

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого**

Рамадан Амер

**Обоснование параметров систем энергоснабжения на основе ВИЭ
для условий Сирии**

Направление подготовки: 14.06.01 «Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и
сопутствующие технологии»

Код и наименование

Направленность: 14.06.01_02 (05.14.08) «Энергоустановки на основе возобновляемых
видов энергии»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель: Елистратов Виктор Васильевич

Доктор технических наук, профессор, заместитель директора Инженерно-строительного института по научной деятельности, профессор высшей школы «гидротехническое и энергетическое строительство» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с постоянным ростом энергозатрат, повышением стоимости и дефицитом органического топлива, и отрицательным влиянием на окружающую среду и здоровье человека традиционных тепловых электростанций, в последние годы значительно вырос интерес к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Наблюдается значительный рост производств электрической энергии от ВИЭ в мире, как в развитых, так и в развивающихся странах. В 2018 году доля энергии, произведенной из ВИЭ, составила 6586,1 ТВт·ч или 25% от общей выработки электроэнергии в мире. За последние десять лет ежегодный прирост выработки составляет около 5,7%. В 2019 году мировая установленная мощность ветроэлектрических станциях (ВЭС) составляла 622,4 ГВт при 15,3% годового роста, а мировая установленная мощность солнечных фотоэлектрических станциях (СФЭС) составляла 578,6 ГВт при 33,3% годового роста. В 2018 году мировое производство электроэнергии на ВЭС составило 1262,9 ТВт·ч при 17,7% годового роста, а мировое производство электроэнергии на СФЭС составляло 549,9 ТВт·ч при 38,3% годового роста. Такие объемы и темпы роста использования ВИЭ связаны с экологичностью технологий ВИЭ и отсутствием затрат на добычу возобновляемых энергоресурсов.

В Сирии в силу географических условий существует высокий потенциал ресурсов возобновляемой энергии, прежде всего гидравлической, солнечной и ветровой энергии. При этом гидроэнергия занимает значительное место в электроэнергетике, мощность ГЭС составляет 1493 МВт (15% от общей мощности) а производство электроэнергии 2604 ГВт·ч (6% от общего). Ветровая и солнечная энергетика пока не имеют существенного развития. Однако учитывая значительный потенциал, за счет систем энергоснабжения на базе данных возобновляемых источников энергии может быть существенно увеличена энергетическая независимость и развитие экономики страны.

Поэтому актуальными задачами для обеспечения развития ветровой и солнечной энергетике страны являются:

- Проведение современных оценок валового и особенно технического потенциала ветровой и солнечной энергии территории страны с определением регионов, перспективных для использования энергии ветра и солнца.
- Проведение анализа рынка ветроэлектрических (ВЭУ) и фотоэлектрические (СФЭУ) установок, их состава и параметров оборудования на основе моделирования режимов работы с учетом прихода ресурсов и отбор наиболее перспективных технологий и типов установок для Сирии.
- Разработка инженерных методик обоснования технических и экономических параметров ВЭС и СФЭС, подключённых к электрической сети, на перспективных площадках территории Сирии.

Целью работы является разработка методики обоснования технико-экономических параметров сетевых ветровых и солнечных фотоэлектрических станций на перспективных площадках территории Сирии на основе выполненных оценок технического потенциала ветровой и солнечной энергии и моделирования режимов работы электроэнергетического оборудования.

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

- Выполнена оценка состояния энергетике Сирии с используемых традиционные и возобновляемые источники энергии.
- На основе современных информационных технологий разработана методика определения природного и технического потенциала ветровой энергии, адаптированная для территории Сирии.
- На основе актуальных баз данных солнечной радиации разработана методика определения природного и технического потенциала солнечной энергии территории Сирии на горизонтальную поверхность и на оптимальные наклонные площадки с выбором оптимальных углов наклона солнечных батарей.

- Определены валовый и технический потенциалы ветровой и солнечной энергии и созданы атласы солнечных и ветровых ресурсов Сирии, позволяющие выполнить районирование и выявить перспективные районы для создания ВЭС и СФЭС.
- Выполнены анализ и классификация программного обеспечения для расчета параметров и режимов работы установок ВИЭ и рекомендован в качестве базового ПО MATLAB.
- В среде MATLAB разработаны:
 - a) модели оборудования сетевой ВЭУ с различными типами генераторов.
 - b) модели оборудования сетевой СФЭС, в том числе фотоэлектрической батареи (ФЭБ), трехфазного инвертора, системы управления, выдачи энергии в сеть.
- Выполнено моделирование режимов работы ВЭУ и СФЭС с различным составом оборудования и с изменяемыми ресурсными характеристиками ветровой и солнечной энергии и определены типы ВЭУ и ФЭБ, перспективные для условий Сирии.
- Разработана методика и выполнены расчеты для сетевой ветроэлектрической станции на перспективной площадке близ города Эс-Сухне в провинции Хомс с использованием ПО WindPRO и Excel.
- Разработана методика и выполнены расчеты для обоснования параметров сетевой фотоэлектрической станции около деревни Умм-эль-Зайтун в провинции Эс-Сувайда с использованием ПО PV Syst и Excel.

Представление научного доклада: основные положения:

1. Методики на основе электронных ресурсов для оценки валовых и технических ресурсов ветровой энергии территории Сирии.
2. Методика определения природного и технического потенциала солнечной энергии на оптимальные наклонные площадки территории Сирии с выбором оптимальных углов наклона солнечных батарей.
3. Методика моделирования режимов работы и модели оборудования сетевой ВЭУ с различными видами генераторов и сетевой СФЭС в среде MATLAB.
4. Методики обоснования параметров ВЭС и СФЭС для условий Сирии.

Методы исследования. Решение поставленных в работе задач осуществлялось на основе использования апробированных методов математического моделирования системного анализа и решение многомерных нелинейных задач в области возобновляемой энергетики.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы оценки потенциала ресурсов ВИЭ, разработки методики для моделирования режимов работы системы энергоснабжения на основе ВИЭ и обоснования их параметров рассмотрены в работах многих отечественных и зарубежных ученых. В них сформированы общие принципы и критерии оптимизации состава и параметров оборудования на основе ВИЭ и представлены различные подходы к решению данных задач в зависимости от поставленных условий и ожидаемых результатов. Методики оценки валового и технического потенциала ветровой и солнечной ресурсов территории Сирии, разработка методик для моделирования режимов работы системы энергоснабжения на их основе и обоснования их технических и экономических параметров для условий Сирии в настоящее время отсутствует.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Впервые на основе электронного ресурса Global Wind Atlas по оригинальной методике оценены валовые и технические ресурсы ветровой энергии для территории Сирии и создан атлас для экспресса оценки перспективного района строительства ВЭС.
2. На основе электронных ресурсов (Solar Atlas for the Mediterranean и базы метеоданных NASA) разработаны методики оценки природного и технического потенциала солнечной энергии на горизонтальную поверхность и на оптимальные наклонные площадки с выбором оптимальных углов наклона солнечных батарей и созданы атласы ресурсов солнечной энергии.

