На правах рукописи

АЛЬ-ШЕХ САЛИХ МАХМУД АНИС АХМЕД

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ГИБРИДНЫХ ВЕТРОСОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ИРАКЕ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).

Научный руководитель:	**Цыгулев Николай Иосифович**, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Керимов Ибрагим Ахмедович,** доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук Чеченской Республики, член Президиума Пагуошского комитета при Президиуме РАН, руководитель Грозненского отделения Пагуошского комитета, г. Грозный **Клюев Роман Владимирович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ, заведующий кафедрой
Ведущая организация**:**	ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» г. Краснодар

Защита состоится 29 июня 2022 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе ФГБОУ ВО ТулГУ по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 (9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ и на сайте www.tsu.tula.ru.

Автореферат разослан 11 мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета — Хмелев Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Месторождение Румайла в Южном Ираке, открытое в 1947 г., является одним из крупнейших нефтяных месторождений в мире. По оценкам специалистов, в недрах Румайлы содержится около 17 миллиардов баррелей нефти. С 1953 г. Иракская нефтяная компания Rumaila Operating Organization начала добычу нефти в Южном Ираке с помощью погружных центробежных насосов Electric Submersible Pump (ESP), обеспечивающих эффективный подъём больших объёмов нефти с глубины порядка 2...3,8 км.

Нефтегазодобывающий комплекс месторождения Румайла получал электроснабжение от электроэнергетической системы министерства энергетики Ирака. В 1990 году суммарная мощность электростанций Ирака составляла 12000 МВт.

Электроснабжение электрических подстанций нефтяного месторождения Румайла осуществлялось от электроэнергетической системы Ирака напряжением 132 кВ. Система электроснабжения понижающих подстанций Южной Румайлы представляет собой замкнутую электрическую сеть. Главные понизительные подстанции получают питание с двух сторон.

В результате конфликта в заливе, большинство электростанций были выведены из строя силами коалиции, и значительно снизилась надёжность электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса. Это естественно привело к перерывам нефтедобычи. В связи с этим руководством нефтедобывающей компании было принято решение о создании автономной системы электроснабжения погружных центробежных насосов с питанием от дизель-генераторов. Однако при этом возникли экологические и технологические проблемы, связанные с работой дизель-генераторов. Поэтому в дальнейшем планируется использование в качестве источников энергии возобновляемых источников в виде ветро- и солнечных электростанций.

Диссертационная работа посвящена разработке эффективной цифровизованной системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов нефтедобывающих скважин, включая возобновляемые источники электрической энергии при соблюдении экологических норм и сохранении существующего объёма добычи 1 млн. баррелей в сутки.

Объект исследования. Цифровизованная система электроснабжения погружных центробежных насосов нефтяной компании Басры на месторождении Румайла, использующая в качестве источника питания дизель-генератор, алгоритм управления которой обеспечивает минимальные потери транспорта электроэнергии, а также ветровую и солнечную электростанции.

Предмет исследования. Способы повышения эффективности цифровизованной системы электроснабжения путём управления режимом её работы с помощью оптимальных алгоритмов, обеспечивающих минимум потерь транспорта электроэнергии и энергоэффективной работы ветровой и солнечной электростанций в природных условиях месторождения Румайла.

Цель диссертационной работы. Создание методов и алгоритмов проектирования оптимальной цифровизованной системы электроснабжения обеспечивающей минимальные затраты на её строительство и эксплуатацию с источниками питания на основе дизель-генераторов, а также и использованием энергии ветра и солнца.

Научная задача диссертации. Разработка комплекса методик и алгоритмов, обеспечивающих проектирование, строительство и управление рациональной цифровизованной системы электроснабжения насосов нефтяной компании Басры, использующих эффективность комбинированного производства электроэнергии в природных условиях Южного Ирака.

Задачи исследования.

1. Разработка методов проектирования автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети и оптимальных географических координат расположения источника питания для обеспечения минимальных потерь транспорта электрической энергии.
2. Разработка алгоритма управления режимом работы автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети, использование которого обеспечивает минимально возможные потери передачи электрической энергии.
3. Разработка рекомендаций в Инженерную концепцию Румайла по проектированию ветроэлектростанций, работающих в номинальном режиме при скорости ветра менее 5 м/сек.

4. Разработка рекомендаций в Инженерную концепцию Румайла по проектированию солнечных электростанций, работающих в номинальном режиме при солнечной инсоляции менее E=3,0 кВт·ч/сут.

Методы исследования. Для получения результатов в данной диссертационной работе были применены следующие основные методы, такие как: метод теории электрических и магнитных цепей, метод математического анализа, была успешно использована теория автоматического управления, аналитические и численные методы прикладной математики, метод физического, математического и компьютерного моделирования в среде Scilab 6.1.0 и метод теории систем и системного анализа.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается сравнением результатов, полученных в данной диссертации, с результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований ряда других авторов, была многократно сделана обработка измеренных параметров энергопотребления электротехнических комплексов основного оборудования добывающих скважин на основных объектах нефтяной компании Басра, были подтверждены корректные применения уже апробированного математического аппарата и законов электротехники.

Научная новизна.

1. Усовершенствована методика формирования кратчайшей цифровизованной электрической сети и определения географических координат оптимального расположения источника питания в центре сети, обеспечивающая минимально возможные потери передачи электрической энергии.

2. Разработан алгоритм управления режимом работы кратчайшей цифровизованной электрической сети, обеспечивающим минимально возможные потери передачи электрической энергии.

3. Разработана методика проектирования, которая подтверждена расчётом ветроэлектростанций, работающих в номинальном режиме при скорости ветра менее 5 м/сек с использованием энергии ветрогенератора с вертикальной турбиной для раскрутки горизонтальных турбин при малой скорости ветра.

4. Разработана методика проектирования, которая подтверждена расчётом электростанций с солнечными батареями, изготовленными с помощью гетероструктурной технологии, работающими в номинальном режиме при солнечной инсоляции менее E=3,2 кВт·ч/сут с использованием устройства для быстрой зарядки аккумуляторных батарей, при больших величинах солнечной инсоляции.

Практическая ценность диссертации определяется разработанными рекомендациями по проектированию автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов нефтедобывающего комплекса; по проектированию ветроэлектростанций, работающих при скоростях ветров менее 5 м/сек, и солнечных электростанций, работающих при солнечной инсоляции менее E=3,0 кВт·ч/сут, гибридной ветросолнечной электростанции. Предложенные рекомендации включены в Инженерную концепцию Румайла на предварительном этапе базового проекта модернизации (Pre-FEED).

Реализация результатов исследования. Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены и использованы при формировании автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети и определении географических координат оптимального расположения источника питания, обеспечивающего минимально возможные потери передачи электрической энергии; проекты ветровой и солнечной электростанций планируется использовать при модернизации системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов в районах Janubia и Ratqa месторождения Румайла на подготовительном этапе модернизации основного проекта (Pre-FEED).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика формирования кратчайшей автономной цифровизованной электрической сети системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов нефтедобывающих скважин и вычисления географических координат оптимального расположения ис-

точника питания, обеспечивающего минимально возможные потери передачи электрической энергии потребителям.

2. Алгоритм управления режимом работы автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети, использование которого обеспечит минимально возможные потери передачи электрической энергии.

3. Методика проектирования, которая подтверждена расчётом ветроэлектростанций, работающих в номинальном режиме при скорости ветра менее 5 м/сек, в которой для раскрутки роторов генераторов с горизонтальными турбинами при малой скорости ветра используется энергия генераторов вертикальных ветротурбин, предложенная в качестве мероприятий, которые способствуют энергосбережению электроэнергии на подготовительном этапе разработки инженерной концепции Румайла в Южном Ираке, в районе Басра.

4. Методика проектирования, которая подтверждена расчётом солнечных электростанций, работающих в номинальном режиме при солнечной инсоляции менее E=3,0 кВт·ч/сут, в которой используется устройство для быстрой зарядки аккумуляторных батарей при высоком уровне солнечной инсоляции, и предложенная в качестве мероприятий, которые способствуют энергосбережению электроэнергии на подготовительном этапе разработки инженерной концепции Румайла в Южном Ираке в районе Басра.

5. Гибридная ветросолнечная электростанция, в которой энергия от аккумуляторных батарей, заряженных с помощью солнечных батарей, используется для раскрутки роторов генераторов с горизонтальными ветротурбинами.

