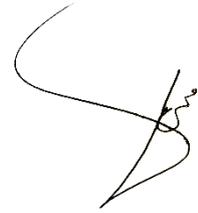


На правах рукописи



Абдулваххаб Мохаммед Валид Абдулваххаб

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» на кафедре электроэнергетики и автоматики.

Научный руководитель – кандидат технических наук
Жилин Евгений Витальевич

Официальные оппоненты: Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра электроснабжения и электротехники, заведующий кафедрой

Тремясов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра электроэнергетики, доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 8 декабря 2021 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 666074, г. Красноярск, ул. Киренского, д.26, ауд. Г21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10 и на сайте: <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 года

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Распределительные сети Республики Ирак включают в себя более 200 подстанций напряжением 132/33 кВ общей мощностью 27 000 МВА и сети напряжением 33 кВ с большим количеством подстанций напряжением 33/11 кВ. Протяженность сетей напряжением 33 кВ составляет порядка 12 000 км, а суммарная протяженность линий напряжением 11 кВ – 52 000 км.

Ежегодно спрос электроэнергии в Республике Ирак возрастает, в то время как энергосистема Ирака не может вырабатывать нужное количество электроэнергии. С учетом частичного выбывания сетей из-за военного конфликта и роста потребления, распределительные сети Республики Ирак перегружены. Также свыше 70 % установленных генерирующих мощностей введены в эксплуатацию до 2000 года, что указывает на моральный износ и низкую эффективность. Перегрузка распределительных сетей приводит к множеству негативных последствий таких как: отклонение напряжения в узлах нагрузок; увеличение потерь активной мощности и электроэнергии; снижение срока службы электрооборудования распределительной сети.

В связи с этим возникает необходимость дополнительных источников мощности, в том числе использование распределенной генерации. Для территорий с большим количеством солнечных дней и высоким уровнем солнечной активности актуальным является применение и использование в составе систем распределенной генерации фотоэлектрических модулей различного исполнения и мощности. Учитывая климатические и географические особенности Республики Ирак, в качестве распределенной генерации возможно использование фотоэлектрических модулей. Согласно исследованиям, интенсивность солнечной радиации в течение года изменяется от 2393 до 6576 Вт·ч/(м²·сут), а количество солнечных дней превышает двести пятьдесят. Следовательно, наиболее эффективное решение использования распределенной генерации в районах, обладающих достаточным уровнем солнечного излучения, является применение фотоэлектрических модулей. Современные солнечные панели площадью в 1 м² выдают порядка 120 Вт электрической мощности, что подтверждает их применение в качестве возобновляемых источников.

Отдельное применение систем преобразования солнечной энергии не получило широкого распространения, а в основном фотоэлектрические модули различного исполнения применяются в составе гибридных энергокомплексов или электростанций. Один из вариантов построения таких систем – это комбинированные солнечно-дизельные комплексы. При этом актуальность применения дизельных комплексов в составе комбинированных электростанций намного выше для территорий с невысокой стоимостью топлива и возможностью его быстрых поставок. Дизельные электростанции в со-

ставе комбинированных солнечно-дизельных комплексов могут использоваться в различных режимах работы в зависимости от интенсивности солнечного излучения или действующих графиков электрических нагрузок.

Таким образом, оценка эффективного использования распределенной генерации в сетях Республики Ирак является актуальной задачей.

Особую роль в развитии теории и применения распределенной генерации на практике в системах электроснабжения внесли такие ученые, как Б.В. Лукутин, А.З. Гамм, П.И. Бартоломей, Д.А. Арзамасцев, В.Д. Николаев, В.Р. Огороков, П.П. Безруких, Д.С. Щавелев, К.В. Суслов, Б.Г. Санеев, В.В. Елистратов, Л.А. Мелентьев, С.Г. Обухов, Л.С. Беляев, В.П. Харитонов, В.И. Виссарионов, В.А. Тремясов, И.Ю. Иванова, Д.Д. Ноговицын, Н.А. Петров, J. Dekker, J.A. Carta, G. Rauschenbach, L. Bernal-Agustin Joze, Rodolfo Dufo-Lopez и другие ученые.

Цель исследования – совершенствование электроснабжение потребителей электроэнергии распределительных сетей Республики Ирак напряжением 33/11 кВ за счет использования возобновляемых источников энергии и распределенной генерации.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ нормальных и послеаварийных режимов распределительных сетей Республики Ирака с целью выявления наиболее загруженных узлов потребления.

2. Оценка возможных технических решений, способствующих повышению пропускной способности распределительных сетей Республики Ирак.

3. Оценка возможности использования распределенной генерации в удаленных и загруженных узлах потребления в распределительных сетях Республики Ирак.

4. Разработка методики принятия решений по выбору узлов подключения возможных структур распределенной генерации на основе решения задачи оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности методом нелинейной оптимизации.

5. Разработка методики выбора оптимальной структуры распределенной генерации в виде соотношения фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций на основе решения многокритериальной задачи на базе нечетких множеств.

Объектом исследования являются распределительные сети напряжением 11 -33 кВ Республики Ирак.

Предметом исследования являются характеристики структуры солнечно-дизельных комплексов и фрагмента распределительной сети Республики Ирак.

Методика исследований основана на положениях теоретических основ электротехники, теории и методах системного анализа, принятия реше-

ний, расчёта и формирования распределительных сетей, решения задач оптимизации и теории нечетких множеств. Поставленные задачи решались применением численных и аналитических методов анализа, методами дифференциального и интегрального исчисления, имитационного моделирования с использованием пакета *Matlab*.

Научная новизна

1. Усовершенствована методика анализа нормальных и послеаварийных режимов распределительных сетей с целью выявления удаленных и максимально загруженных узлов, позволяющая учитывать распределенную генерацию в сочетании фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций, образующих общую структуру солнечно-дизельных комплексов.

2. Предложены методики оптимального выбора узлов подключения и мощности солнечно-дизельных комплексов и соотношения мощностей фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций в общей структуре комплекса.

3. Установлены критерии, характеризующие солнечно-дизельные комплексы с учетом особенностей системы электроснабжения Республики Ирак.

На защиту выносятся:

1. Результаты аналитических расчетов нормальных и послеаварийных режимов работы распределительных сетей Республики Ирак и их имитационного моделирования в программном комплексе RasterWin и Matlab & Simulink, позволяющие выявлять удаленные и максимально загруженные узлы.

2. Методика принятия решений по выбору узлов подключения возможных структур распределенной генерации, основанная на решении задачи оптимизации и обеспечивающая минимальные потери активной мощности.

3. Методика выбора оптимального соотношения мощностей фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций в составе солнечно-дизельных комплексов, основанная на решении многокритериальной задачи с использованием нечетких множеств и критериев, характеризующих солнечно-дизельные комплексы, учитывающих особенности системы электроснабжения Республики Ирак.