3. Впервые разработаны в среде MATLAB адекватные и достоверные модели аэродинамического ветроколеса с Pitch контролем и адаптированные модели электроэнергетического оборудования, по которым выполнены расчеты сетевой ВЭУ с различными типами генераторов, проведены расчеты их параметров и режимов работы.

4. Разработана в среде MATLAB адекватная и достоверная модель солнечной батареи и оборудование сетевой СФЭС и выполнены расчеты режимов ее работы.

5. Разработана инженерная методика оценки энергетической, экологической и экономической эффективности строительства ВЭС и СФЭС в Сирии.

Достоверность результатов исследований, теоретических и методических обоснований, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в разработках научно-обоснованных и проверенных методов различных научных дисциплин, корректным применением адекватного математического аппарата.

Практическая значимость. Результаты диссертационного исследования позволили выполнить оценки природного и технического потенциала ветровой и солнечной энергии на территории Сирии и выявлять эффективные территории для внедрения объектов ВИЭ. Созданные модели ВЭУ и СФЭС в среде MATLAB обеспечили достоверное моделирование режимов работы энергетического оборудования, рекомендуемого для условий Сирии. Разработана инженерная методика оценки энергетической, экологической и экономической эффективности строительства ВЭС и СФЭС в Сирии.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом самостоятельных исследований автора. Все научные положения и результаты, определяющие научную новизну и практическую ценность работы, получены соискателем лично. Личное участие автора подтверждено публикациями и выступлениями на научно-технических конференциях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях:

1. Научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ», г. Санкт-Петербург, 01-06 декабря 2014 г.

2. Научном форме с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 30 ноября-05 декабря 2015 г.

3. Конференция «Политехническая неделя в Санкт-Петербурге», Санкт-Петербург, 14-20 ноября 2016 г.

4. V-ой международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», г. Махачкала, 23-26 октября 2017 г.

5. Научном форме с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 г.

6. Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018», г. Севастополь, 24-27 сентября 2018 г.

Исследования выполнены в научно-образовательном центре «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбПУ.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 16 печатных работах, которые в полной мере отражают материалы диссертационных исследований, в том числе в 7 статьях в научных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ, в 2 статьи в изданиях, входящем в международные наукометрические базы Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 183 страниц текста, содержит 123 рисунка, 48 таблиц и список использованных источников информации из 136 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, определены цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение, сформулированы выносимые на защиту положения, приведена апробация полученных результатов.

В первой главе анализируется состояние энергетики Сирии, в том числе нефтегазовой сектор, электроэнергетический сектор. Также анализируется состояние и прогнозы развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В 2010 г. первичное потребление энергии в Сирии оценивалось 21,7 миллион тонн нефтяного эквивалента (млн. т н. э.), а производство – 27,7 млн. т н.э.. Производство энергоресурсов представлено почти исключительно нефтью (73,0%) и природным газом (26,2%). Потребление первичных источников энергии (ПИЭ) также почти полностью состоит из нефтепродуктов (63,0%) и природного газа (35,8%). Доказанные запасы газа в Сирии невелики – 0,2-0,3 трлн. куб. м, что составляет всего около 0,15% от мировых. Доказанные запасы нефти в Сирии находятся на уровне 0,3-0,4 млрд. т, что составляет не более 0,2% от общемировых запасов. Добыча нефти в 2010 г была на уровне 370 тыс. барр./день. Сектор электроэнергетики является крупнейшим потребителем первичной энергии (39,1%). Производство, передача и распределение электроэнергии в Сирии до сих пор осуществляются государством. Повышенный спрос привёл к увеличению производства электроэнергии от 10217 ГВт·ч в 1990 г. до 46413 ГВт·ч в 2010 г. при 6,7% годового прироста. Из 46413 ГВт·ч в 2010 г. 43809 ГВт·ч выработано на ТЭС (94%) и 2604 ГВт·ч на ГЭС (6%). В 1994 – 2009 гг. пиковая нагрузка национальной энергосистемы выросла с 2474 до 7200 МВт (средний рост 8,2%). Чтобы справиться с её увеличением, установленная мощность была повышена с 4000 до 7500 МВт. В 2018 г. установленная мощность составила 9982 МВт, в том числе на ТЭС – 8489 МВт (85%) и на ГЭС – 1493 МВт (15%). В Сирии существуют три типа тепловых электростанций общей установленной мощностью 8489 МВт. В их числе 8 газотурбинных мощностью 934 МВт (11%), 7 паротурбинных мощностью 3515 МВт (41,4%) и 7 парогазовых мощностью 4040 МВт (47,6%). Топливом на одной из газотурбинных ТЭС являются природный газ (ПГ) и мазут, на четырёх – ПГ, на трёх остальных – дизельное топливо; на пяти паротурбинных ТЭС топливо – ПГ и мазут, ещё на двух – мазут; на двух парогазовой ТЭС используются ПГ и мазут, на остальных пяти – ПГ. Электроэнергия на душу населения приехали около 1100 кВт·ч в 1995 году и до 2232 кВт·ч в 2010 году. Бытовой сектор является крупнейшим потребителем электрической энергии (52%). В Сирии имеется высокий потенциал ресурсов возобновляемой энергии, в частности солнечной и ветровой. Энергоснабжение на базе возобновляемых источников энергии может обеспечить энергетическую независимость страны. Поэтому анализ климатогеографических условий Сирии и оценка ресурсов ВИЭ для всей её территории актуальны для развития энергетики страны. Согласно солнечному атласу Сирии, выпущенному центром Syrian Scientific Studies and Research Center (SSRC) в 1994 г, средний поток солнечной энергии на горизонтальную поверхность в Сирии составляет около 5 кВт·ч/м² в день и число часов солнечного сияния изменяется от 2820 до 3270 ч. Первая сетевая солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) в Сирии мощностью 1,26 МВт была установлена в 2017 году в городе Аль-кисва в пригороде Дамаска. В настоящее время в Сирии Обсуждаются проекты строительства нескольких сетевых СФЭС.

Сотрудничество между сирийским государством и национальной датской лабораторией "RISO" позволило в 1999 г. выпустить атлас ветров Сирии, который содержит информацию о скорости ветра за период 1965-1993 гг., взятых с 49 станций метеонаблюдений на территории Сирии. Атлас ветра позволил подготовить карту ветров Сирии (рисунок 1), в которой страна разделена на четыре ветровые зоны, характеризующиеся соответствующими значениями скоростей ветра и типов подстилающей поверхности. Зона, показанная на карте красным цветом, имеет наиболее высокий потенциал и среднегодовые скорости ветра (5-11,5 м/с для различных типов рельефа). Эта зона включает местности в центральном, юго-западном, юго-восточном и прибрежном горном районах Сирии. Остальные территории

имеют меньший потенциал ветровой энергии, т.к. характеризуются меньшими значениями средних скоростей ветра.

В период (2004-2006 гг.) в сотрудничестве с немецкой компанией "DECON" были выявлены 14 перспективных площадок (см. на рисунке 1 точки, отмеченные звездочками) с высоким потенциалом ветровой энергии, на них были установлены станции ветроизмерений и проведен мониторинг ветрового режима в период 2004-2009 гг.