Апробация работы. Основные положения проведенных исследований и результаты работы докладывались на Международной конференции «Кибернетика энергетических систем» в Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, в 2017, 2018, 2019, 2020 гг., на семинаре сотрудников и обучающихся в Донском государственном техническом университете (2017, 2018, 2019 и 2020 г.); Всероссийской (национальной) научной конференции «Научно-техническое обеспечение АПК юга России» с 15 по 31 мая 2019 г. в г. Зерноград; Международной научно-практической конференции «Электроснабжение, электротехнологии и энергетическое оборудование» 17-23 мая 2018 г. Зерноград; на семинаре Академии наук Чеченской Республики, г. Грозный, 2019; на Региональной научно-технической конференции по тематике «Студенческая весна 2020», в Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, 8 июня 2020 г.; на национальной научно-практической конференции «Научно-техническая 20-ая конференция кафедры «ИЭС» ко дню Энергетика», в Донском государственном техническом университете, г. Ростов-на-Дону, 2019; International Conference on developments in esystem engineering, Liverpool, British.-2020; «Technical and architectural options for installing solar energy systems on modern building facades», IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, г. Белгород; Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021), г. Казань, 2021.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 29-ти печатных работах, в том числе: 2 статьи в периодических изданиях (**SCOPUS),** 2 статьи в периодических изданиях рекомендованных ВАК, остальные в РИНЦ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 153 наименований. Основная часть диссертации изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 7 таблиц.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в постановке и реализации задач исследования, участвовал в разработке методики проектирования кратчайшей автономной цифровизованной электрической сети системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов нефтедобывающих скважин и определения географических координат оптимального расположения источника питания, обеспечивающей минимально возможные потери передачи электрической энергии; ветровых и солнечных электростанций. Провел исследование системы электроснабжения электродвигателя погружных центробежных насосов по их технико-экономическим характеристикам на этапе добычи нефти на месторождении Румайла в Южном Ираке в районе Басра, обосновал важность и необходимость разработки мероприятий, которые способствуют энергосбережению электроэнергии в согласованных районах

нефтедобычи, предложил, проанализировал и разработал важные положения для инженерной концепции Румайла на этапе подготовительного создания основного проекта модернизации (Pre-FEED).

Соответствие представленной диссертации паспорту научной специальности 05.09.03. «Электротехнические комплексы и системы»:

по п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» – представлена «Методика формирования кратчайшей автономной цифровизованной электрической сети системы электроснабжения электродвигателей центробежных погружных насосов нефтедобывающих скважин и географических координат оптимального расположения источника питания, обеспечивающая минимально возможные потери передачи электрической энергии на месторождении Румайла, ветро- и солнечных электростанций, алгоритм управления режимом работы электрической сети, обеспечивающий минимальные потери транспорта электроэнергии»;

по п. 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» – представлен «Алгоритм управления режимом работы автономной кратчайшей цифровизованной электрической сети, использование которого обеспечит минимально возможные потери передачи электрической энергии в системе электроснабжения электродвигателей погружных центробежных насосов, использующих эффективность комбинированного производства электроэнергии в природных условиях Южного Ирака».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, объект и предмет исследования, сформулированы цель и научные задачи работы, раскрываются методы исследования, научная новизна и практическая значимость диссертации, обосновывается их достоверность, приводятся сведения о реализации и внедрении результатов работы, их апробации и опубликовании, а также основные положения, выносимые на защиту, дана информация о структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации был проведен анализ природно-георафических условий в районе месторождения Румайлы и электрических сетей Ирака.

Месторождение Румайла является одним из крупнейших в мире нефтяным месторождением-супергигантом, которое содержит, по оценкам специалистов, около 17 миллиардов баррелей нефти (рис.1).

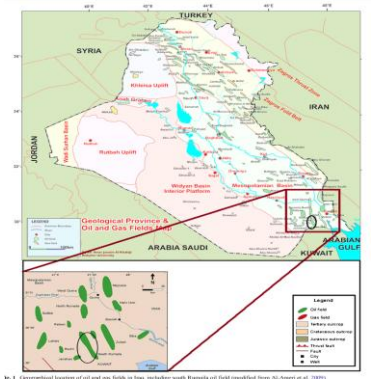


Рис.1 Месторождение Румайла в Южном Ираке

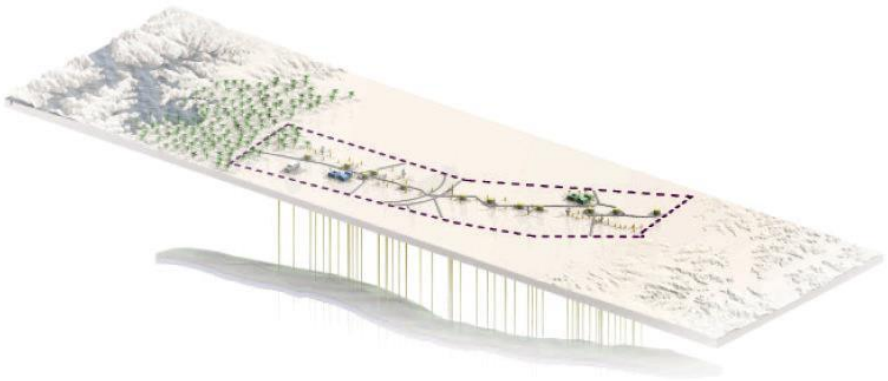


Рис. 2. Разрез месторождение Румайла

Географически это поле представляет собой антиклиналь, состоящий из трёх куполов с юга на север (рис.1, 2): южная Румайла, северная Румайла, западная Курна.

Первоначально нефть поднимается на поверхность под действием пластового давления. Затем в ходе эксплуатации скважины фонтанирующим способом пластовое давление падает, объём извлекаемой нефти снижается и возникает необходимость в искусственном подъёме нефти с помощью насосов. В Румайле используются центробежные погружные насосы Electric

Submersible Pump (ESP). ESP – универсальный метод искусственного подъёма нефти. Погружные насосы, используемыми для подъёма нефти, находятся в глубоких колодцах, распределённых в широком географическом районе.

Электроснабжение электрических подстанций нефтяного месторождения Румайла осуществляется от электроэнергетической системы Ирака напряжением 132 кВ с помощью подстанции «New Rumaila». От понижающих подстанций отходят электрические сети среднего напряжения. В Южной Румайле сети 11 кВ, в Северной Румайле 6,6 кВ.

Из-за частых перебоев в подаче электроэнергии после военного конфликта снизилась добыча нефти. Добывающие компании поставили задачу повысить надёжность электроснабжения, решив установить дизель-генераторы на каждую скважину.

На рис. 3 изображён фрагмент автономной системы электроснабжения ESP. В Южной Румайле дизель-генераторы вырабатывают электроэнергию с напряжением 11 кВ. В Северной Румайле дизель-генераторы вырабатывают электроэнергию с напряжением 6 кВ.

Для получения электроэнергии на каждой скважине установлены дизель-генераторные установки марки Caterpiller, Jinan и др. мощностью 500, 700, 1000 кВт.

При реализации проекта по установке дизель-генераторов на каждой скважине, возникли проблемы технического и экономического характера, несмотря на надёжность данной системы. Дизель-генераторы нуждаются в постоянном техническом обслуживании.

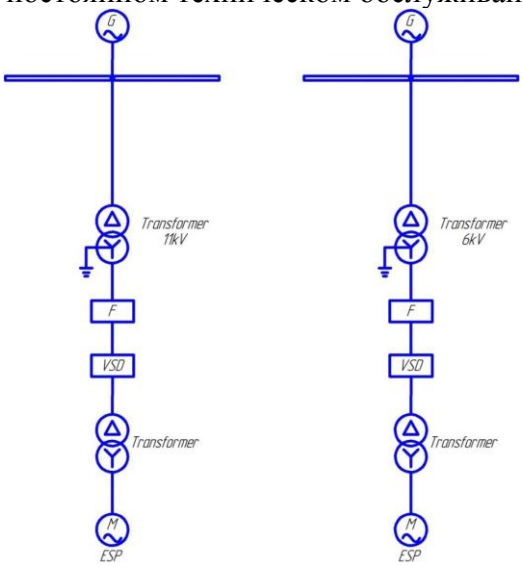


Рис. 3. Схема автономного электроснабжения ESP

Кроме того, суммарная установленная мощность дизель-генераторов более чем на 75% превышает полную потребляемую мощность, затрачиваемую на добычу нефти. Коэффициент загрузки при этом лежит в пределах от 0,05 до 0,64. Для 60% дизель-генераторов коэффициент загрузки составляет менее 0,5.

Поэтому была реализована автономная система электроснабжения нефтедобывающих скважин виде дерева Штейнера с одним источником питания, установленном в центре нагрузок сети, географические координаты которого рассчитаны по методу моментов. В диссертационной работе предлагается реализовать локальную сеть электроснабжения в виде кратчайшей сети, а источник питания установить в центре электрической сети. Одновременно сформировать алгоритм управления режимом работы сети, с помощью которого достигаются минимальные потери транспорта электрической энергии.

Для уменьшения загрязнённости атмосферы продуктами сгорания дизельного топлива разработаны проекты источников питания с использованием энергии ветра и солнца.

Во второй главе диссертации разработана цифровизованная автономная кратчайшая электрическая сеть (КС) с источником питания в центре сети, управление режимом работы которой осуществляется путём регулирования коэффициентов трансформации питающих трансформаторов и мощности компенсирующих устройств (КУ) реактивной нагрузки с помощью разработанного алгоритма, обеспечивающего минимальные потери транспорта электроэнергии.

