96. Touafek, K. Experimental Study on a New Conception of Hybrid PV / T Collector [Text]/ Khelifa A., Adouane M., Khettaf E. H. & Embarek A., // 14th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, 2013, pp. 1-5.
97. SLIMANI, M. E. Analysis of thermal and electrical performance of a solar PV / T air collector Energetic study for two configurations [Text]/ AMIRAT M., & BAHRIA S., // 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), pp. 1-6.
98. David, L. S. Development of High Efficiency Hybrid PV-Thermal Modules [Text]/ Natko B. U., & Zoltan J. K., // 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, pp. 1660 - 1663.

99. Marimuthu, M. MATLAB Simulation of Transparent Glass PV/T Hybrid Water Collectors [Text]/ Geetha P., Deepiha P., & Sridharan M., // 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 2015, pp. 1-7.
100. Haiping, C. The Optimized Design and Experimental Analysis of CPC-PV / T System [Text]/ Chenhui W., Jieling S., Dengxin A., Chentao Y., Zhaohao L., & Jinjia W.// International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), pp. 1-5.
101. Haber, E. I., 2015, "Energy transport modeling of PV/T collectors [Text]/ 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, pp. 1615 - 1617.
102. Hajji, M. A numerical modeling of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector [Text]/ Naimi S. E., Hajji B., & El Hafyani M. L., // ICM, 2014, pp. 152 - 155.
103. Farshchimonfared, M. Full optimization and sensitivity analysis of a photovoltaic–thermal (PV/T) air system linked to a typical residential building [Text]/ Bilbao J.I., & Sproul A. B.// Solar Energy, 2016, Vol. 136, pp. 15-22.
104. Haddad, S. Investigation of the Electrical and Thermal Performance of a PV/T Hybrid System [Text]/ Touafek K., & Khelifa A.// Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015, pp. 1-6.
105. Секретарев, Ю.А. Выбор и принятие Решений в электроэнергетике [Text]/ Я.В. Панова, // утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия, Новосибирск, 2018.
106. Павлюченко, Д.А. Рейтинговая оценка показателей энергоэффективности на основе метода анализа иерархий [Text]/ Любченко В.Я. // Новое в Российской электроэнергетике, №11 2017, с. 77-91.
107. Saeedi, F. Optimization of a PV/T (photovoltaic/thermal) active solar still [Text]/ Sarhaddi F., & Behzadmehr A.// Energy, 2015, Vol. 87, pp. 142-152.
108. Horn, M. Economic analysis of integrated solar combined cycle power plants: A sample case: The economic feasibility of an ISCCS power plant in Egypt [Text]/ H. Fuhring, and J. Rheinlander, // Energy, 2004. 29(5): p. 935-945.



109. Hou, L. An experimental and simulative study on a novel photovoltaic-thermal collector with micro heat pipe array (МНПА-PV/T) [Text]/ Quan Z., Zhao Y., Wang L., & Wang G.// *Energy and Buildings*, 2016, Vol. 124, pp. 60–69.
110. Ахмед З.А., Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом [Text]/. Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(1):18-32. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32>.
111. Jarimi, H. Bi-fluid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector: Experimental validation of a 2-D theoretical model [Text]/ Abu Bakar M. N., Othman M., & Din H. J.// *Renewable Energy*, 2016, Vol. 85, pp. 1052-1067.
112. Othman, M. Y. Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study [Text]/ Hamid S.A., Tabook M.A.S., Sopian K., Roslan M.H., Ibarahim Z.// *Renewable Energy*, 2016, Vol. 86, pp. 716-722.
113. Stropnik, R. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM [Text]/ Stritih U., // *Renewable Energy*, 2016, Vol. 97, pp. 671-679.
114. Kichou, S. Comparison of two PV array models for the simulation of PV systems using five different algorithms for the parameters identification [Text]/ Silvestre, S., Guglielminotti, L., Mora-Lopez L., & Munoz-Ceron E.// *Renewable Energy*, 2016, Vol. 99, pp. 270-279.
115. Yazdanifard, F. Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime [Text]/ Ebrahimnia-Bajestan E., Ameri M.// *Renewable Energy*, 2016, Vol. 99, pp. 295-306.
116. IEA. Electricity/Heat in World 2009 [cited 2013 March 12]; Available [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY\\_CODE=29](http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=29).
117. Behar, O., et al., Instantaneous performance of the first Integrated Solar Combined Cycle System in Algeria [Text]/ *Energy Procedia*, 2011. 6: p. 185-193.