Теоретическая и практическая значимость заключается в развитии многокритериального подхода к обоснованию решений по выбору узлов подключения и мощностей солнечно-дизельных комплексов, а также выбору соотношений мощностей фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций в общей структуре солнечно-дизельного комплекса. Практическая значимость результатов исследований по применению распределенной генерации в распределительных сетях напряжением 11-33 кВ Республики Ирак, подтверждается наличием актов внедрения.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением классических методов математического анализа. Полученные результаты расчетов и имитационного моделирования коррелируются между собой, не превышают расхождение в 5 % и не противоречат представленным данным в литературном обзоре.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, республиканских научно-технических конференциях: X международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (молодежь и научно-технический прогресс), г. Губкин 20 апреля 2017 г.; 5-я международная молодежная научная конференция «будущее науки – 2017» 26-27 апреля 2017 г. Юго-Западный государственный университет, Курск, 2017; международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2017 г.; всероссийская научно-техническая конференция, Сибирский федеральный университет г. Красноярск, октябрь 2017 г.; II международная научно-техническая конференция Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, ноября 2017 г.; международная научная конференция по техническим наукам Университет Дияла, инженерный колледж 18.01.2018 г. ; III международная научно-техническая конференция Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова г. Белгород, ноября 2018 г.; Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке. Материалы Национальной научно-практической конференции, пос. Майский, 2021 г.

Личный вклад автора состоит в анализе источников литературы с целью получения сведений о существующих методах повышения энергоэффективности распределительных сетей. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. В совместных публикациях вклад автора составляет от 40% до 60%, автору принадлежат результаты, связанные с постановкой задачи, разработкой методики многокритериального подхода для выбора структуры солнечно-дизельных комплексов на базе нечетких множеств; методики выбора узлов подключения и мощности солнечно-дизельных комплексов по критерию минимума потерь активной мощности.

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе две статьи индексируемых в базах Scopus, три статьи в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 128 наименований и приложения. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, включая 56 рисунков и 26 таблиц. В приложении представлены результаты расчета режима распределительной сети Республики Ирак и акты о внедрении результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, а также определены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе рассмотрены основные географические и климатические особенности Республики Ирак. Выполнен анализ загруженности существующих распределительных сетей Республики Ирак. Рассмотрены возможные способы повышения качества электроснабжения потребителей за счет использования дополнительных технических устройств.

Существующие энергетические комплексы Республики Ирак достаточно сильно пострадали из-за периодических войн и разрушений. Кроме того, свыше 70% установленных генерирующих мощностей введены в эксплуатацию до 2000 года, что указывает на износ оборудования. Учитывая климатические и географические особенности Республики Ирак, следует отметить огромный потенциал в выработке энергии на основе солнечных электростанций.

Анализ технических мероприятий, повышающих уровень напряжения в узлах нагрузки и снижающих потери мощности в распределительных сетях показал, что с учетом климатических особенностей Республики Ирак и стоимости дизельного топлива наиболее рациональным вариантом снижения потерь мощности и напряжения является использование распределенной генерации в виде солнечно-дизельных комплексов.

Применяемые в настоящее время подходы по выбору мощности и типов устройств распределенной генерации основываются на капитальных затратах без учета ряда факторов, таких, как экологическое влияние на окружающую среду, воздействия на систему электроснабжения и других параметров, являющихся условиями ограничения. Поэтому важную роль при выборе дополнительных источников электроэнергии играет оценка воздействия их на окружающую среду, систему электроснабжения, следовательно, целесообразно применение многокритериального подхода.

Во втором разделе дана характеристика распределительной сети Республики Ирак, проведен анализ изменения электрических нагрузок в разные промежутки времени. Выполнен аналитический расчет нормальных и послеаварийных режимов в программном комплексе Raster Win. Представлена схема подключения солнечно-дизельных комплексов к распределительной сети Республики Ирак.

Исходными данными для расчета режимов являются: топология схемы (направленный граф); параметры ветвей и трансформаторов схемы замещения; мощности в узлах нагрузок; номинальное напряжение источника энергии; коэффициенты трансформации. За базисный узел принимается нулевой узел на шинах генераторного напряжения.

На рисунке 1 представлена однолинейная схема распределительной сети Республики Ирак с указанием узлов и ветвей. Результаты нормального и послеаварийного режимов работы для отдельных узлов и ветвей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчет режима работы распределительной сети Республики Ирак

Параметры узлов схемы										
Узел	Нормальный		Послеаварийный		P_p , МВт	Q_p , Мвар				
	U , кВ	δU , %	U , кВ	δU , %						
1	29,01	-12,10	18,41	-44,21	–	–				
1'	9,24	-16,01	5,50	-50,00	8,5	4,31				
2	25,02	-24,17	22,45	-31,98	–	–				
2'	7,87	-28,47	6,98	-36,53	3,392	1,79				
3,1	23,71	-28,14	25,93	-21,42	–	–				
3,1'	7,41	-32,68	8,19	-25,51	2,711	1,21				
3,2	31,54	-4,41	–	–	–	–				
3,2'	10,13	-7,92	–	–	2,787	1,29				
Параметры ветвей схемы										
Ветвь	Нормальный					Послеаварийный				
	$P_{нач}$, МВт	$Q_{нач}$, Мвар	I , А	ΔP , кВт	ΔU , %	$P_{нач}$, МВт	$Q_{нач}$, Мвар	I , А	ΔP , кВт	ΔU , %
1-2	15,67	10,32	328	1264	10,84	5,839	3,234	171,7	884,4	12,23
1-1'	5,968	3,749	138	573,8	10,06	6,510	5,140	260,1	129,2	5,73
2-3.1	2,580	1,385	64,8	91,9	10,14	7,421	4,886	197,8	857,0	10,56
2-2'	2,917	1,641	58,6	107,7	0,00	2,992	2,063	93,5	53,5	4,54
5-5'	1,755	1,012	35,4	46,8	3,18	5,285	3,060	130,0	57,6	3,93
8-7	1,657	0,936	36,4	38,6	7,64	2,318	0,816	50,8	59,4	2,62
7-7'	7,694	4,526	156	556,1	0,00	3,045	1,877	73,9	33,4	3,42

По результатам расчета установившегося режима сети видно, что отклонения от номинальных напряжений в большей части узлов превышает значение 10%, а в ряде узлов превышает значение 30%. Максимальное значение потерь мощности составляет 1264 кВт. Всё это свидетельствует о перегрузке распределительной сети и необходимости принятия соответствующих технических решений, направленных на снижение вышеуказанных параметров. Одним из вариантов таких технических решений является установка объектов солнечно-дизельных комплексов в узлах нагрузки.