Впервые задача о КС решалась в трудах Э. Торричелли, П. Ферма, Я. Штейнера. Наибольший вклад в разработку методик проектирования электрических сетей напряжением 0, 4; 6 и 10 кВ внесли российские учёные Каялов Г.М., Каждан А.Э., Куренный Э.Г., Надтока И.И., Теребаев В.В., Шведов Г.В., Колесников И.Н.

Научной школой Каялова Г.М. в Новочеркасском политехническом институте разработан геометрический метод (метод эквилонгальных линий) решения задачи Штейнера в метрических пространствах [1]*.

Автором при разработке методики построения КС использованы научные результаты работы школы Каялова Г.М. При этом были устранены ограничения характерные для построения промышленных сетей и использованы следующие принципы реализации сетей:

- принцип разомкнутости сетей, заключающийся в том, что минимальная сеть не должна иметь содержать замкнутых контуров, то есть иметь конфигурацию типа дерева;
- многоэкстремальная задача синтеза системы электроснабжения формируется в таком виде, чтобы решение задачи было одноэкстремальным;
- центром сети (ЦС) является точка, расположение в которой источника питания минимизирует переменную составляющую затрат на сеть (внутреннюю метрику) и потери транспорта электроэнергии;
- принцип дополнительных узлов, заключающийся в том, что для КС узлы сети могут не совпадать с заданными пунктами.

Для снижения потерь транспорта электроэнергии в режиме эксплуатации предложено ввести два дополнительных условия – первое условие равноудалённости. Его суть заключается в том, что для каждой ветви радиальной схемы потери напряжения до самого удалённого от источника питания потребителя должны быть близки по величине, и отличаться друг от друга не более чем на 30...40 %. Второе условие – условие равнонагруженности всех ветвей радиальной схемы, отходящих от источника питания. Отличия в нагрузках по этим ветвям не должно более 15%.

Для исходных данных, приведенных в таблице 1, первоначально нефтедобывающей компанией была построена сеть, используя дерево Штейнера, разводка которой показана на рис. 4 [2]*.

Табл. 1. Координаты нефтедобывающих скважин и мощности погружных насосов

№ п.п.	Координаты скважин, км	Мощности потребителей, кВт
1	Ru-033 (0; 75)	147,1
2	Ru-064(85;0)	147,1
3	Ru-083(50;75)	141,3
4	Ru-093(75;30)	107,5
5	Ru-286(20;10)	154,5
6	Ru-300 (40; 45)	117,4
7	Ru-321(60;70)	147,1

Определение координат центра – центра электрических нагрузок генерации производено по известной формуле моментов.

Электрическая сеть, построенная с использованием разработанных в Новочеркасском политехническом институте рекомендаций, приведена на рис.5. При этом были сняты ограничения характерные для промышленных сетей, так как сеть сформирована для условий пустыни.

---

*1. Основы построения промышленных электрических сетей/ Каялов Г.М., Каждан А.Э., Ковалев И.Н., Куренный Э.Г.; Под общ. Ред. Г.М. Каялова. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.

*2. Ал Али М. Абдулхамид Абдулхай. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Казань 2019, 24 с.

Для нахождения координат центра сети – места расположения источника питания получены следующие выражения:

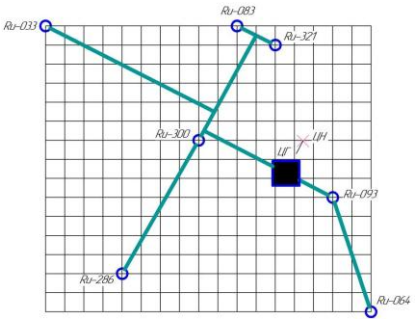


Рис.4. Конфигурация электрической сети, построенная на основе дерева Штейнера, с источником питания по методу моментов

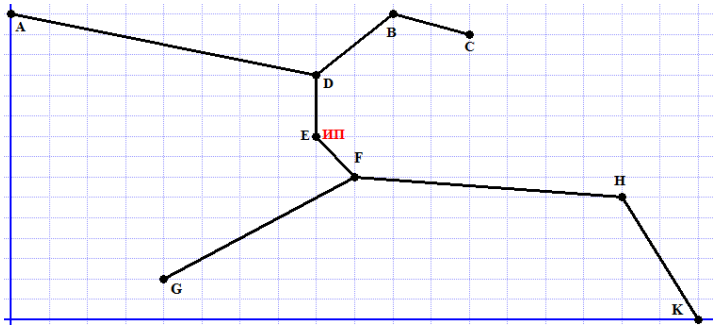


Рис. 5. Рекомендуемая схема сети электроснабжения погружных насосов нефтедобывающих скважин

$$X_{цэн} = \frac{\sum 2\frac{k}{k+1} x_j P_j}{\sum P_j},$$

$$Y_{цэн} = \frac{\sum 2\frac{k}{k+1} y_j P_j}{\sum P_j}.$$

Для определения рода тока и оптимальной величины напряжения сети была решена модельная задача и установлено, что в сети должно использоваться переменное напряжение равное 11 кВ с источником питания – 2 дизель-генератора АД-500.

Таким образом, напряжение источника питания 0,38 кВ повышается до величины 11 кВ. У потребителей установлены понижающие трансформаторы с напряжениями 11/0,4 кВ. Выбранные для этого случая типы проводов и рассчитанные индуктивные и активные сопротивления, приведены в таблице 2. Токи в сети вычислялись без учёта фазового сдвига вследствие их небольших значений.

Табл. 2. Типы проводов и сопротивления линий в системе электроснабжения

№ п.п.	Линия	Длины линий, км	Сечение, мм^2	Тип провода	X, Ом	R, Ом
1	AD	42,3	16,7	АС-25	14,8	58,3
2	DB	19,2	32,8	АС-35	6,7	16,3
3	BC	11,5	16,1	АС-25	4,0	15,9
4	DE	15,4	49,5	АС-50	5,4	10,0
5	EF	10,1	47,6	АС-50	3,5	6,5
6	GF	34,6	17,6	АС-25	12,1	47,7
7	FH	30,1	30,0	АС-35	10,5	25,5
8	HK	30,7	16,7	АС-25	10,7	42,3

В сформированной кратчайшей автономной электрической сети, суммарная длина линий примерно на 15% меньше по сравнению с сетью, построенной в виде дерева Штейнера, и на 11% меньше расходы на материал проводов трасс линий.

В диссертации произведён расчёт потерь напряжения и мощности при эксплуатации сети электроснабжения при номинальном напряжении источника, отсутствии устройств компенсации реактивных нагрузок и регулирования коэффициентов трансформации понижающих трансформаторов. Коэффициент мощности во всей сети электроснабжения принят равным 0,8; сечение проводов выбрано по экономической плотности тока ($I_{эк} = 1 А/мм^2$).

Результаты расчёта приведены в таблице 3.

Табл. 3. Сопротивления линий в схеме, Потери напряжения и мощности в системе электроснабжения

№ п.п.	Линия	X, Ом	R, Ом	P, кВт	Q, кВт	ΔU, кВ	ΔP, кВт
1	AD	14,8	58,3	147,1	119,2	1101,7	25,2
2	DB	6,7	16,3	288,4	216,3	677,2	27,2
3	BC	4,0	15,9	141,3	105,7	373,4	6,4
4	DE	5,4	10,0	435,5	326,2	636,1	38,4
5	EF	3,5	6,5	419,0	314,3	434,4	23,0
6	GF	12,1	47,7	154,5	115,9	998,8	23,4
7	FH	10,5	25,5	264,5	198,0	997,7	35,7
8	HK	10,7	42,3	147,1	110,3	842,4	18,3

Как видно из табл.3 потери напряжения превышают 10%, поэтому для обеспечения нормальной работы электродвигателей погружных насосов необходимо величину напряжения источника питания увеличить на 15% по сравнению с номинальным. Суммарные потери мощности составляют 197,6 кВт, что составляет около 20% передаваемой мощности. Такие потери являются недопустимыми, поэтому необходимо использовать трансформаторы с РПН и быстродействующие компенсирующие устройства (КУ) плавного регулирования реактивной мощности нагрузки, а также обеспечить оптимальное управление режимом работы сети. В работе выбрано КУ типа СТК-5/20-10.

Управлению режимом работы сети необходимо реализовать на платформе энергетического Интернета. Средства телеизмерений, размещенные в зоне источника питания (ИП), позволяют контролировать токи (мощности), напряжения всех её присоединений.

В диссертации разработан алгоритм управления электрической сетью системы электроснабжения, его внедрение позволит обеспечить минимальные потери транспорта электроэнергии.