118. Dersch, J., et al., Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems [Text]/ Energy, 2004. 29(5): p. 947-959.
119. Baghernejad, A. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm [Text]/ Energy Conversion and Management, 2011. 52(5): p. 2193-2203.
120. Nezammahalleh, H., Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology [Text]/ F. Farhadi, and M. Tanhaemami, // Solar energy, 2010. 84(9): p. 1696-1705.
121. Montes, M.J., et al., Performance analysis of an Integrated Solar Combined Cycle using Direct Steam Generation in parabolic trough collectors [Text] / Applied Energy, 2011. 88(9): p. 3228-3238.
122. Boniardi, M., Hybrid repowering of a coal fired power plant with an integrated solar combined cycle (ISCC) in Australia, in POLITECNICO DI MILANO[Text] / 2011: Master Thesis.
123. Al-Shail, K.A. Utilization of Solar Energy For Desalination Technologies in Saudi Arabia [Text]/ 10th Arwadex Conference Riyadh Internotinental Hotel-Saudi Arabia, 2012.
124. Ahmadi, P. and I. Dincer, Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit[Text]/ Energy Conversion and Management, 2011. 52(5): p. 2296-2308.
125. Darwish, M.A. Towards sustainable seawater desalination in the Gulf Area [Text]/ N. Al-Najem, N. Lior// J. Desalination 235 (2009) 58e87.
126. Glada, Lahn. Saving Oil and Gas in the Gulf [Text]/ Paul Stevens, Felix Preston, // Chatham House Report, August, 2013.
127. Darwish, M.A. Combining the nuclear power plant steam cycle with gas turbines [Text]/ F.M. Al Awadhi, A.O. Bin Amer, //J. Energy 35 (2010) 4562e4571.
128. IRENA, Pan-Arab Renewable Energy Strategy 2030. Road map of Action for Implimentation, 2014.

129. Baghernejad, A. Energy, exergy and second law performance of Parabolic trough collector integration in combined cycle system [Text]/4th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, 2009. Abu Dhabi.
130. Keith, Brown. interactive simulation of power system: etap techniques and applications [Text]/ Farrokh Shokooh, Herminio Abcede and Gary Donner // IEEE Flour Daniel Inc. Irvine, ISBN: 0-87942-553-9, Page(s): 1930-1941 vol.2, 7-12 Oct 1990, Seattle, WA, USA.
131. Abbas, T.R. Assessing Health Impact of Air Pollutants in Five Iraqi Cities Using AirQ+ Model [Text]/ Abbas, R.R.// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1094 (2021) 012006, doi:10.1088/1757-899X/1094/1/012006.
132. Central Statistical Organization (CSO)-Iraq 2020 Annual Statistical Abstract 2018-2019, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://cosit.gov.iq/ar/2018-2019>.
133. Hamad, S. Seasonal Trends in the Composition and ROS Activity of Fine Particulate Matter in Baghdad, Iraq [Text]/ Shafer M, Kadhim A, Al-Omran S and Schauer J // Atmospheric Environment, 2015, vol 100 pp 102-110.
134. Glenn, W. Stagg. Computer Methods in Power System Analyses [Text] / Ahmed H. El-Abiad, // Bib ID 537411, New York, McGraw-Hill [1968], pp. 110-127.
135. Jabbar, R.A. Operational and Economic Impacts of Distorted Current drawn by the Modern Induction Furnaces [Text]/ Muhammad Akmal, Muhamad Junaid and M. Ali Masood, // Proceedings of AUPEC'08, IEEE, ISBN: 978-0-7334-2715-2, 14-17 December, 2008, UNSW, Sydney, Australia.
136. Абасс, А. З. Анализ потокораспределения и устойчивости для электрической системы с электростанцией с комбинированным циклом в Южном Ираке с использованием ETAP [Text]/ 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.
137. Muhammad, J. K. Performance Evolution of 132 kV grid stations and transmission lines in Peshawar Division. A case study [Text]/ A. U. Rehman ,S.