Включение солнечно-дизельных комплексов в автономную электроэнергетическую систему Республики Ирак возможно путем применения следующих конфигураций подключения:

- дизельная электростанция и фотоэлектрические модули с системой накопления электроэнергии работают отдельно (рисунок 2, а);
- фотоэлектрические модули работают совместно с электрической сетью, образованной дизельной электростанцией (рисунок 2, б);

– комбинированный режим работы, при котором возможна как совместная, так и раздельная работа фотоэлектрических модулей с системой накопления электроэнергии и дизельной электростанцией (рисунок 2, в).

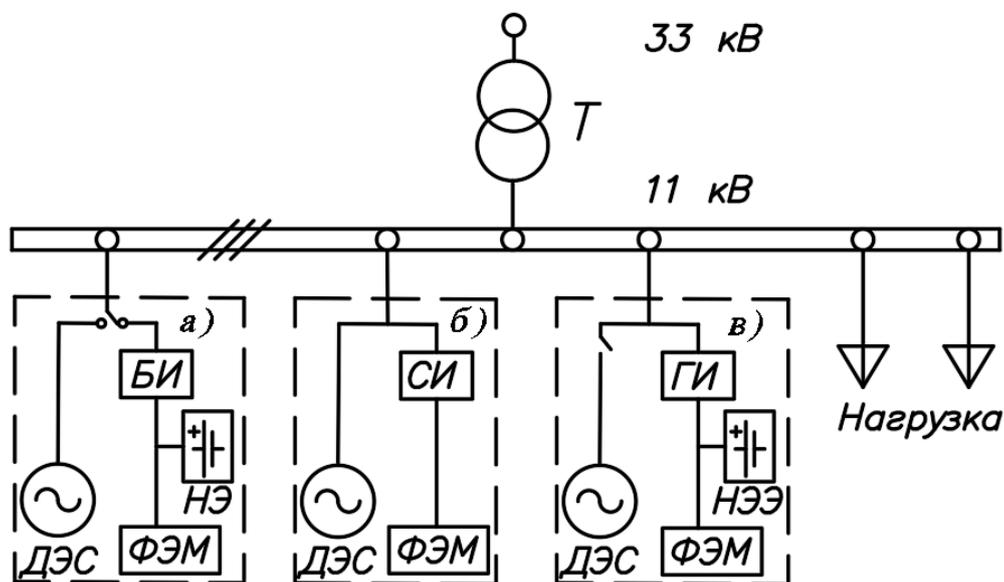


Рисунок 2. Схемы подключения солнечно-дизельных комплексов:
 ДЭС – дизельная электростанция; ФЭМ – фотоэлектрические модули;
 НЭЭ – накопитель электрической энергии; БИ – батарейный инвертор;
 СИ – сетевой инвертор; ГИ – гибридный инвертор

Принятие окончательного варианта структуры СДК зависит от множества параметров и является многокритериальной задачей.

В третьей главе выполнено построение имитационной модели распределительной сети Республики Ирак в программном комплексе Matlab&Simulink. Произведен анализ возможных способов подключения установок солнечно-дизельных комплексов к распределительной сети. Решена задача выбора оптимального места установки и мощности солнечно-дизельных комплексов.

Была разработана имитационная модель распределительной сети напряжением 11-33 кВ Республики Ирак, которая включает в себя источники питания напряжением 33 кВ, воздушные линии и подстанции напряжением 33/11 кВ. Имитационная модель показана на рисунке 3. Она позволяет проводить анализ режимов работы сети, определять величину потоков мощности в ветвях и определять напряжения в узлах, изучать различные переходные процессы в сети. С помощью блоков Three-Phase Breaker можно переводить линии в нормальный и аварийный режимы работы.

Полученные в результате моделирования напряжения в узлах схемы представлены в виде потенциальных диаграмм, которые даны на рисунке 4. На диаграммах наглядно отображается уровень потерь напряжения в линиях электропередач при транспорте электроэнергии на каждом участке изолированных ветвей сети.