Для реализации алгоритмов управления режимом сети первоначально задаются следующие данные о сети:

- индуктивные X_i и активные R_i сопротивления всех линий;

- номинальные мощности трансформаторов $S_{\text{тр } i}$ всех узлов нагрузки;

- номинальные мощности устройств компенсации (КУ) $Q_{\text{ку ном } i}$ потребителей и характеристики устройств РПН понижающих трансформаторов.

Алгоритм управления электрической сетью, изображённой на рис. 5, состоит из следующих шагов.

1. На шинах источника питания устанавливается минимальное допустимое напряжение $U_{\min}$, выводятся из работы КУ всех потребителей, переключатели РПН всех понижающих трансформаторов устанавливаются в положение, соответствующее минимальному значению коэффициента трансформации.

2. Вычисляются величины активной P_j и реактивной Q_j мощностей во всех отходящих от источника питания линиях для текущего интервала времени $\tau_{\text{i}} = 0{,}02$ сек.

3. Вычисляются значения токов, активных и реактивных мощностей во всех ветвях схемы и потери напряжения до самого удалённого потребителя

$$\Delta \text{U}_{\text{j}} = \frac{1}{U_{ном}} \sum_i \left(P_j R_j + Q_j X_j \right), \tag{1}$$

напряжения во всех узлах схемы близки по величине к номинальному значению $U_{ном}$.

4. Вычисляются рабочие напряжения у всех наиболее удалённых потребителей

$$U_{\text{jppa}} = U_0 - \Delta U_{\text{j}},$$

5. Для всех потребителей производится сравнение рабочих напряжений с максимальными $U_{\max}$ и минимальными $U_{\min}$ допустимыми значениями

$$U_{\min} \le U_{jppa} \le U_{\max}. \tag{2}$$

6. Если в одном из узлов нагрузки неравенство (2) не выполняется, нарушается его левая граница, то производится корректировка мощности КУ, при выполнении условия (2) осуществляется переход на пункт 8. Величина напряжения, на которую необходимо повысить напряжение на понижающем трансформаторе определяется выражением

$$\Delta \text{U}_{\text{jppa}} = U_{\min} - \text{U}_{\text{jppa}}. \tag{3}$$

7. На *j*-тых присоединениях устанавливаются значения реактивной мощности КУ, определяемые из выражения

$$\Delta Q_j = \frac{\Delta \text{U}_{\text{j}} U_{ном} - P_j R_j}{X_j},$$

полученного из (1).

Если величина ΔQ_j оказывается больше номинальной мощности *j*-го устройств компенсации, то скорректировав значение реактивной мощности для выражении (1) $Q_j - \Delta Q_j$, возвращаемся в пункт 2.

Вновь полученное значение $\Delta \text{U}_{\text{jppa}}$ определяет величину напряжения, на которую нужно увеличить вторичное напряжение понижающего трансформатора с помощью РПН.

Если по-прежнему рабочее напряжение у какого-то потребителя меньше $U_{\min}$, то необходимо увеличить напряжение на шинах источника питания до выполнения условия (2).

8. Если условие (2) выполняется, то формируется задача для определения мощности КУ $\text{Q}_{\text{КУj}}$ и коэффициентов трансформации k_{Tj}, минимизирующих потери мощности в текущем интервале времени τ.

Целевая функция имеет следующий вид

$$\Delta \text{P}_{\text{j}} = \frac{p_j^2 + Q_j^2}{\text{U}_{\text{номj}}^2} R_j \Rightarrow \min. \tag{4}$$

При этом должны выполняться следующие условия

$$\text{k}_{\text{Tjmin}} \le \text{k}_{\text{Tjопт}} \le \text{k}_{\text{Tjmax}}, \tag{5}$$

$$\text{Q}_{\text{КУjmin}} \le \text{Q}_{\text{КУjопт}} \le \text{Q}_{\text{КУjmax}}, \tag{5}$$

$$\frac{\text{X}_{\text{j}}}{\text{U}_0^2} Q_{КУj}^2 - \text{Q}_{\text{КУj}} + \frac{\text{X}_{\text{j}} P_j^2}{\text{U}_0^2} + Q_j - \text{Q}_{КУоптj} = 0, \tag{7}$$

$$U_{joon} = U_0 - \frac{P_j R_j + Q_j X_j}{U_0} + \frac{\left(\frac{P_j X_j - Q_j R_j}{U_0}\right)^2}{2\left(U_0 - \frac{P_j R_j + Q_j X_j}{U_0}\right)^2}, \quad (8)$$

$$U_{\min} \le U_{joon} \le U_{\max}, \quad (9)$$

где k_{Tjmin}, Q_{KYjmin} – минимально возможные значения коэффициентов трансформации понижающих трансформаторов с РПН и мощности КУ,

k_{Tjmax}, Q_{KYjmax} – максимально возможные значения коэффициентов трансформации понижающих трансформаторов с РПН и мощности КУ.

Поиск минимума (4) при условиях (5) - (9) выполняется методом покоординатного спуска по переменным $Q_{KYjопт}$ и $k_{Tjопт}$. Переменная $k_{Tjопт}$ изменяется дискретно с шагом, соответствующим переходу от одного ответвления РПН к другому. Переменная $Q_{KYjопт}$ изменяется непрерывно. Изменение $k_{Tjопт}$ выполняется при нарушении условия (9). Поиск минимума по переменной $Q_{KYjопт}$ при фиксированном значении $k_{Tjопт}$ осуществляется делением интервала (6) пополам, методом золотого сечения.

В этой главе проведены расчёты устойчивости системы электроснабжения. Для расчёта статической устойчивости построена характеристика электромагнитной мощности источника питания и вычислен коэффициент запаса статической устойчивости.

$$K_{ст} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} 100\%.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости имеет достаточно большое значение $K_{ст} = 90\%$.

Расчёт динамической устойчивости выполнен для наиболее тяжёлого случая – трёхфазного короткого замыкания на зажимах электродвигателя погружного насоса в узле Е по методу площадей. В этом случае сопротивление петли короткого замыкания имеет наибольшее значение $X_{\Sigma кз} = 0{,}4$.

Коэффициент запаса динамической устойчивости определяется по формуле

$$K_{дин} = \frac{F_{T\max[} - F_{usk}}{F_{usk}} 100\% = 43\%.$$

Таким образом, запасы статической и динамической устойчивости для КС оказались более чем на 20% больше чем для минимальной сети, что обусловлено меньшим суммарным сопротивлением сети.

Для безотказной работы каждого узла нагрузки необходимо, чтобы все элементы сети, входящие в эту ветвь, работали безотказно.

Расчёты для модельной задачи показали, что вместо условной вероятности повреждения можно использовать просто вероятность повреждения, а вероятность отказа узла нагрузки равна произведению вероятностей повреждений отдельных элементов ветви. В данном случае погрешность результата составляет примерно 5,9 %.

Величины вероятностей безотказного электроснабжения узлов нагрузки сети, приведены в таблице 4.

Табл.4 Вероятности безотказного электроснабжения узлов нагрузки сети

P(A)	P(B)	P(C)	P(E)	P(G)	P(H)	P(K)
0,991	0,992	0,989	0,995	0,991	0,992	0,989

В третьей главе диссертации разработана методика проектирования, которая подтверждена расчётом ветроэлектростанций, работающих в номинальном режиме при скорости ветра менее 5 м/сек с использованием энергии ветрогенератора с вертикальной турбиной для раскрутки горизонтальных турбин при малой скорости ветра.

Руководство нефтедобывающей компанией Румайла для дальнейшего снижения стоимости добычи нефти решило снизить стоимость используемой электроэнергии и выполнения решений Парижского соглашения (2015) использовать альтернативные источники электроэнергии. Ниже рассмотрены возможности использования энергии ветра.

Проблема использования энергии ветра в Южном Ираке обусловлена низкой скоростью ветра, средняя скорость ветра порядка 3,2 м/сек. Чтобы сделать правильный выбор, был проанализирован весь спектр промышленно выпускаемых ветрогенераторов.

Наибольшее распространение получили горизонтальные ветротурбины. Они изготавливаются с одной, двумя и тремя лопастями, а также многолопастными. Трёхлопастные турбины являются довольно тихоходными, однако обеспечивают вращение роторов генераторов от нескольких ватт до нескольких мегаватт.

В соответствии с законом Жуковского-Бетца коэффициент использования энергии ветра идеальными турбинами с горизонтальной осью вращения ограничен величиной 59,3 %; в реальных же турбинах он составляет 40 – 50 %. Особенностью горизонтальных ветротурбин является то, что они автоматически осуществляют поиск ветра и поворачиваются. Кроме того, угол поворота лопастей можно изменять, чтобы уловить даже небольшой ветер. Поэтому они обычно используются при создании ветропарков. Основным недостатком горизонтальных ветротурбин является достаточно высокий момент запуска.