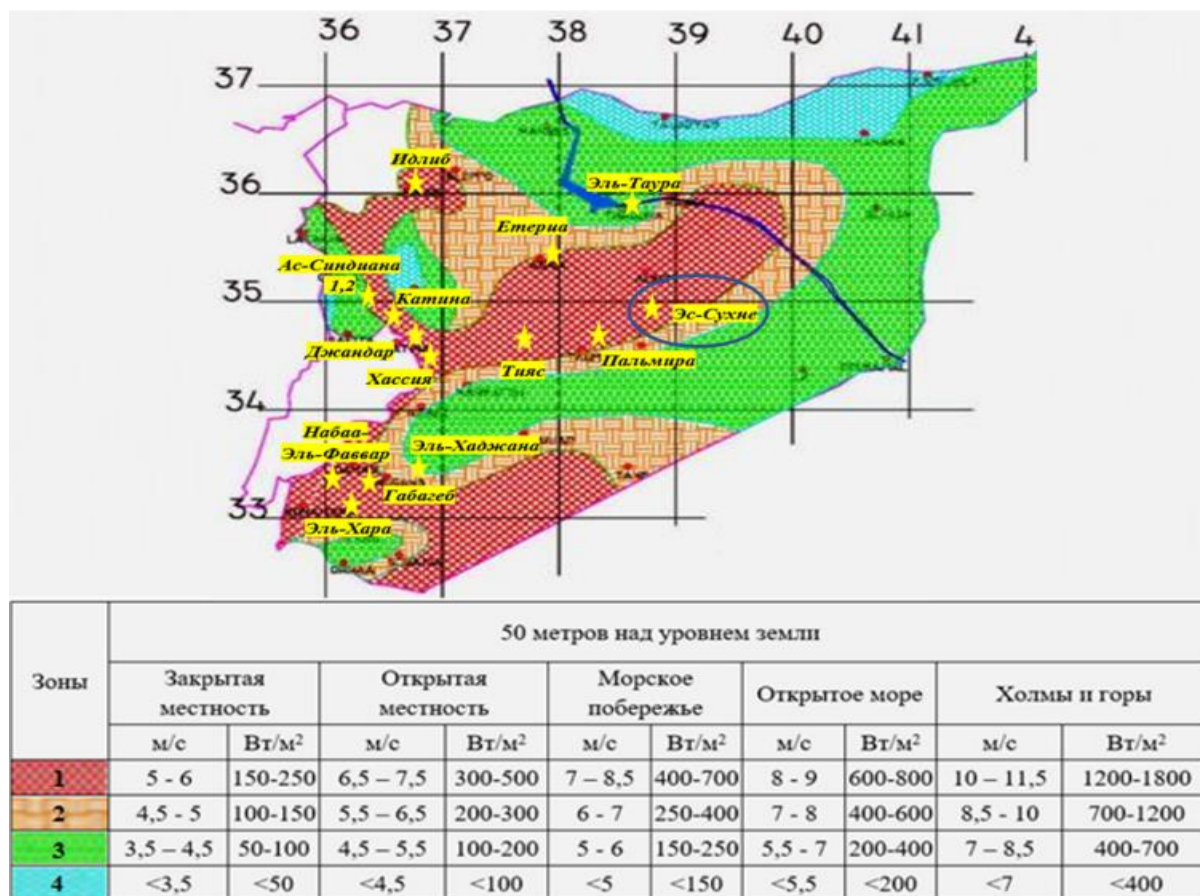


Рисунок 1 – Карта ветров Сирии с перспективными ветровыми площадками

Первая сетевая ветроэлектрической установки (ВЭУ) мегаваттного класса мощностью 2,5 МВт, установленной в 2019 г. в западном пригороде провинции Хомс около деревни Ас-Синдиана. В Сирии существуют в настоящее время планы развития ветровой энергетики с повышением её доли в производстве электроэнергии. Оценка гидроэнергетических ресурсов показала, что сирийские гидроэнергетические ресурсы ограничены низким количеством осадков и стоком из международных рек. Большая часть гидроэнергетических ресурсов были использованы, и нет больших возможностей для использования малой, средней или большой гидроэнергии. ГЭС Эль-Таура (880 МВт) и ГЭС Тишрин (630 МВт) являются наибольшими ГЭС Сирии, обе на реке Эль-Фурат.

В области оценки ресурсов ВИЭ и внедрением технологий на их основе занимались Безруких П.П., Бобыль А.В., Борисенко М.М., Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Масликов В.И., Николаев В.Г., Сидоренко Г.И., Стадник В.В., Федоров М.П., Велькин В.И., Копылов А. Е., Кудряшева И. Г., Hamzeh A., Kordab M., Al-Mohamad A. и др.

Во второй главе на основе электронного ресурса Global Wind Atlas и программы Google Earth разработана методика для создания атласа и оценки валовых и технических ресурсов ветровой энергии для всей территории Сирии. Методика разделена на три этапа: 1. Формирование исходных данных, 2. Районирование территории, 3. Расчет энергетического потенциала. В качестве исходных данных использовала карта удельной мощности

ветрового потока Вт/м^2 для территории Сирии на высоте 50 м, взятая из электронного ресурса Global Wind Atlas является исходные данные. Global Wind Atlas предоставляет данные о ветровых ресурсах любой территории мира с разрешением (1 км x 1 км).

Зонирование территории Сирии было выполнено по средним значениям удельной мощности ветрового потока $N_{\text{ср.}i}$, Вт/м^2 на высоте 50 м,

$$N_{\text{ср.}i} = \frac{1}{2} * \rho * \beta^3 * \Gamma\left(1 + \frac{3}{\gamma}\right) \quad (1)$$

где: β , γ – параметры распределения Вэйбулла; Γ – гамма-функция. ρ – плотность воздуха (кг/м^3).

Карта удельной мощности ветрового потока была интегрирована в программу Google Earth и был выделено семь зон по средним значениям удельной плотности (рисунок 2). Инструменты программы Google Earth использовались также для расчета площади каждой зоны S_i .