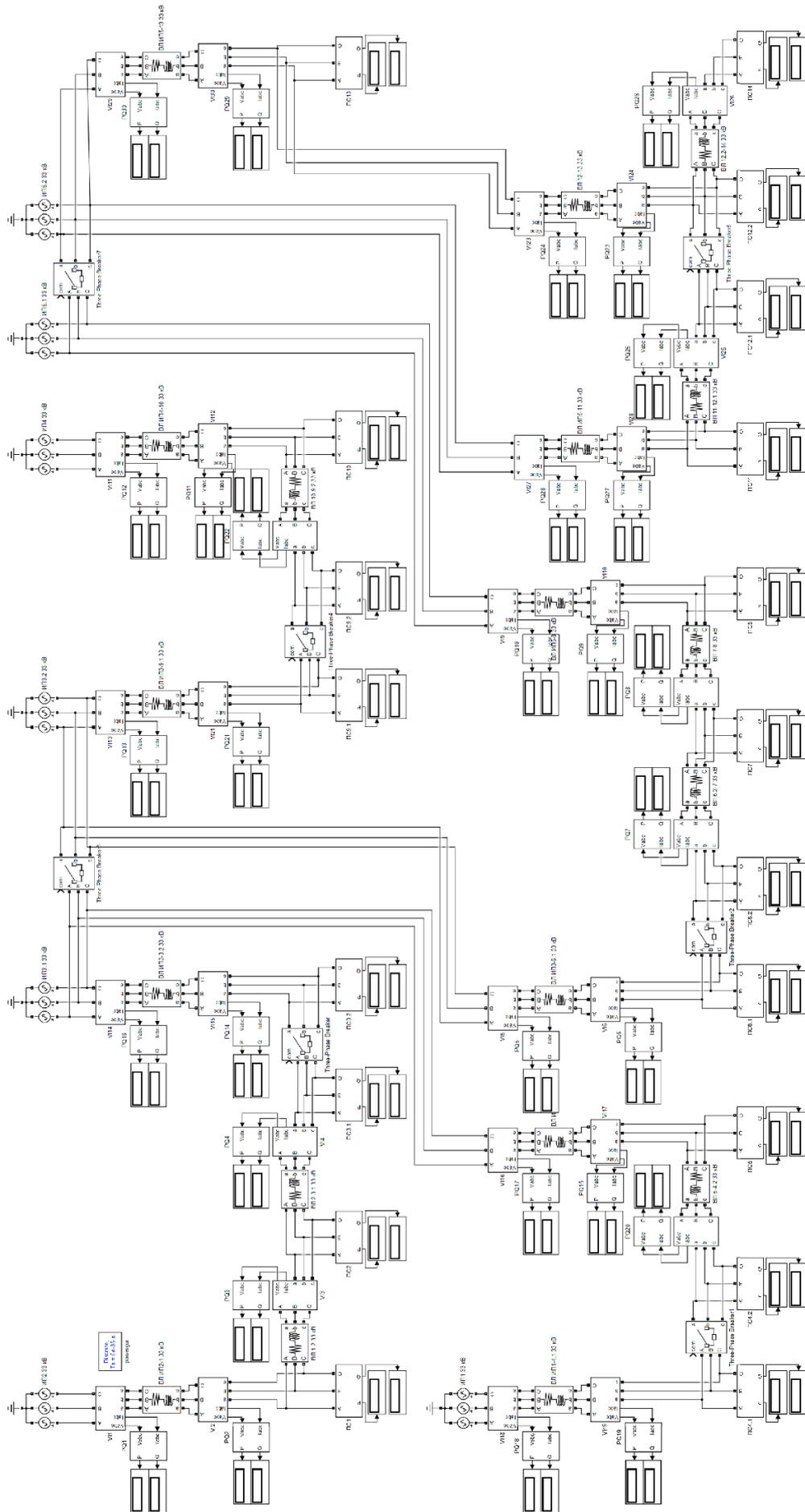


Рисунок 3. Имитационная модель распределительной сети Республики Ирак

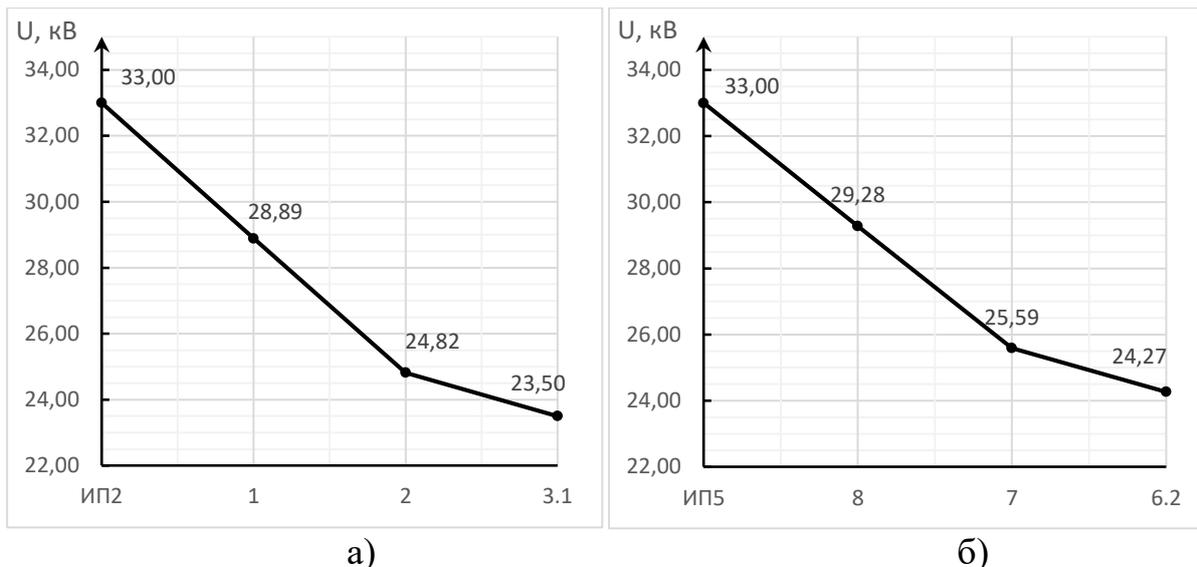


Рисунок 4. Потенциальная диаграмма для участка схемы:

а – ИП2–1–2–3.1; б – ИП5–8–7–6.2

Для распределительной сети Республики Ирак сформулирована целевая функция минимума потерь активной мощности. Расчетные потери мощности представляются с учетом источников распределённой генерации:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\Sigma} = & R_1 \cdot (P_{4.1} - P_{СДК4.1})^2 + R_2 \cdot (P_5 + P_{4.2} - P_{СДК5} - P_{СДК4.2})^2 + R_3 \cdot (P_{4.2} - P_{СДК4.2})^2 + \\
 & + R_4 \cdot \left(P_1 + P_2 + P_{3.1} - \sum_{i=1}^3 P_{СДКi} \right)^2 + R_5 \cdot \left(P_2 + P_{3.1} - \sum_{i=2}^3 P_{СДКi} \right)^2 + R_6 \cdot (P_{3.1} - P_{СДК3.1})^2 + \\
 & + R_7 \cdot (P_{3.2} - P_{СДК3.2})^2 + R_8 \cdot (P_{6.1} - P_{СДК6.1})^2 + R_9 \cdot \left(P_{6.2} + P_7 + P_8 - \sum_{i=6}^8 P_{СДКi} \right)^2 + \\
 & + R_{10} \cdot \left(P_{6.2} + P_7 - \sum_{i=6}^7 P_{СДКi} \right)^2 + R_{11} \cdot (P_{6.2} - P_{СДК6.2})^2 + R_{12} \cdot (P_{9.1} - P_{СДК9.1})^2 + \\
 & + R_{13} \cdot \left(P_{9.2} + P_{10} - \sum_{i=9}^{10} P_{СДКi} \right)^2 + R_{14} \cdot (P_{9.2} - P_{СДК9.2})^2 + R_{15} \cdot \left(P_{11} + P_{12.1} - \sum_{i=11}^{12} P_{СДКi} \right)^2 + \\
 & + R_{16} \cdot (P_{12.1} - P_{СДК12.1})^2 + R_{17} \cdot \left(P_{12.1} + P_{13} + P_{14} - \sum_{i=12}^{14} P_{СДКi} \right)^2 + \\
 & + R_{17} \cdot (P_{12.2} + P_{14} - P_{СДК12.2} - P_{СДК14})^2 + R_{18} \cdot (P_{14} - P_{СДК14})^2 \rightarrow \min,
 \end{aligned}$$

где $R_i = r_i/U^2$ – отношение активного сопротивления i -го участка сети к квадрату напряжения i -го узла сети; P_i – величина активной мощности i -го участка сети; $P_{СДКi}$ – активная мощность, генерируемая солнечно-дизельным комплексом на i -м участке распределительной сети.

В результате расчета установившегося режима выявлено, что суммарные потери мощности в элементах сети составили 4468 кВт. На основании

этого сформированы условия ограничения для целевой функции, которые принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{14} P_{СДКi} - 4468 \approx 0; \\ P_{СДКi} \geq 0, i = 1, 2, \dots, 14; \\ 0 \leq \delta U \leq 10\%. \end{cases}$$

В соответствии с данным методом вместо относительного экстремума целевой функции при заданных ограничениях определен абсолютный экстремум функции Лагранжа. Поиск абсолютного экстремума функции Лагранжа выполнен путем обращения в нуль ее частных производных по каждой неизвестной переменной.

В результате решения задачи оптимизации выявлено, что рациональным местом установки солнечно-дизельных комплексов являются узлы 2, 3.1, 6.2, 12.2, 14. Укрупняя значения активных мощностей в узлах потребления, предлагается установить солнечно-дизельные комплексы в узлах 3.1, 6.2 и 14 суммарной мощностью 4500 кВт.