Вертикальные ветротурбины являются менее эффективными по сравнению с горизонтальными, их коэффициент использования энергии ветра в 2...3 раза меньше, чем у горизонтальных конструкций. Ось вертикальной ветротурбины установлена перпендикулярно поверхности земли, поэтому половина от общего количества лопастей ветроколеса всегда вращается против ветра. Из-за этого у ветрогенератора с вертикальным вращением ветроколеса половина энергии потока ветра не используется, что сильно снижает их энергоэффективность. Это их главный недостаток. Однако эти турбины устойчиво работают при скоростях ветра менее 3 м/сек.

Наиболее часто используются следующие виды вертикальных ветротурбин: ветротурбина Дарье, ветротурбина Савониуса, геликоидная ветротурбина.

Анализ показал, что для поставленной задачи наиболее предпочтительной является ветротурбина Дарье. Промышленностью выпускаются турбины мощностью до 50 кВт, а их КПД может достигать КПД горизонтальных турбин.

Эти турбины являются довольно шумными, что обусловлено сложным и сильно нестационарным характером обтекания лопастей, большим числом Рейнольдса и Струхаля. Однако уровень шума не превышает 18...20 Дб.

В настоящее время ещё не разработана адекватная математическая модель этих турбин, что затрудняет их конструирование. Однако достоверно установлено, что при малой скорости ветра ветротурбина Дарье работает в режиме близком к режиму работы турбины Савониуса. Благодаря этому в конструкцию турбины Дарье внесена идеология построения турбины Савониуса, что обеспечивает её раскрутку начиная со скорости ветра 3 м/сек.

КПД более 59,3% достигнут в безлопастных ветрогенераторах. С 2015 года такие генераторы изготавливаются испанской фирмой Vortex Bladeless SL. Максимальная мощность такого генератора составляет 4 кВт, поэтому рассматриваемой системе электроснабжения они использоваться пока не могут.

Ещё один вариант безлопастного ветрогенератора – летающее крыло. Такой воздушный летающий генератор «ЕК 30» разработан и поставляется немецкой фирмой Enerkite. Мониторинг скорости ветра над Европой и Патагонией показал, что в этих регионах постоянно дуют ветры до высоты 10 км от уровня поверхности земли. Мониторинг ветров над Южным Ираком отсутствует, поэтому использование ветрогенераторов фирмы Enerkite преждевременно.

Проведенные расчёт позволили сформировать ветропарк для месторождения Румайла: десять горизонтальных турбин WH6.4-100000W с номинальной мощностью генератора ВЭУ 100 кВт при число оборотов n = 200 об/ мин, диаметр ветроколеса 30 м.

Для раскрутки роторов горизонтальных ветрогенераторов предложено использовать вертикальную турбину Дарье мощностью 20 кВт английской фирмы VAWT. Диаметр турбины 7,1 м; начальная скорость раскрутки составляет 2,7 м/сек.

Для исключения самозапуска горизонтальных генераторов (когда они работают в режиме электродвигателей при малых скоростях ветров), разработан специальный терминал, в котором предусмотрена самодиагностика и выдача сигналов при появлении неисправности.

В настоящее время среди специалистов по ветроэнергетике нет единого мнения относительно наиболее приемлемого типа генератора для ветроэлектростанций. Наиболее часто используются три основных типа генераторов:

- синхронные генераторы,
- асинхронные генераторы,
- генераторы постоянного тока.

В диссертации проведен анализ поведения этих генераторов в структуре ветроэлектростанции вусловиях Южного Ирака.

Синхронные трёхфазные генераторы наиболее часто используются для выработки энергии на электростанциях различного назначения. В большинстве случаев они изготавливаются трёхфазными. Роторы синхронных генераторов неявнополюсные и явнополюсные. Генераторы оснащаются различными системами возбуждения.

Из курса электрических машин для синхронного генератора без демпферных обмоток известна система дифференциальных уравнений в фазных координатах:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A &= u_A \\ \frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B &= u_B \\ \frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C &= u_C \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned}\right\}, \tag{10}$$

где R, R_f – активные сопротивления контуров каждой фазы цепи возбуждения соответственно, $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f$ – результирующие потокосцепления обмоток статора и обмотки возбуждения соответственно, u_A, u_B, u_C, u_f – напряжения на зажимах соответствующих обмоток.

Рассмотрим симметричный режим машины. Для упрощения расчётов в системе уравнений (10) заменим три фазных тока i_A, i_B, i_C обобщённым вектором тока трёхфазной системы

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}\left(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2\right)}.$$

Это позволит снизить размерность задачи, и тем самым упростить её решение. При необходимости фазные токи могут быть найдены как проекции обобщённого вектора на три оси времени сдвинутые под углом 120^o друг относительно друга.

Используя обобщённый вектор тока и потокосцепления систему (10) сведём к виду

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} - Ri &= u \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned}\right\}, \tag{11}$$

где Ψ – обобщённое потокосцепление трёхфазной системы.

Подставляя выражения для потокосцеплений машины с неявнополюсным ротором, получим систему уравнений в относительных единицах

$$\left.\begin{aligned} L_A\frac{di}{dt}+M_{df}\cos\gamma\frac{di_f}{dt}-M_d\omega\sin\gamma i_f-R_A i=u \\ M_d\cos\gamma\frac{di}{dt}+L_f\frac{di_f}{dt}-M_d\omega\sin\gamma i+R_f i_f=u_f \end{aligned}\right\}. \qquad (12)$$

Приведём систему (12) к каноническому виду и добавим уравнение движения ротора

$$\left.\begin{aligned} \frac{di}{dt}&=\frac{u-R_A i-M_d\omega\sin\gamma i_f}{L_A+\left(u_f+M_d\cos\gamma+M_d\omega\sin\gamma-R_f i_f\right)/L_f} \\ \frac{di_f}{dt}&=\frac{u_f-R_f i_f+M_d\omega\sin\gamma i-\left(M_d\cos\gamma u-M_d\omega\sin\gamma i_f-M_d\cos\gamma R_A i\right)/L_A}{L_f-M_d^2\cos^2\gamma/L_A} \\ \frac{d\omega}{dt}&=\frac{1}{J_{\Sigma TГ}}\left(\frac{P_{АЭР}}{\omega}-\frac{P_{ЭЛ}}{\omega}-\frac{P_M}{\omega}\right) \end{aligned}\right\}, \qquad (13)$$

где $J_{\Sigma TГ}$ – суммарный момент инерции системы из турбины и генератора, кг·м^2;

$\frac{P_{АЭР}}{\omega}$ – аэродинамический момент ветротурбины, Н·м;

$\frac{P_{ЭЛ}}{\omega}$ – электромагнитный момент генератора, Н·м;

$\frac{P_M}{\omega}$ – момент сопротивления на валу, Н·м.

В классических синхронных генераторах используется коллекторно-щеточный аппарат, что приводит к увеличению момента трогания при малой скорости ветра. Система уравнений (13) решена методом Адамса в среде Scilab 6.1.0 для параметров генератора, приведенных к его номинальным параметрам. Самостоятельно, без использования энергии от вертикального ветрогенератора, классический синхронный генератор раскручивается только при скорости ветра около 5 м/с.

Для ветроэлектростаций генераторы целесообразно использовать без контактных колец и щёток, то есть использовать генераторы с бесконтактным электромагнитным возбуждением или на постоянных магнитах.

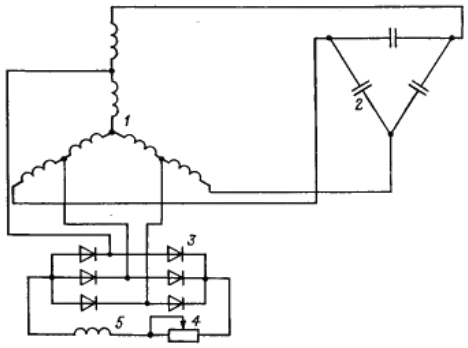
В настоящее время в ветрогенераторах всё чаще используются синхронные генераторы с возбуждением на постоянных неодимовых магнитах (СГПМ). Неодимовые магниты на сегодняшний день являются самыми сильными постоянными магнитами на рынке. Кроме того, в ветрогенераторе очень важно, что не нужно использовать щёточно-коллекторные аппараты. На роторе устанавливаются постоянные неодимовые магниты, которые находятся в постоянной готовности к работе.

Промышленностью выпускаются СГПМ мощностью не более 10 кВт. Поэтому в настоящее время электроснабжение нефтедобывающего комплекса Румайла не может быть реализовано на таких генераторах.

В последнее время началось широкое применение асинхронных генераторов. Асинхронный генератор имеет более простую конструкцию, высокую надёжность и невысокую стоимость. Применение асинхронного генератора в ветроэлектростанциях сдерживалось отсутствием малогабаритных конденсаторов, обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки. С появлением более компактных конденсаторов эти проблемы были сняты.

Генераторы изготавливаются с короткозамкнутыми и фазными роторами. Вращающееся магнитное поле, создаваемое вспомогательной обмоткой статора, индуцирует на роторе магнитное поле, которое вращаясь вместе с ротором, наводит ЭДС в рабочей обмотке статора.