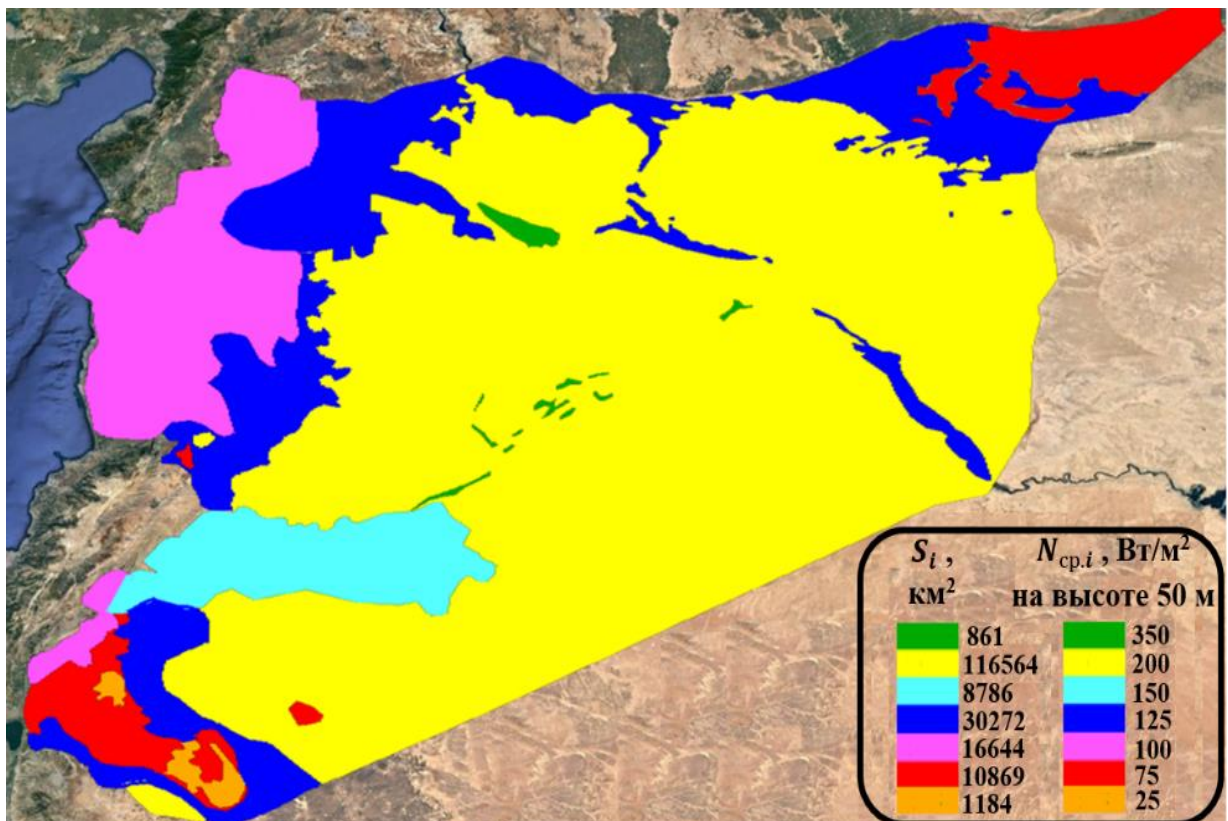


Рисунок 2 – Зонирование территории Сирии по средней удельной мощности ветрового потока на высоте 50 м ($N_{\text{ср.}i}$, Вт/м^2) и определение площади S_i каждой зоны

Общий валовый потенциал ветровой энергии ($\mathcal{E}_{\text{сум.в.}}^{\text{вэ}}$, ТВт·ч/год) территории Сирии на высоте 50 м определен по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{сум.в.}}^{\text{вэ}} = \sum \mathcal{E}_{i.в} = \sum N_{\text{ср.}i} * \frac{S_i}{20} * 8760 \quad (2)$$

где: $\mathcal{E}_{i.в}$ – валовый (природный) потенциал ветровой энергии каждой зоны; i – номер зоны.

Для расчета технического потенциала ветровой энергии на высоте 50м территории Сирии учтены следующие допущения: расстояние между ВЭУ принято равным 10-ти диаметрам ветроколеса; принимается общий коэффициент полезного действия (КПД) ВЭУ ($\eta_{\text{вэу}} = 0,3$); необходимая площадь для строительства ВЭС, равна части q от общей площади территории Сирии.

Таким образом, общий валовый потенциал ветровой энергии территории Сирии на высоте 50м составляет 13678 ТВт·ч/год. Расчётный технический потенциал ветровой энергии Сирии с учетом допущений при необходимой площади $q = 7,5\%$ (13890 км^2) составляет 48,32 ТВт·ч/год.

На основе электронных ресурсов (Solar Atlas for the Mediterranean и базы метеоданных NASA) и программ (Google Earth и ArcGIS) разработаны две методики для создания атласа и оценки природного и технического потенциала солнечной энергии территории Сирии на горизонтальную поверхность. Электронный ресурс Solar Atlas of the Mediterranean используется для получения информации о значении удельного годового прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность для территории Сирии. Solar Atlas of the Mediterranean имеет высокое разрешение (1 км x 1 км) и данные о солнечной радиации за 20 лет (1991-2010 гг.). Карта Сирии с приходом солнечной энергии на горизонтальную поверхность, взятая из Solar Atlas for the Mediterranean, была вставлена в программу Google Earth. Зонирование территории Сирии реализовано с помощью программы Google Earth и страна была разделена на пять зон, характеризующихся соответствующим средним значением удельного годового прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность $\mathcal{E}_{i,в}$, кВт·ч/м² в год (рисунок 3).