Произведен выбор элементов структуры солнечно-дизельного комплекса, в состав которого входят: фотоэлектрические преобразователи (ФЭП); устройство отбора максимальной мощности (УОММ); аккумуляторные батареи (АКБ); контроллер заряда АКБ – зарядное устройство (ЗУ); дизельная электростанция (ДЭС); инвертор напряжения (ИН); согласующий трансформатор (Т) (рисунок 5).

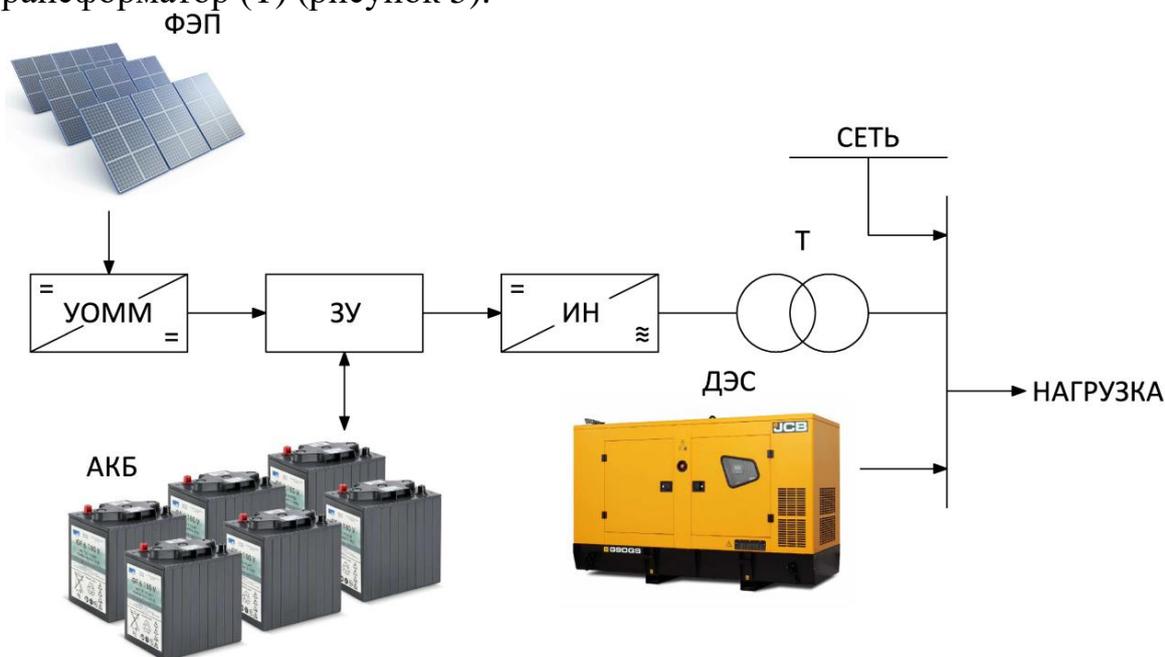


Рисунок 5. Структурная схема согласования фотоэлектрических модулей с дизельной электростанцией по шине переменного тока

В четвертой главе произведен выбор оптимального соотношения структуры фотоэлектрических модулей и дизельной электростанции методом нечетких множеств. Выполнено имитационное моделирование распределительной сети Республики Ирак с учетом выбранных структур солнечно-дизельных комплексов. Проведена оценка экономической эффективности внедрения выбранных устройств распределенной генерации в распределительные сети Республики Ирак.

Для выбора оптимального соотношения фотоэлектрических модулей и дизельной электростанции в общей структуре предлагается использовать шесть нечетких критериев: T_1 – капитальные затраты с учетом установки, монтажа и эксплуатационных издержек ($K_{уд}$, о.е.); T_2 – потери электроэнергии в элементах солнечно-дизельного комплекса (ΔW , о.е.); T_3 – площадь отчуждаемой территории для установки элементов комплекса (S , о.е.); T_4 – влияние на качество электрической энергии в энергосистеме (ПКЭ, %); T_5 – стоимость дизельного топлива с учетом его доставки ($C_{уд}$, о.е.); T_6 – влияние на экологическую обстановку окружающей среды (\mathcal{E} , о.е.). Единицы измерения представленных критериев задаются в относительных единицах для удобства построения функций принадлежности лингвистических переменных.

В результате статистической и экспертной оценки выбраны термы для лингвистических переменных и диапазон их возможных значений. Для описания критериев $T_1 - T_6$ вводятся четыре функциональные входные лингвистические переменные (термы). Графики функции принадлежности для лингвистических переменных T_1 и T_2 представлены на рисунке 6.

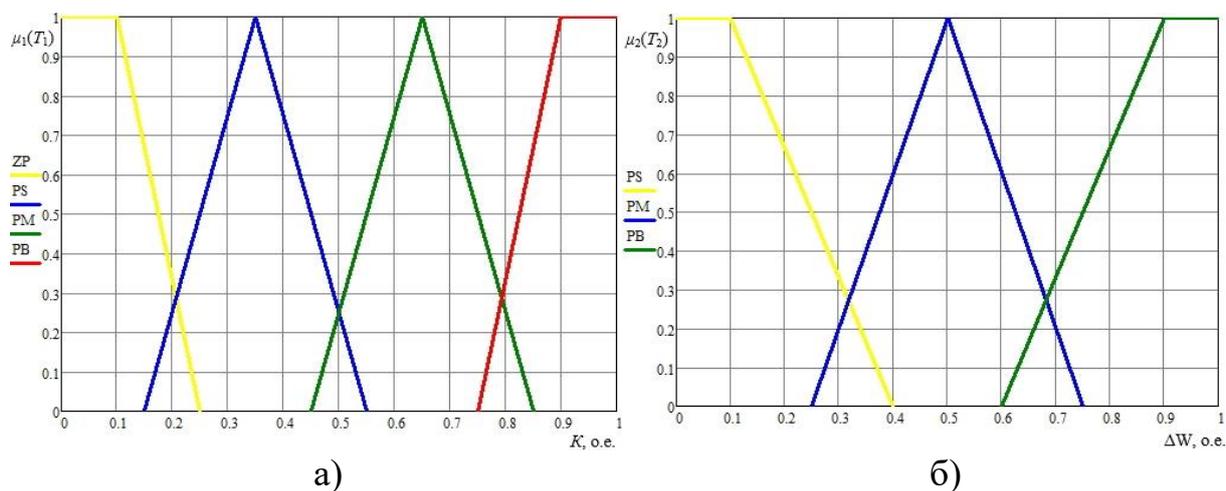


Рисунок 6. Графики функции принадлежности лингвистических переменных:
а – T_1 ; б – T_2

Для определения функции принадлежности предлагаемых комбинаций солнечно-дизельных комплексов на основании их функциональных особенностей составлена таблица 2, характеризующая каждую комбинацию комплекса по каждому критерию в относительных единицах.

Используя оценки альтернатив, определяем функции принадлежности каждой переменной по полученным зависимостям лингвистических переменных. Записываем для каждого критерия T_j нечеткое множество.