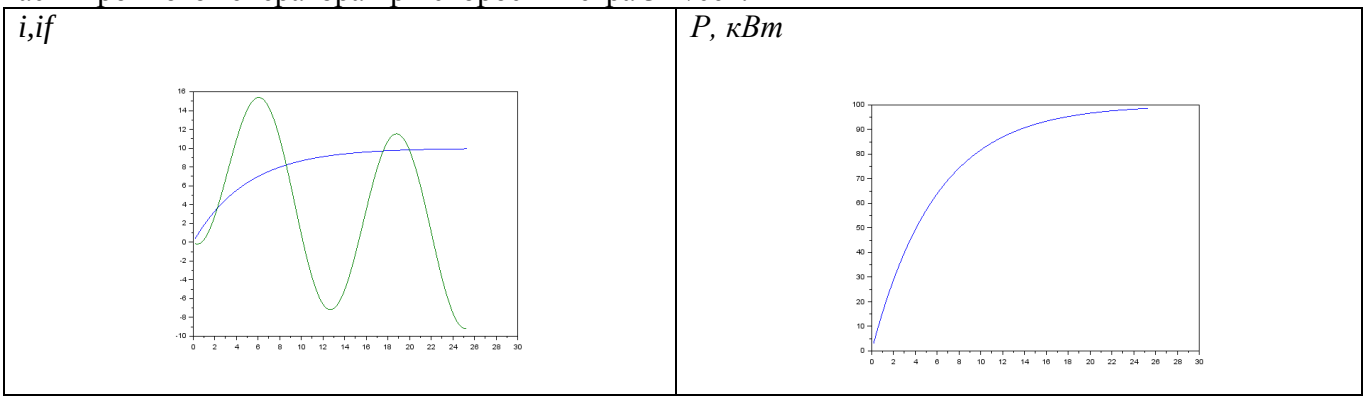
Основным недостатком асинхронного генератора является потребление значительного намагничивающего тока. Для ветроэлектростанции (ВЭС) принято 10 асинхронных генераторов мощностью по 100 кВт типа EG 2025, на каждом из них установлены конденсаторы ёмкостью по 1200 мкФ. Схема замещения асинхронного генератора приведена на рис. 6.



Здесь:
1 – трёхфазная обмотка
2 – шунтирующие конденсаторы
3 – выпрямительный мост
4 – регулировочный реостат
5 – обмотка подмагничивания

Рис.6. Схема асинхронного генератора с подмагничивающей обмоткой

Система уравнений, описывающая переходные процессы в асинхронном генераторе аналогична системе уравнений (13) для классического синхронного генератора и отличается неё только отсутствием уравнения для обмотки возбуждения. На рис.7 приведены кривые разгона асинхронного генератора при скорости ветра 3 м/сек.



а) б)

Рис.7. Кривые разгона асинхронного ветрогенератора: а) токи в обмотке возбуждения и в обобщённой статорной обмотке; б) активная мощность

Необходимо ещё учитывать, что скорость ветра увеличивается с увеличением высоты установки ветротурбины, так если на поверхности земли скорость ветра 3 м/сек, то на высоте 10 м, она равна уже 7 м/сек. Следовательно, эффективность работы ВЭС рассчитана несколько заниженной.

В работе проведен анализ устойчивости работы ВЭС частотным методом Михайлова. Полученное характеристическое уравнение (для двухмашинной системы)

$$0{,}05p^3 + 0{,}38p^2 + 0{,}21p + 0{,}19 = 0$$

и соответствующий ему годограф Михайлова (рис.8) показывают, что система устойчива.

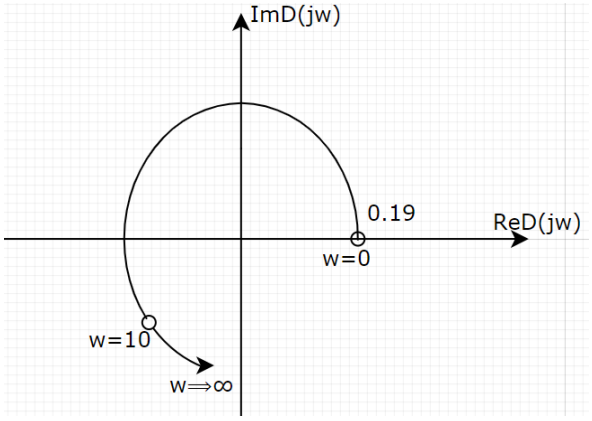


Рис.8. Годограф Михайлова асинхронной машины

В генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением величина намагничивающего тока и, следовательно, величина магнитного потока, зависит от скорости вращения ветрового колеса. Частота вращения ротора машины постоянного тока определяется балансом между крутящим моментом, создаваемым ветром, и тормозным моментом нагрузки.

Существенным недостатком генератора постоянного тока также является наличие коллекторно-щёточного аппарата.

Каноническая форма дифференциальных уравнений генератора постоянного тока с уравнением ротора ветрогенератора имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\psi_{\mathrm{f}}}{dt} &= u - R_f i_f \\ \frac{d\psi}{dt} &= u - \psi_{df(0)} - R_a i_a \\ J_{\Sigma}\frac{d\omega}{dt} &= M_{BT} - M_C \end{aligned}\right\}, \qquad (14)$$

где ψ_{f} – потокосцепление обмотки параллельного возбуждения; ψ – полное потокосцепление обмоток контура якоря идеализированной машины; i_a, i_f – токи, протекающие в обмотках контура якоря и возбуждения; R_a, R_f – сопротивления обмоток контура якоря и возбуждения. В сопротивление R_a входят активные сопротивления шунтовой, компенсирующих обмоток и обмоток добавочных полюсов и якоря; J_{Σ} – суммарный момент ротора ветротурбины и генератора; M_{BT} – приложенный момент ветротурбины; M_C – момент сопротивления.

Система уравнений (14) решена методом Адамса в среде Scilab 6.1.0 для параметров генератора, приведенных к его номинальным. Расчёты показали, что без использования энергии вертикального ветрогенератора генератор постоянного тока раскручивается только при скорости ветра около 5 м/с.

Поэтому асинхронный генератор является единственным, который может работать устойчиво при метеоусловиях Южного Ирака.

В четвёртой главе диссертации разработана методика проектирования, которая подтверждена расчётом электростанций с солнечными батареями, изготовленными с помощью гетероструктурной технологии, работающими в номинальном режиме при солнечной инсоляции менее E=3,2 кВт·ч/сут с использованием устройства для быстрой зарядки аккумуляторных батарей, при больших величинах солнечной инсоляции.

Солнечная энергия становится все более востребованной из-за климатических изменений на планете, и в первую очередь глобального потепления.

Блок-схема солнечной электростанции показана на рис.9.

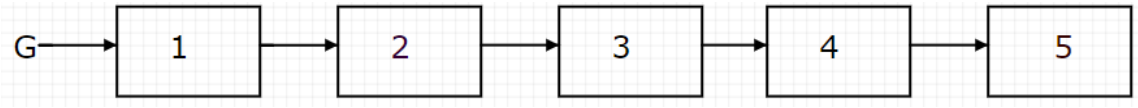


Рис.9. Блок-схема солнечной электростанции

Здесь 1 – приёмник солнечной энергии – солнечная панель, 2 – контролер заряда-разряда аккумуляторных батарей (АКБ), 3 – аккумуляторная батарея, 4 – сетевой инвертор, 5 – повышающий трансформатор.

Проведенное тестирование моно- и поликристаллических и аморфных солнечных элементов (СЭ) позволило сделать вывод о необходимости использовать новые разработки гетероструктурных СЭ.

Гетероструктурные солнечные панели фирмы Hevel – YJT появились на рынке с 2016 года. Их КПД достиг 22%, а рабочий диапазон температур –40°C...+40°C (2019 год). Гетероструктурная технология представляет собой гибрид кристаллического и тонкоплёночного типов кремниевых солнечных элементов. В результате такой комбинации удалось объединить основные достоинства кристаллических и тонкоплёночных аморфных модулей (рис.10).

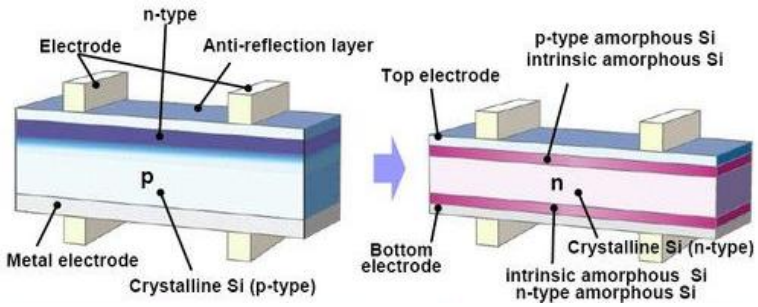


Рис. 10. Строение гетероструктурного солнечного элемента

Ключевая особенность HIT-технологии в нанесении легированных слоёв аморфного кремния с положительными носителями зарядов (*p*) на пластину кристаллического кремния с отрицательными носителями зарядов (*n*); при этом снижается количество рекомбинационных центров на поверхности кристалла и увеличивается продолжительность жизни зарядов, и, как следствие, повышается КПД преобразования солнечной энергии в электрическую, так как именно снижение количество зарядов уменьшает КПД традиционных солнечных элементов.