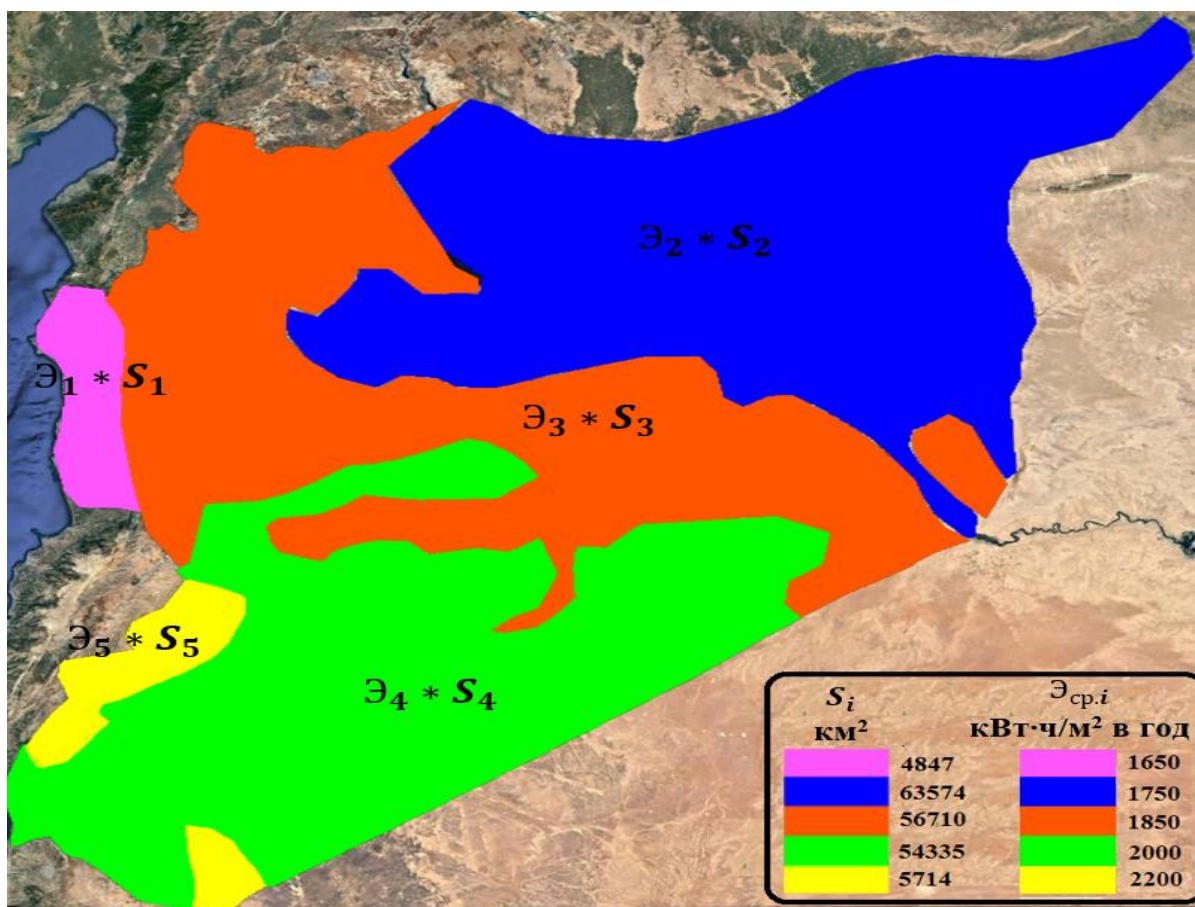


Рисунок 3 – Зонирование территории Сирии на S_i зон по среднегодовому значению удельного прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность

Общий валовый потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{сум.в.}^{сэ} = \sum \mathcal{E}_{i,в} * S_i \quad (3)$$

Общий технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{сум.т.}^{сэ} = \eta_{фэс} * q * \mathcal{E}_{сум.в.}^{сэ} \quad (4)$$

где: $\eta_{фэс}$ – общий КПД СФЭС, который принимается 16%. q – доля территории, необходимая для установки СФЭС.

Таким образом, общий валовый потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии составляет 345406 ТВт·ч/год, расчётный технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии при необходимой площади $q = 0,09\%$ (167 км^2) составляет 49,74 ТВт·ч/год.

Для верификации расчетов потенциалов солнечной энергии была разработана методика на основе электронного ресурса NASA и программы ArcGIS, которая реализуется путем выделения градусных точек пересечения долготы и широты на территории Сирии (было выделено 63 точки). С использованием базы метеоданных NASA были определены среднемесячные суточные удельные приходы солнечной энергии на горизонтальную поверхность в этих точках. С учетом длительности каждого месяца рассчитан среднемесячный и среднегодовой удельный приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность в этих точках. Затем проведена интерполяция значений прихода для территории Сирии с использованием программы ArcGIS и метода обратно взвешенных расстояний (ОВР). В результате использования метода интерполяции ОВР и программы ArcGIS проведено зонирование территории и выделено четыре зоны, характеризующихся соответствующим среднегодовым удельным приходом солнечной энергии на горизонтальную поверхность и рассчитана площадь каждой зоны (рисунок 4).

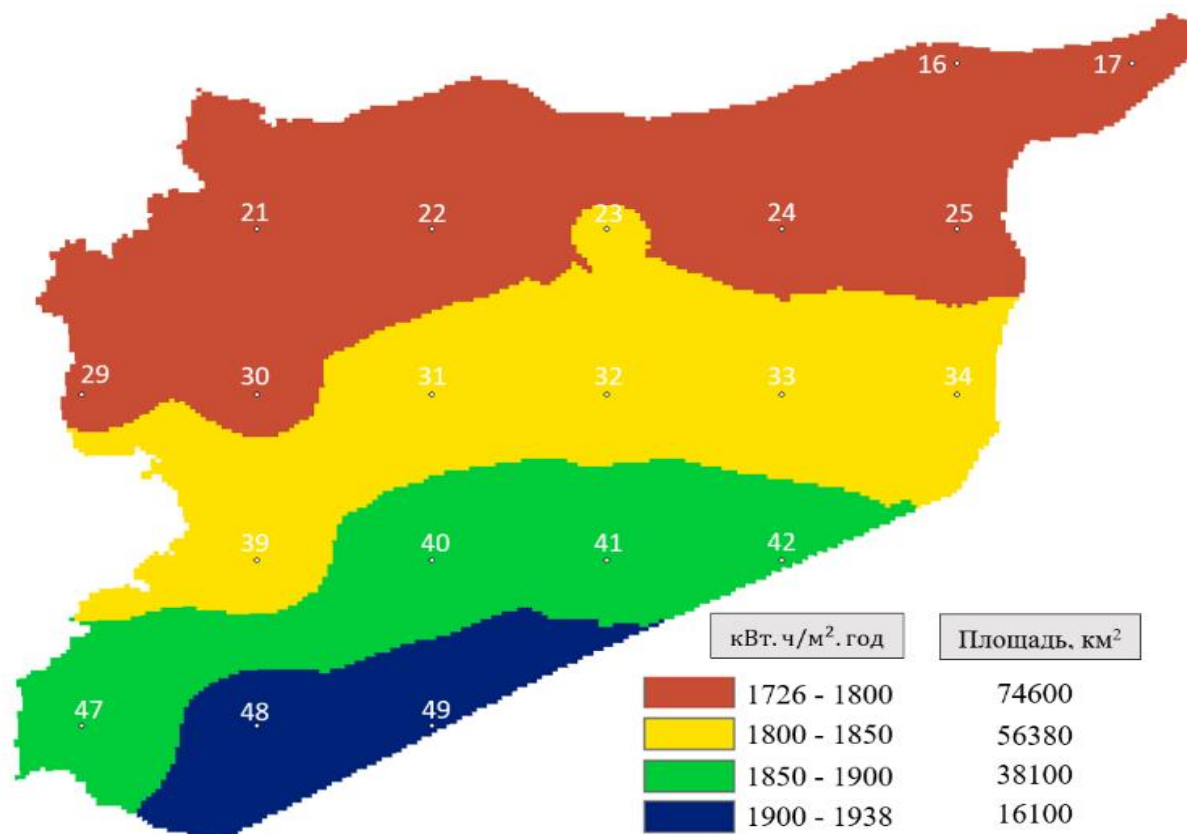


Рисунок 4 – Среднегодовой удельный приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность на основе электронного ресурса NASA и программы ArcGIS

Проинтегрировав значения среднегодового удельного прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность в каждой зоне на площадь зоны, определен общий природный потенциал солнечной энергии территории Сирии на горизонтальную поверхность, который составляет 336700 ТВт·ч/год. Расчётный технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии с использованием этой методики и допущений составил 48,48 ТВт·ч/год.

Сравнение результатов по двум методикам показывает хорошую сходимость (погрешность около 2,5 %).

Методика определения прихода солнечной энергии на наклонную площадку основана на использовании базы метеоданных NASA и модели Лю и Джордана. Выполнены расчеты для 63 точек, покрывающих территорию Сирии. Проведено разделение территории Сирии на зоны, характеризующие оптимальным углом наклона солнечной батареи и значения удельного годового прихода солнечной энергии на эти оптимальные площадки (рисунки 5 и 6).