Таблица 2

Оценка критериев для разных типов солнечно-дизельных комплексов

№	Тип структуры	К, о.е.	ΔW , о.е.	S, о.е	ПКЭ, %	$C_{уд}$, о.е.	\mathcal{E}
1	ФЭП и ДЭС 1/10	0,71	0,2	0,25	25	1	0,97
2	ФЭП и ДЭС 2/10	0,75	0,3	0,29	30	0,95	0,9
3	ФЭП и ДЭС 3/10	0,79	0,4	0,36	45	0,75	0,8
4	ФЭП и ДЭС 4/10	0,82	0,5	0,52	50	0,65	0,7
5	ФЭП и ДЭС 5/10	0,85	0,6	0,65	60	0,55	0,65
6	ФЭП и ДЭС 6/10	0,88	0,7	0,73	80	0,35	0,55
7	ФЭП и ДЭС 7/10	0,91	0,8	0,86	85	0,30	0,45
8	ФЭП и ДЭС 8/10	0,93	0,9	0,95	90	0,25	0,35
9	ФЭП и ДЭС 9/10	0,95	1	1	95	0,15	0,25

Наглядное отображение каждой степени влияния критериев нечеткого множества на выбор типа солнечно-дизельного комплекса представлено на рисунке 7.

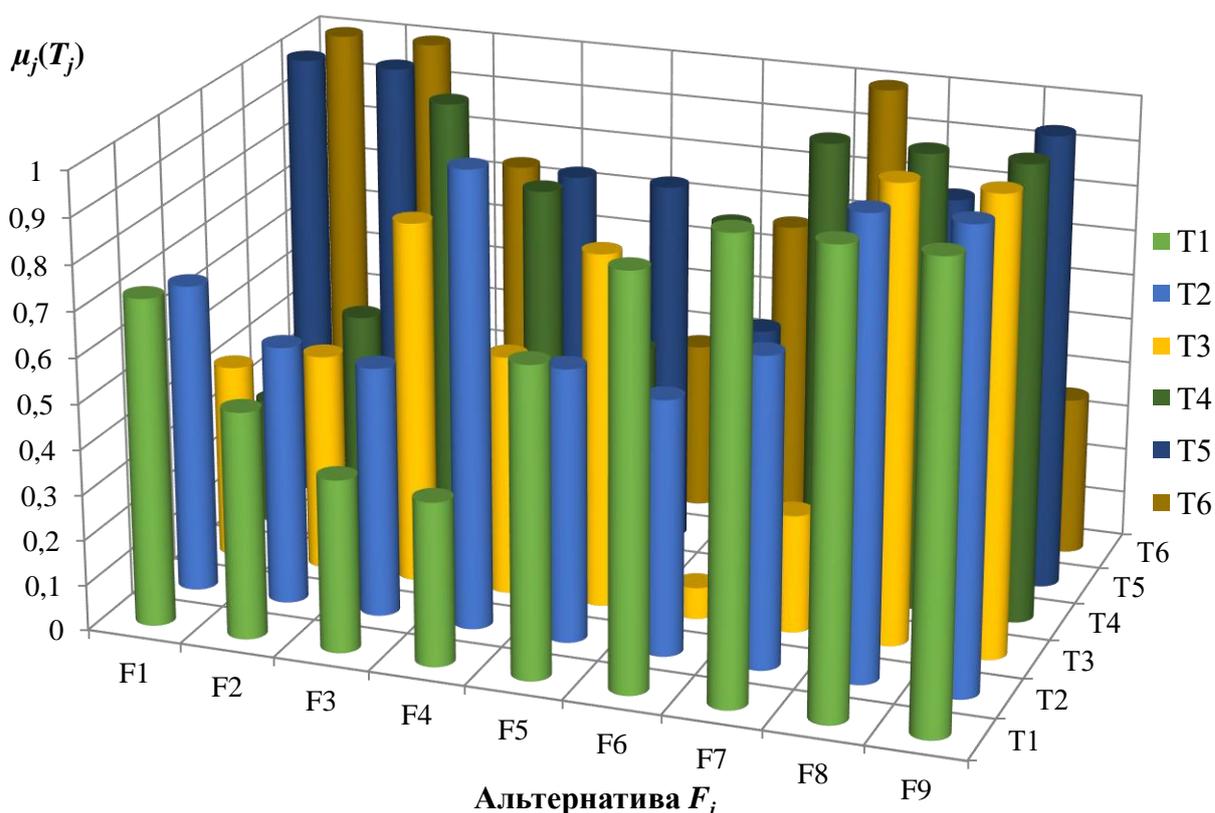


Рисунок 7. Оценка функции принадлежности при различных критериях

В соответствии с правилами нахождения оптимального варианта определяем соответствующие минимальные значения, из которых затем выбирают максимальное, оно и будет указывать на оптимальный вариант структуры солнечно-дизельного комплекса для данного узла.

$$T_1^{\alpha 1} = T_1^{3,689} = \left\{ \begin{array}{l} 0,298 / F_1; 0,078 / F_2; 0,028 / F_3; 0,023 / F_4; \\ 0,241 / F_5; 0,678 / F_6; 1 / F_7; 1 / F_8; 1 / F_9 \end{array} \right\};$$

$$T_2^{\alpha 2} = T_2^{1,541} = \left\{ \begin{array}{l} 0,551 / F_1; 0,42 / F_2; 0,397 / F_3; 1 / F_4; \\ 0,454 / F_5; 0,408 / F_6; 0,551 / F_7; 1 / F_8; 1 / F_9 \end{array} \right\};$$

$$T_3^{\alpha 3} = T_3^{0,374} = \left\{ \begin{array}{l} 0,73 / F_1; 0,761 / F_2; 0,92 / F_3; 0,789 / F_4; \\ 0,912 / F_5; 0,372 / F_6; 0,606 / F_7; 1 / F_8; 1 / F_9 \end{array} \right\};$$

$$T_4^{\alpha 4} = T_4^{0,706} = \left\{ \begin{array}{l} 0,388 / F_1; 0,597 / F_2; 1 / F_3; 0,871 / \\ F_4; 0,597 / F_5; 0,847 / F_6; 1 / F_7; 1 / F_8; 1 / F_9 \end{array} \right\};$$

$$T_5^{\alpha 5} = T_5^{1,452} = \left\{ \begin{array}{l} 1 / F_1; 1 / F_2; 0,217 / F_3; 0,723 / F_4; \\ 0,723 / F_5; 0,364 / F_6; 0,57 / F_7; 0,776 / F_8; 1 / F_9 \end{array} \right\};$$

$$T_6^{\alpha 6} = T_6^{4,156} = \left\{ \begin{array}{l} 1 / F_1; 1 / F_2; 0,287 / F_3; 0,056 / F_4; \\ 0,016 / F_5; 0,19 / F_6; 1 / F_7; 0,018 / F_8; 0,013 / F_9 \end{array} \right\}.$$

Таким образом, наилучшим вариантом является третья структура солнечно-дизельного комплекса (соотношение ФЭМ и ДЭС 3/10),

$$F_3^* = \{0,028; 0,397; 0,92; 1; 0,217; 0,287\}.$$

Была разработана имитационная модель солнечно – дизельного комплекса выбранной структуры в программном комплексе Matlab (рисунок 8).