Mehmood ,// First international conference on emerging trends in engineering, management and sciences, December 28-30, 2014, Peshawar, Pakistan.

138. Kehinde, O. A fault analysis of 11kV distribution system (a case study of ado Ekiti electrical power distribution district) [Text]/ A. S. Oluwole, T. Adefarati, // American journal of electrical power and Energy system, volume 3, Issue 2, pages 22-36, 2014.
139. Jabbar Khan, Rana A. Analyses and Monitoring of 132 kV Grid using ETAP Software [Text]/ Muhammad Junaid and Muhammad Mansoor Asgher, // Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on, IEEE, 2009, pp. I-113 – I-118.
140. Rohit, Kapahi. Load Flow Analysis of 132 kV substation using ETAP Software [Text]/ International Journal of Scientific Engineering Research, vol. 4, issue 2, Feb 2013, pp. 1-5.
141. Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.etap.com](http://www.etap.com) .
142. Mahdi, Nadia.M. Power flow analysis of Rafah governorate network Distribution using ETAP software[Text]/ International Journal of Physical Sciences vol. 1(2), pp. 019-026, June 2013.
143. Pushp, raj. Load flow and short circuit analysis of 400/220kv substation [Text]/ International Journal of Creative and Research thoughts, vol. 1, Issue 4, April 2013.
144. Arrillaga, J. Computer Modelling of Electrical Power Systems [Text]/ N.R. Watson // second edition, ISBN: 978-0-471-87249-8, John Wiley and Sons [2001].
145. Abass, A. Z. Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP [Text]/ D.A Pavlyuchenko, Zozan Saadallah Hussain, // Journal of Robotics and Control (JRC), Vol 2, No 3 (2021): May, <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/author/index/completed>.
146. Charles, Mozina. Undervoltage Load Shedding [Text]/ ISBN: 978-1-4244-0855-9, IEEE, Page(s): 39-54.

147. Abass Z. A. Analysis of a gas station hybridization with a solar thermal plant by using ETAP [Text]/ D.A Pavlyuchenko // International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE), Vol 10, No 2: June 2021, DOI: <http://doi.org/10.11591/ijape.v11.i1.pp%25p>.
148. Ellithy, K. Optimal shunt capacitors allocation in distribution networks using genetic algorithm practical case study [Text]/ Al-Hinai, A.; Moosa, A. // International Innovations Energy System Power 2008, 3, 18–45.
149. Abass Z. A. “Methods Comparison for Optimal Capacitor Placement in Distribution System [Text]/ D.A. Pavlyuchenko; Zozan Saadallah Hussain, // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 6-9 Oct. 2020, DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271381.
150. Mirjalili, S. Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm [Text]/ Knowledge-Based Systems, vol. 89, pp. 228-249, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>.
151. Anbarasan, P. Optimal Reactive Power Dispatch Using Moth-Flame Optimization Algorithm [Text]/ T. Jayabarathi // International Journal of Applied Engineering Research, vol. 12, pp. 3690-3701, 2017.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Анкета проведения экспертизы

19.02.2021

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

## Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

Предлагаем вашему вниманию анкету для получения экспертного заключения. Целью данной экспертизы является получение точных мнений группы экспертов в области инженерии возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии. В этой экспертизе рассматриваются пять наиболее важных факторов определения оптимального места размещения проектируемых гибридных (газовые/солнечные) электростанций для определения влияния (значимости) каждого фактора на итоговое решение.

В этой процедуре сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор А более предпочтителен, чем фактор Б, то оценка  $A=1$ , а  $B=0$ .

Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, факторы равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом:

$A=B=0,5$ .