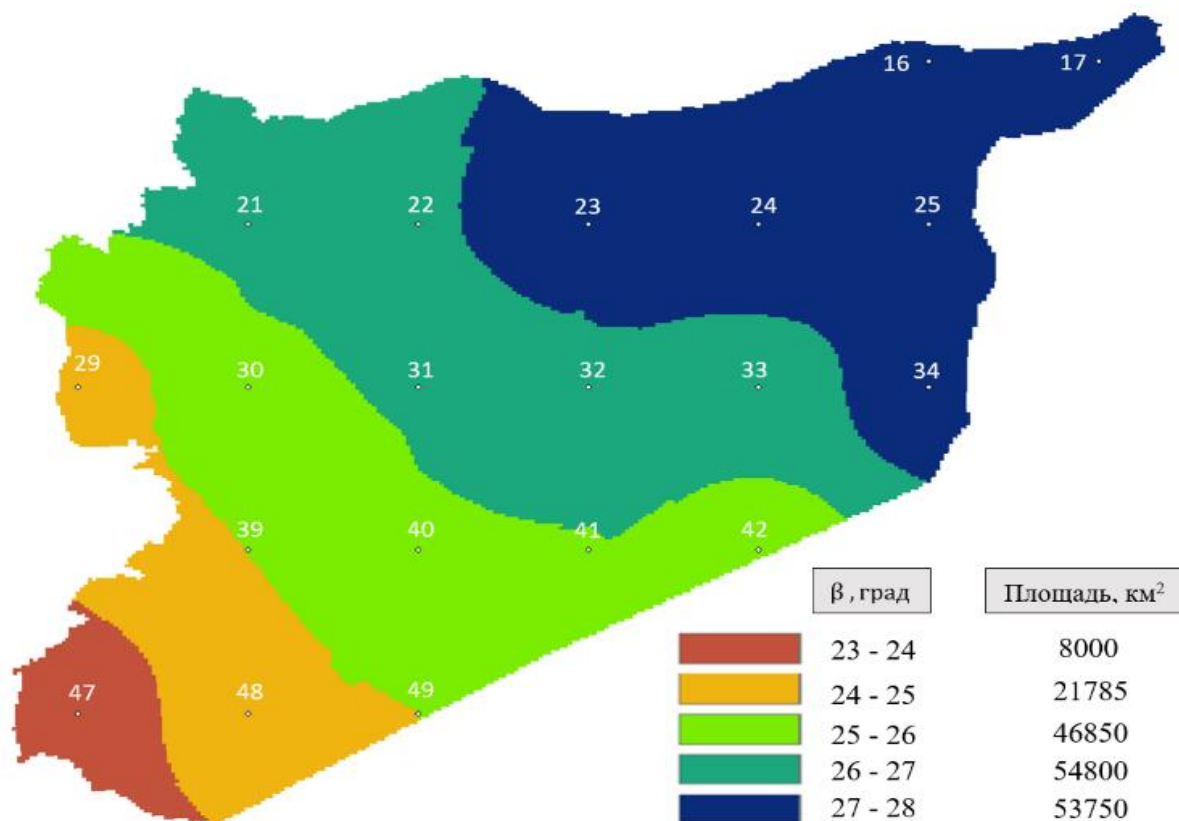


Рисунок 5 – Годовой оптимальный угол наклона солнечной батареи

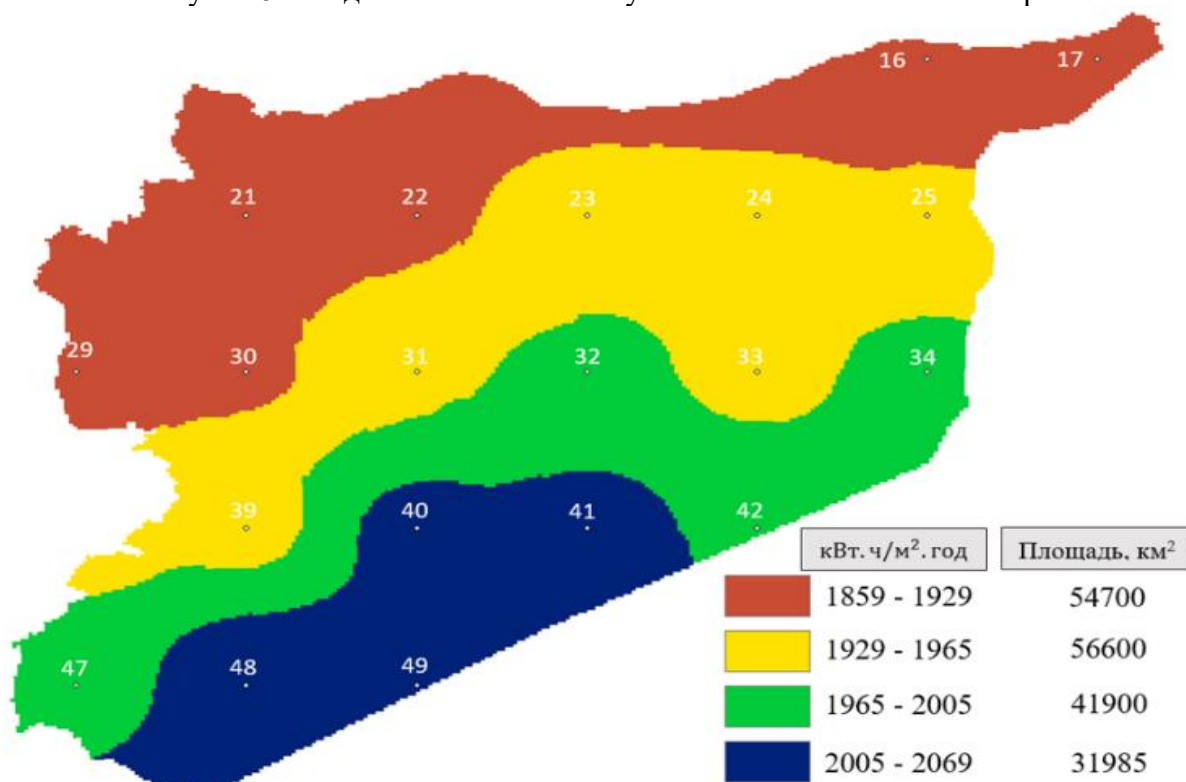


Рисунок 6 – Средний удельной приход солнечной энергии на оптимальную площадку

Показано, что годовой оптимальный угол наклона солнечной батареи для территории Сирии изменяется в диапазоне от 23° до 28°, при этом среднегодовой удельной приход солнечной энергии на наклонную площадку изменяется в диапазоне от 1859 кВт·ч/м²·год до 2069 кВт·ч/м²·год. Проинтегрировав значения среднегодового удельного прихода солнечной энергии на наклонную площадку в каждой зоне на площадь зоны, определен общий природный потенциал солнечной энергии территории Сирии на оптимальные наклонные площадки, который составил 362100 ТВт·ч/год. Расчётный технический потенциал солнечной энергии на оптимальные наклонные площадки территории Сирии при необходимой площади $q = 0,18\%$ (334 км²) составляет 52,14 ТВт·ч/год.