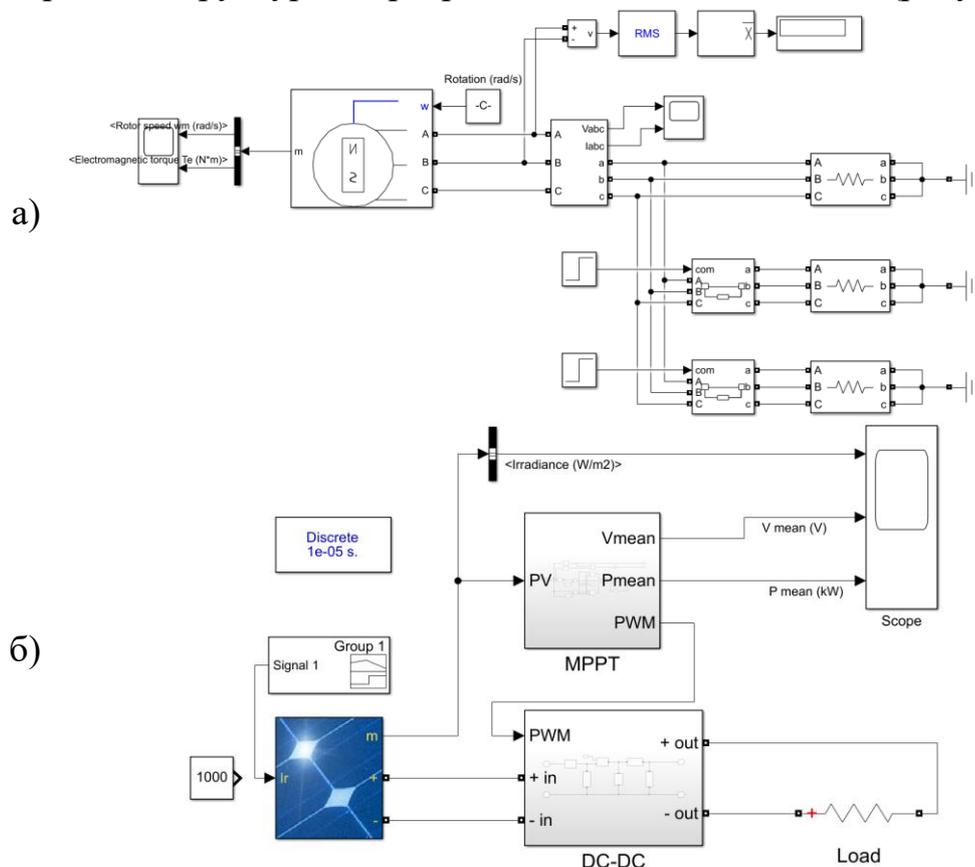


Рисунок 8. Имитационная модель дизельной электростанции (а) и фотоэлектрического модуля (б)

Использование установок распределенной генерации показало значительное повышение напряжения в узлах нагрузки (рисунок 9).

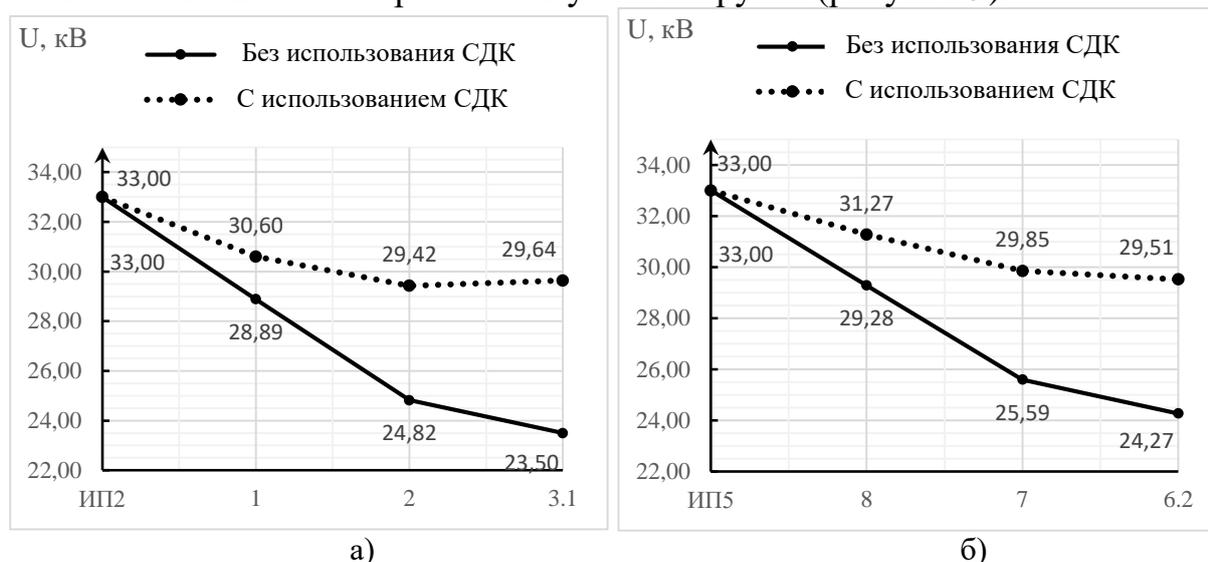


Рисунок 9. Потенциальная диаграмма для участка схемы:
а – ИП2–1–2–3.1; б – ИП5–8–7–6.2

Кроме того, достигается снижение потери активной мощности в элементах распределительной сети Республики Ирак на 58,57% до 1852 кВт.

Финансовый профиль проекта показал, что период возврата инвестиций в предлагаемое техническое решение по внедрению распределенной генерации в узлах потребления составит 2,76 года (рисунок 10).