Преимущества гетероструктурных солнечных элементов:

- более высокий КПД, чем кристаллических и тонкоплёночных аморфных модулей в отдельности;
- более высокий КПД и более низкий температурный коэффициент мощности при повышенных температурах;
- лучшее использование энергии рассеянного света солнечным элементом;
- низкая деградация электрических свойств солнечных панелей с течением времени;
- более плотная компоновка комплектующих позволяет уменьшить площадь панелей без снижения их мощности, и, соответственно, СЭС в целом.

Указанные преимущества позволяют более эффективно использовать СЭС на территории пустынь Южного Ирака, где имеет место высокая температура и запылённость.

Используя значение инсоляции за выбранный период времени и количество общей потребляемой энергии, рассчитана суммарная мощность солнечных панелей

$$W = \frac{kEP_{НОМ}}{1000} = \frac{0{,}7 \cdot 5{,}6 \cdot 1000000}{1000} = 3920 \approx 4000 Вт,$$

где Е – значение инсоляции за выбранный период; k – коэффициент, равный 0,7 в летний период времени. Для электростанции выбрано 20 солнечных батарей Hevel-200.

Солнечная батарея Hevel-200 состоит из гетероструктурных компонент. Панель покрыта закалённым осветлённым стеклом с антибликовой поверхностью, выдерживает удар стального шара массой 227 г, падающего с высоты 1 м, давление снега в 5400 Па и ветра, скоростью до 60м/с. Рамка панели сделана из анодированного алюминиевого сплава. Панель может работать в температурном диапазоне от –40°С...+40°С.

Аккумуляторная батарея СЭС с ёмкостью $C_{НОМ}$ набирается из отдельных аккумуляторных батарей путём последовательного и параллельного их соединения. Энергоёмкость аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции вычисляется из выражения

$$\mathrm{W} = C_{НОМ} U_{НОМ}.$$

Число последовательно включённых одиночных аккумуляторных батарей в ветви:

$$\mathrm{n} = \frac{U_{НОМ}}{U_{АБ}} = \frac{380}{48} \approx 8,$$

где $U_{АБ}$ – напряжение отдельной аккумуляторной батареи.

Число параллельных ветвей в аккумуляторной батарее АСЭ

$$m = \frac{C_{НОМ}}{C_{АБ}} = \frac{32895}{1000} \approx 33,$$

где $C_{АБ}$ – ёмкость отдельной аккумуляторной батареи.

Тогда общее число отдельных аккумуляторных батарей в аккумуляторной батарее АСЭ

$$N = n \cdot m = 8 \cdot 33 = 264 шт.$$

В электростанции будет использоваться 264 аккумулятора ChallengerA48-1000, соединённых параллельно в 33 ветви, а в каждой ветви по 8 АКБ.

Фирмы-изготовители АКБ задают параметры зарядного тока. Однако на территории Южного Ирака из-за частых песчаных бурь освещённость солнечных панелей бывает часто недостаточна, поэтому необходимо в полной мере использовать время максимальной солнечной инсоляции. В диссертации предложено техническое решение, обеспечивающее ускорение процесса заряда аккумулятора без его перегрева и снижения эксплуатационных характеристик.

В предлагаемом устройстве при необходимости (глубокий разряд аккумулятора) производится предварительный заряд аккумулятора с помощью регулируемого выпрямителя током величиной 0,1 С (С – ёмкость аккумулятора А·час). При достижении заданного уровня напряжения на клеммах аккумулятора в выпрямителе производится переключение и далее производится заряд током 1,0 С. Если разряд аккумулятора не достиг критического значения, то заряд начинается током 10 С. Процессе заряда контролируется температура аккумулятора и её приращение. При достижении порогового уровня, если аккумулятор не набрал ещё необходимую ёмкость, происходит переключение выпрямителя на заряд током 0,1 С и включение формирователя двухполярных прямоугольных импульсов. Для достижения максимального эффекта частота импульсов задаётся в соответствии с частотной характеристикой аккумулятора. Минимум сопротивления аккумулятора имеет место на частоте порядка 800...1000 Гц. Благодаря импульсам интенсифицируются электрохимические процессы, что улучшает доступ электролита к активной массе электродов и прекращается рост температуры.

Схема предложенного устройства представлена на рис.11.

Рассмотрим работу предложенного устройства. Если напряжение на клеммах заряжаемого аккумулятора 6 соответствует глубокому разряду, то с помощью датчика напряжения 5 и порогового элемента 3 регулируемый выпрямитель 2 подаётся команду установить ток заряда, равный 0,1 С. Таким током заряд осуществляется до тех пор, пока напряжение на его клеммах не достигнет заданного значения в зависимости от типа аккумулятора. При этом с помощью

датчика напряжения 5 и порогового элемента 3 на выпрямитель 2 подаётся команда на установление тока заряда равного 10 С. Таким током заряд аккумулятора осуществляется до значения ёмкости 0,8 С, рекомендуемой инструкцией по эксплуатации.

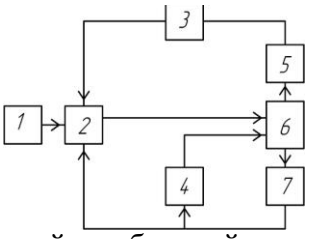


Рис.11. Схема устройства быстрой зарядки АКБ

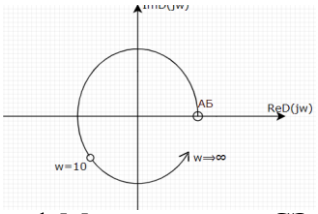


Рис.12 Годограф Михайлова для СЭС

Здесь: 1 – трансформатор, 2 – регулируемый выпрямитель, 3 – пороговый элемент, 4 – формирователь прямоугольных импульсов, 5 – датчик напряжения, 6 – заряжаемый аккумулятор, 7 – датчик температуры. Частота прямоугольных импульсов выбирается пределах 800...1000 Гц в зависимости от вида кривой частотной характеристики АКБ.

Если же раньше температура аккумулятора достигнет допустимого значения, как правило, 50°С, то с помощью датчика температуры 7 подаётся команда на подключение формирователя прямоугольных импульсов 4 и снижения зарядного тока до 0,1 С. При снижении температуры аккумулятора при необходимости зарядный ток может быть повышен до 10 С.

Таким образом, предложенное устройство позволяет существенно приблизить процесс автоматической зарядки аккумулятора к требованиям инструкции по его эксплуатации, а поэтому выполнять эту зарядку более быстро не снижая срока его службы. Работа устройства согласована с работой контролера заряда-разряда.

Для электростанции принят контроллер заряда-разряда АКБ StuderVario TrackMPPT . Его характеристики: напряжение в системе 48 В, зарядный ток 60 А, максимальная мощность модулей 1000/2000/ 4000 Вт, собственное потребление 25 мА.

Инвертор является одним из ключевых приборов, в солнечной электростанции. Инвертор выбирается по увеличенной на 30% суммарной мощности всей нагрузки. Благодаря этому, инвертор позволит включать электродвигатели, потребляющие пусковую мощность в 2-3 раза превышающую их номинальную (паспортную).

В данной системе мы имеем потребляемую мощность порядка 1000 кВт, увеличением её на 30%, мы получим минимальную мощность нужного нам инвертора – 1300 кВт. В связи с тем, что заряд АКБ постоянного меняется необходимо выбрать умный инвертор, в которо напряжение на выходных зажимах постоянное. Выбран инвертор Stark Country 3000INV.

Инвертор StarkCountry3000INV – многофункциональный комплекс, включающий инвертор, зарядное устройство и контроллер для подключения солнечных панелей. Инвертор StarkCountry3000INV оснащён панелью управления с дисплеем, отображающим основные параметры устройства, как в режиме настройки, так и при повседневной эксплуатации.

В работе получены передаточные функции всех элементов СЭС и исследована её устойчивость её работы с помощью частотного метода Михайлова. Годограф Михайлова приведен на рис.12, и показывает, что СЭС работает устойчиво.

Для повышения надёжности электроснабжения целесообразно на территории Южного Ирака использовать гибридные ветросолнечные электростанции, так как в этом регионе небольшие скорости ветров и низкая солнечная инсоляция. ВЭС и СЭС как бы дополняют друг друга, так в ночное время, когда отсутствует солнечная инсоляции скорость ветра, как правило, возрастает.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе работы над диссертацией автором решены следующие вопросы.