В третьей главе для математического моделирования элементов энергоустановки и систем на основе ВИЭ проведен анализ существующего программного обеспечения (ПО), таких как HYBRID DESIGNER, HYBRID2, INSEL, iNOGA, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, TRNSYS, MATLAB, RETScreen, HOMER. Одним из инструментов в ПО MATLAB является пакет Simulink, который имеет удобные блоки базовых математических функций для создания элементов энергосистем на основе ВИЭ, поэтому с учетом его преимуществ относительно других ПО был выбран MATLAB. Были разработаны: 1) адекватные и достоверные модели ВЭУ, подключённой к электрической сети на основе параметров энергосистемы Сирии, с различными видами генераторов (асинхронный генератор с беличьей клеткой (АГБК), асинхронный генератор двойного питания (АГДП) и синхронный генератором на постоянных магнитах (СГПМ)) для исследования режимов работы при изменении скорости ветра; 2) модель СФЭС, подключённой к электрической сети с параметрами энергосистемы Сирии для исследования режимов работы при изменении солнечного излучения и температуры окружающей среды.

На рисунке 7 показана блок-схема взаимодействия моделей для расчета параметров и режимов работы сетевых ВЭУ и СФЭС в среде MATLAB.

Моделирование режимов работы ВЭУ

Генератор и силовой преобразователь (СП) в составе электроэнергетического оборудования ВЭУ являются основными электрическими компонентами. Различные конструкции и комбинации этих двух компонентов приводит к большому разнообразию конфигураций ВЭУ, которые можно разделить на три группы:

- а) ВЭУ с постоянной частотой вращения с генератором АГБК.
- б) ВЭУ с частично-переменной частотой вращения с генератором АГДП.
- в) ВЭУ с полно-переменной частотой вращения с генератором СГПМ.

Для данных групп оборудования ВЭУ было проведено моделирование режимов и оценка эффективности преобразования ветровой энергии.

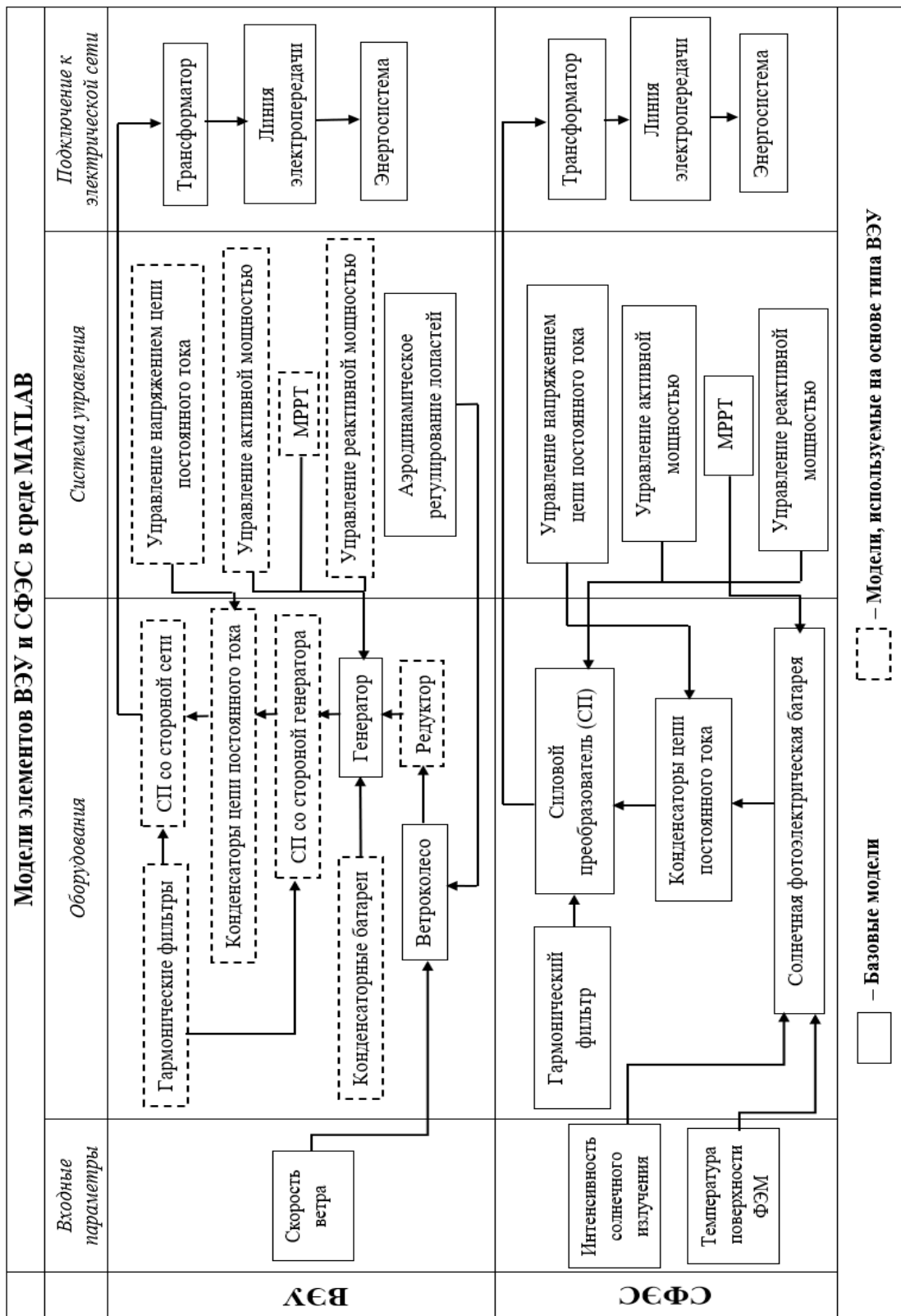


Рисунок 7 – Блок-схема методики расчета параметров и режимов работы ВИЭ в среде MATLAB

Задачей моделирования для каждого типа оборудования является определение рабочей мощности генератора при определенной частоте вращения генератора и скорости ветра, которая должна быть как можно ближе к точке максимальной мощности ветроколеса, в зависимости от угловой скорости вращения при данной скорости ветра.