\* Обязательно

1. Среднегодовое количество часов светового дня --- Среднегодовая инсоляция \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1 - первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

- 0  
 0,5  
 1

19.02.2021

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

## 2. Среднегодовое количество часов светового дня --- Электропотребление \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 3. Среднегодовое количество часов светового дня --- Мощность существующих газовых электростанций \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 4. Среднегодовое количество часов светового дня --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

19.02.2021

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

## 5. Среднегодовая инсоляция --- Электропотребление \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 6. Среднегодовая инсоляция --- Мощность существующих газовых электростанций \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 7. Среднегодовая инсоляция --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1



19.02.2021

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

## 8. Электропотребление --- Мощность существующих газовых электростанций

\*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 9. Электропотребление --- Мощность существующих газовых электростанций

\*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

## 10. Электропотребление --- Мощность существующих газовых электростанций \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

*Отметьте только один овал.*

0

0,5

1

19.02.2021

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

11. Электропотребление --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Отметьте только один овал.

- 0  
 0,5  
 1

12. Мощность существующих газовых электростанций --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции \*

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Отметьте только один овал.

- 0  
 0,5  
 1

---

Компания Google не имеет никакого отношения к этому контенту.

Google

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акты внедрения научных результатов диссертации

<b>AL-REYAM CO.</b> For Engineering & Design		<b>کۆمپانیای ال ریام</b> بۆ کارى ئهندازى و دیزاین
<p><b>АКТ</b> <b>о внедрении результатов диссертационной работы</b> <b>Абасс Ахмед Зкеар Абасс</b></p>		
<p>Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Абасс Ахмед Зкеар Абасс на тему: “ Исследование режимов гибридных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии (на примере Ирака)” предлагается использовать для разработки концепции модернизации газовых электростанций республики Ирак.</p>		
<p>Данное решение позволит повысить эффективность работы существующих электростанций и, как следствие, уменьшить существующий дефицит электроэнергии за счет внедрения новых гибридных 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.</p>		
		
<p>Исполнительный директор Мухаммед Хуссейн Насир Эл-мяхи</p>		
		
<p>Main Office : 26 Abd El-Ghafar st, Hegaz Square, Heliopolis, Cairo Tel : +202-26435181 E-Mail :Jo@poweriraq.com</p>	<p>Kurdistan Office : Ashty Bld.No.5, Street 69 Sector 4 Tel : +9647702705701/+9647703637207 E-Mail :ali@poweriraq.com</p>	

Ministry of Higher Education  
And Scientific Research

بسم الله الرحمن الرحيم  
جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Presidency of Wasit University  
Deanship Engineering College



رئاسة جامعة واسط  
معاون العميد للشؤون العلمية  
والدراسات العليا

السعد : 125

التاريخ : 2021/03/22

التزاهة آية العفة  
(الأمام علي عليه السلام)

### АКТ

#### о внедрении результатов диссертационной работы Абасс Ахмед Зкеар Абасс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Абасс Ахмед Зкеар Абасс на тему:

“Исследование режимов гибридных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии (на примере Ирака)” предлагается использовать для разработки концепции модернизации газовых электростанций республики Ирак.

Данное решение позволит повысить эффективность работы существующих электростанций и, как следствие, уменьшить существующий дефицит электроэнергии за счет внедрения новых гибридных 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.

Доцент:  
Элрикаби Хайдар Диеаб Салим

[hdhivab@uowasit.edu.iq](mailto:hdhivab@uowasit.edu.iq)



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

к.т.н., доцент

С.С. Чернов

04 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Абасс Ахмед Зкеар Абасс в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы Абасс Ахмед Зкеар Абасс на тему "Исследование режимов гибридных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии (на примере Республики Ирак)" в учебный процесс кафедры "Системы электроснабжения предприятий" Новосибирского государственного технического университета.

Разработанные в диссертационной работе модели и предложенные подходы построения гибридных систем электроснабжения излагаются в дисциплине "Возобновляемые источники энергии" (программа бакалаврской подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника), а также дисциплине "Автономные системы электроснабжения" (программа магистратуры 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль Системы электроснабжения и управление ими).

Материалы диссертационной работы успешно используются при написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций, а также в исследованиях аспирантов.

Заведующий кафедрой СЭСИ  
к.т.н., доцент

Павлюченко Д.А.