1. Разработка методики проектирования автономных цифровизованных кратчайших электрических сетей:

1.1. Используя предложенные автором принципы, сформирована кратчайшая автономная электрическая сеть, суммарная длина линий которой на 15% меньше по сравнению с сетью, построенной в виде дерева Штейнера и на 18% меньше расходы на материал проводов.

1.2. Получено выражение для нахождения географических координат центра сети для источника питания, обеспечивающее на 20% снижение потерь передачи энергии по сравнению с источником питания, географические координаты. которого определённы по методу моментов для центра нагрузок.

1.3. Разработан алгоритм управления цифровизованной сетью автономной системы электроснабжения, позволивший на 17 % снизить потери транспорта электроэнергии.

1.4. Построенная кратчайшая цифровизованная сеть имеет большие запасы статической и динамической устойчивости и более высокую надёжность работы по сравнению с сетью в виде дерева Штейнера.

2. Разработка методики проектирования автономных ветроэлектростанций, работающих в номинальном режиме при скорости ветра в Южном Ираке менее 5 м/сек:

2.1. Произведён выбор ветротубины и предложена её математическая модель; рассчитана кривая разгона турбины для низкоскоростных ветров, характерных для Южного Ирака.

2.2. Проведенный математический эксперимент показал, что запас статической устойчивости исследуемой системы тем больше, чем ближе правая часть спирали годографа Михайлова расположена к началу координат.

2.3. Произведён расчёт статической устойчивости автономной системы электроснабжения электродвигателей погружных насосов с источником питания в виде синхронного генератора и установлено, что система обладает достаточным запасом статической устойчивости.

2.4. Сформулировано условие самовозбуждения генератора постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения в зависимости от кривой разгона.

2.5. Произведён расчёт статической устойчивости автономной системы электроснабжения электродвигателей погружных центробежных насосов с генератором постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения в качестве источника питания и установлено, что эта система обладает достаточным запасом статической устойчивости.

2.6. Для повышения надёжности электроснабжения предложено ветропарк источника питания оснастить горизонтальными более мощными турбинами, которые способны снабжать энергией электроприёмники большой мощности, кроме одной, которую выбрать вертикальной, имеющую меньший момент трогания, и способную работать, начиная с меньших скоростей ветра. Напряжение от ветрогенератоа с вертикальной турбиной подаётся на зажимы ветрогенераторов с горизонтальной турбиной способствуя их раскрутке.

3. Разработка методики проектирования автономных солнечных электростанций, работающих в номинальном режиме при солнечной инсоляции около E=3,0 кВт·ч/сут:

3.1. Спроектирована солнечная электростанция для низкой инсоляции, солнца характерной для Южного Ирака, обеспечивающая номинальные режимы работы вовремя светового дня.

3.2. Предложено устройство для быстрого заряда аккумуляторных батарей во время максимальной солнечной инсоляции, обеспечивающее сохранение его характеристик в течение всего периода эксплуатации.

3.3. Произведён анализ работы солнечной электростанции частотным методом Михайлова, в результате которого, установлено, что электростанция является статически устойчивой при любых инсоляциях солнца.

3.4. Для более надёжного электроснабжения целесообразно использовать гибридные ветросолнечные электростанции.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованные в ВАК

1. Хлебников В.К., Цыгулев Н.И., Смагин К.А., **Аль-шех салих М.А**. Повышение надежности электроснабжения и снижение потерь транспорта энергии в цифровизованных распределительных электрических сетях. // Энергосбережение и Водоподготовка. – 2020. № 5(127). С.1-4.

2. Хлебников В.К., Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М. А.** , Смагин К. А., Галстян Р.А., Жировов Д.М. Аль-шех Салих М. А. Алгоритмы автоматизированного управления интеллектуально электрической сетью. //Известия высших учебных заведений Электромеханика.-2020.

Публикации в международных конференциях IEEE в базе данных Scopus

3. **Al-shekh Salih M.A.** Enabling conditions and further development for the use of solar energy the power supply system of buildings (case study - Iraq) International Conference on developments in esystem engineering, Liverpool, British.-2020

4. Ahmed A. A. , **Al-shekh Salih M.A.** Technical and architectural options for installing solar energy systems on modern building facades. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Russia, Belgorod -2020.

Публикация в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций:

5. Хлебников В.К., Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** , Галстян Р. А., Жировов Д.М., Смагин К.А. Алгоритм управления цифровизованной распределительной электрической сетью по критерию минимума потерь транспорта энергии. // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XLII сессии Всерос.науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудовани» . – 2020 г.

6. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Перспективы и возможности применения солнечной энергии для функционирования системы электроснабжения зданий (на примере в Средней Азии, Ираке). // Вестник Академия наук Чеченской Республики.-2020

7. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Концепция автономной системы энергоснабжения с учетом Возобновляемые источники энергии. Региональная научно-техническая конференция по тематике «Студенческая весна 2020 г.» 125с.

8. Tsygulyov N.I., **Alshekh Salih M.A.** The main role of solar energy in the integration of solar and wind energy. Вестник Академия наук Чеченской Республики.-2020.С. 83-88.

9. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Измерение крутящего момента в ветряных турбинах - актуальным сегодня, как это было в прошлом. «ИЭС» ко дню Энергетика».-2019. 44с.

10. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Преобразователь полной мощности ветротурбины с синхронным генератором на постоянных магнитах. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XLI сессии Всерос.науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудовани» . – 2019 г.

11. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Описание имитационных моделей ветротурбин. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XLI сессии Всерос.науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудовани» . – 2019 г.

12. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Бородина Д.П. Проектирование системы электроснабжения нефтедобывающих скважин для условий жаркой пустыни. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XLI сессии Всерос.науч. семинара по тематике «Диагностика энергооборудовани» . – 2019 г.

13. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Моделирование взаимодействия ветроэлектростанции и энергосистемы. Вестник Академия наук Чеченской Республики.-2019.

14. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Модель устойчивости энергосистемы асинхронного генератора с двойным питаниемветротурбины. «Научно-техническое обеспечение АПК юга России».-2019. С.41-45.

15. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Моделирование взаимодействия ветроэлектростанции и энергосистемы«Научно-техническое обеспечение АПК юга России».-2019. С.45-49.

16. Цыгулев Н.И., **Аль-шех Салих М.А.** Стабильность напряжения ветропарков и сходства с крупными промышленными системами. «Актуальные проблемы науки и техники 2019».-2019.С.34-37.

17. Александров Д.С. **Аль-шех Салих М.А.** Способы определения динамической устойчивости синхронных двигатели. Вузовская наука в современных условиях сб. материалов 51-й науч-техн.конф. /УлГТУ - Ульяновск , 2017.- С.18-22

18. **Ahmed M.A.**, Tsygulyov N.I., Khlebnikov V.K., Shelest V.A. ANALYSIS OF DAMAGES OF THE WIND FARMS . Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 106-108.

19. **Ahmed M.A.,** Tsygulyov N.I., Babina L.V. ENERGY RESOURCES OF IRAQ'S SOLAR ENERGY. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 108-111.

20. **Ahmed M.A.,** Tsygulyov N.I., Babina L.V., Shelest V.A., Khlebnikov V.K. MATHEMATICAL MODEL OF SOLAR RADIATION. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 111-114.

21. **Ahmed M.A.,** Tsygulyov N.I., Babina L.V., Khlebnikov V.K., Shelest V.A. MATHEMATICAL MODEL OF WIND TURBINE. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 111-114.

22. **Ahmed M.A.,** Tsygulyov N.I., Babina L.V. THE WIND ENERGY RESOURCES OF IRAQ. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 114-116.

23. **Ahmed M.A.,** Tsygulyov N.I., Shelest V.A., Khlebnikov V.K., Prous V.R., Ganshina M.O. ANALYSIS OF DAMAGE OF THE SOLAR POWER PLANTS. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 116-119.

24. **Ахмед М.А.,** Цыгулёв Н.И., Бабина Л.В., Хлебников В.К., Шелест В.А. Математическая модель ветротурбины. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 48-51.

25. Бабина Л.В., Цыгулёв Н.И., **Ахмед М.А.** Анализ состояния ветроэнергетики в мире. Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение»,-2017. С. 51-57.

26. Бабина Л.В., **Ахмед М.А.** Анализ состояния и перспективы развития ветроэнергетики в России. // Архитектура и искусство: от теории к практике.-2018. С. 17-18.

27. Tsygulev N.I., **Al-shekh Salih M. A.** Design and Definition of Off-grid Solar Power Systems in Iraq.Вестник Академия наук Чеченской Республики.-2020

28. N.I. Tsygulev, V.K. Khlebnikov, V.A. Shelest, **M.A. AL-shekh salih.** Digital autonomous power supply system for electric motors of submersible pumps for oil production wells. Вестник Академия наук Чеченской Республики.-2020

29. Khlebnikov V.K., Tsygulev N.I., Smagin K. A., **Al-shekh Salih M. A.** Reducing energy transportation losses in digital power supplies. Вестник Академия наук Чеченской Республики.- 2020.