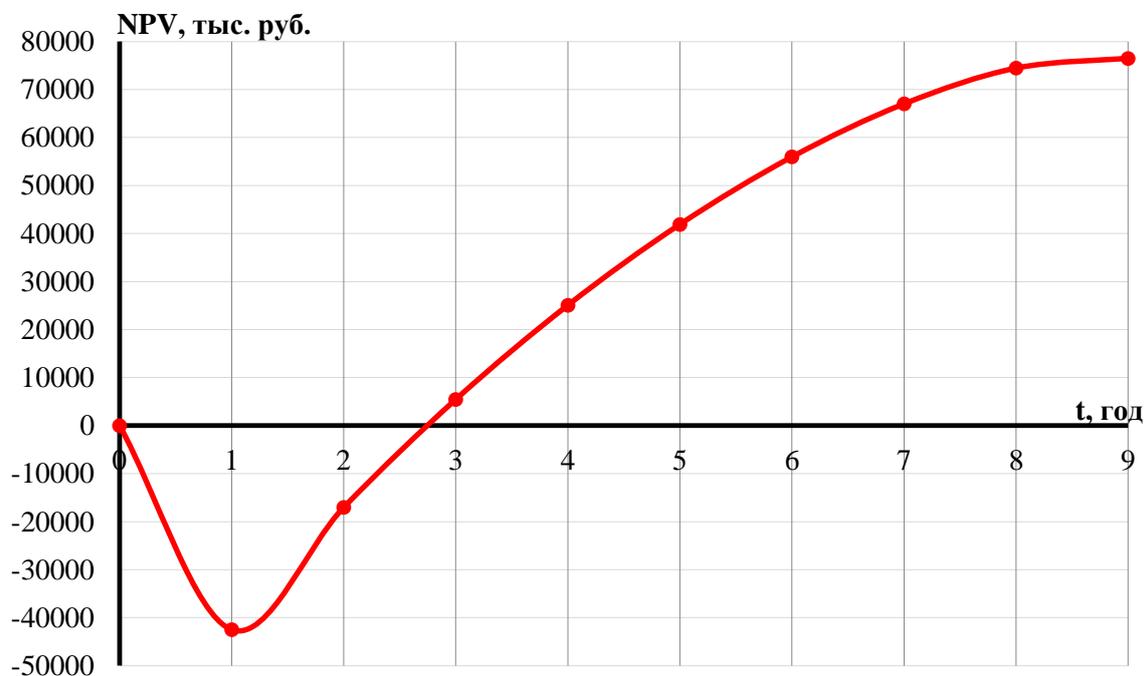


Рисунок 10. Финансовый профиль предлагаемого технического решения по внедрению распределенной генерации в узлах потребления

В приложении представлены результаты расчета режима распределительной сети Республики Ирак и акты внедрения результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Аналитический расчет нормального и послеаварийного режимов работы распределительной сети Республики Ирак напряжением 33/11 кВ показал загруженность сети, так, например, значение отклонение напряжения в узле *3.1* $\delta U = 32,68 \%$, потери напряжения в ветви *1-2* $\Delta U = 10,84 \%$, потери мощности в ветви *1-2* $\Delta P = 1264$ кВт, что свидетельствует о необходимости использования технических устройств. Учитывая климатических особенностей Республики Ирак и стоимости дизельного топлива наиболее рациональным вариантом повышения качества электроснабжения является использование солнечно-дизельных комплексов.

2. В результате решения задачи оптимизации по минимуму потерь активной мощности выявлены оптимальные узлы установки солнечно-дизельных комплексов. Предложено размещение солнечно-дизельных комплексов в трех характерных узлах *3.1*, *6.2*, *14* номинальной мощностью 2; 1,5 и 1 МВт соответственно. Суммарная мощность установок распределенной генерации задается исходя из того, что мощность потерь в ветвях распределительной сети Республики Ирак составляет 4468 кВт.

3. Предложена методика выбора оптимального соотношения мощностей фотоэлектрических модулей и дизельных электростанций в составе солнечно-дизельных комплексов, основанная на решении многокритериальной задачи с использованием нечетких множеств и критериев, характеризующих солнечно-дизельные комплексы, учитывающих особенности системы электроснабжения Республики Ирак. Методика может быть использована при любом составе распределенной генерации и различных критериях. В результате решения многокритериальной задачи нечеткой оптимизации проведен выбор структуры солнечно-дизельных комплексов для каждого их выбранных узлов при равной и разной степени важности рассмотренных критериев. Выбрана структура солнечно-дизельного комплекса, содержащая фото-электрические модули и дизельную электростанцию в пропорции 3/10 с номинальной мощностью фотомодулей и дизельной электростанции для узла *3.1*: 600 и 1400 кВт, для узла *6.2*: 400 и 1100 кВт и для узла *14*: 300 и 700 кВт.

4. Произведена технико-экономическая оценка эффективности повышения качества электроснабжения потребителей Республики Ирак. На основании имитационного моделирования установлено, что подключение солнечно-дизельных комплексов в указанных местах с выбранным соотношением мощностей приводит к снижению потерь активной мощности в элементах распределительной сети на 2616 кВт (58,6 %). Технико-экономический расчет с учетом эксплуатационных затрат показал, что срок окупаемости проекта не превышает 3 года, при капитальных затратах по ценам, действующим в настоящее время, 548 тыс. долларов.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Оценка эффективности распределительных сетей Республики Ирак / В. И. Пантелеев, М.А. Авербух, Е.В. Жилин, **М.В.А. Абдулваххаб** // Промышленная энергетика. 2020. №5. С. 40-45.
2. Выбор узлов подключения распределенной генерации в сетях Республики Ирак / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, **М.В.А. Абдулваххаб** // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-4-10)
3. Обоснование структуры солнечно-дизельного комплекса распределенной генерации на основе нечетких множеств / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, **М.В.А. Абдулваххаб** // Промышленная энергетика. 2021. № 5. С. 45-52.

Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях

4. Averbukh M. A., Abdulwahhab M. W. Influence of Non-Sinusoidality of Voltage on Electricity Loss in Distribution Networks //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1066. №. 1. pp. 1-3.
5. Averbukh M. A., Zhilin E. V., Abdulwahhab M. W. Problems of energy supply of the main consumers of distributive networks of Iraq //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Vol. 552. №. 1. pp. 1-8.

Публикации в других журналах и сборниках трудов конференций

6. Жилин Е.В., Абдулваххаба М.В.А. Имитационное моделирование фотопанелей в распределительных сетях Республики Ирак // Национальная научно-практическая конференция «Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке». п. Майский, 16 декабря 2020 г. С. 214-217.
7. Особенности режимов распределительных электроэнергетических сетей Ирака / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, М.В.А. Абдулваххаба // Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии 2019. Т. 12, № 5. С. 607 – 616.
8. Жилин Е.В., Абдулваххаба М.В.А. Особенности влияния распределенной генерации на потокораспределение в электрических сетях Ирака // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 4 (8). С. 44-51.
9. Абдулваххаб М. В. Влияние несинусоидальности напряжения на потери электроэнергии в распределительных сетях Ирака // II Международ-

ная научно-техническая конференция Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Энергетические системы. 2017. С. 129-133.

10. Авербух М. А., Абдулваххаб М. Особенности построения распределительных сетей напряжением 11-33 кВ Ирака // Будущее науки-2017. 2017. С. 200-203.

11. Абдулваххаб М. В. Анализ распределительных сетей Ирака напряжением 11-33 кВ //Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. 2017. С. 4834-4837.

12. Абдулваххаб М. В., Виноградов А. А. К проблеме статической устойчивости электрической системы // Техника и технологии: пути инновационного развития. 2013. С. 8-12.