Обобщенная разработанная модель сетевой ВЭУ с постоянной частотой вращения (ВЭУ с АГБК) в MATLAB показана на рисунке 8. Она состоит из следующих подсистем:

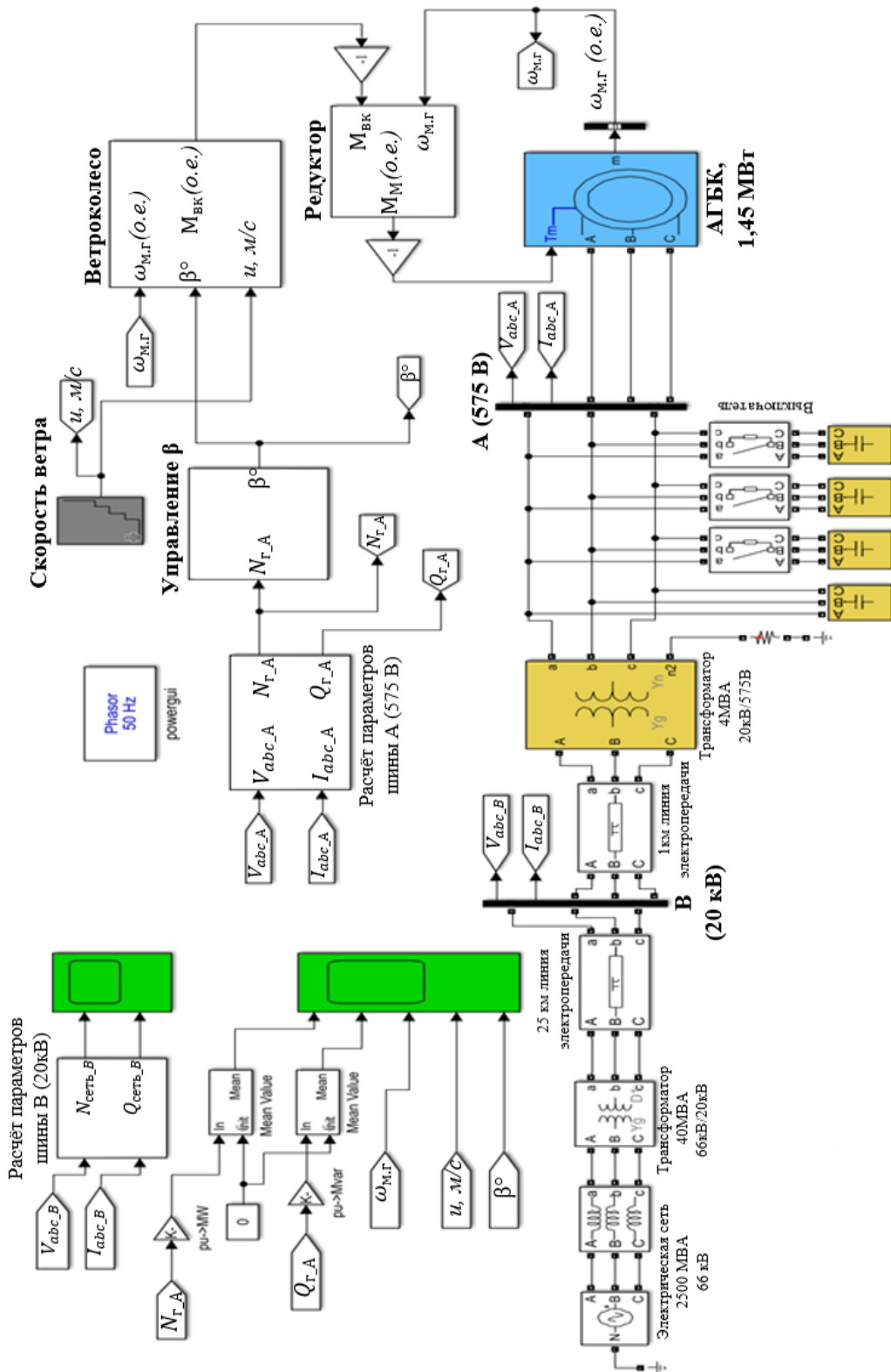


Рисунок 8 – Обобщенная модель сетевой ВЭУ с АГБК в МАТЛАВ

- АГБК с мощностью 1,45 МВт при напряжении 575 В.
- Первый трансформатор мощностью 4МВА при 20кВ/575В для подключения генератора к шинам 20 кВ с помощью 1 км трехфазной линии электропередачи; второй трансформатор мощностью 40 МВА при 66кВ/20кВ для подключения генератора к электрической сети мощностью 2500 МВА и частотой 50 Гц с помощью 25 км трехфазной линии электропередачи. Уровень напряжения, мощности трансформаторов и мощность электрической сети выбираются на основе параметров территориальной энергосистемы Сирии в районе г. Дамаска.

• Ветроколесо (ВК): Характеристики ВК, использующего в модели сетевой ВЭУ с АГБК в MATLAB при $\beta=0^\circ$ показаны на рисунке 9. ВК при скорости ветра 13 м/с вырабатывает номинальную механическую мощность равную 1,45 МВт. На рисунке 9 вертикальной черной линией показана рабочая зона ВЭУ с АГБК.

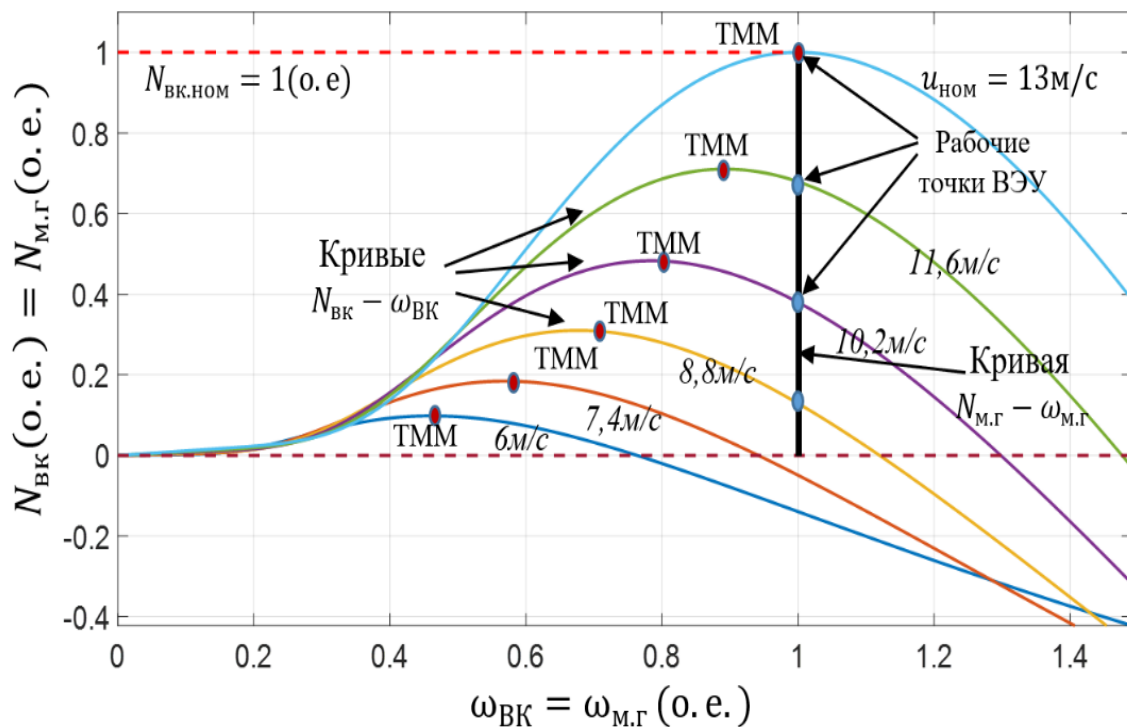


Рисунок 9 – Характеристики ВК и рабочая зона АГБК при $\beta = 0^\circ$

На рисунке 9 также показаны зависимости механической мощности генератора $N_{М.Г.}$ от угловой частоты вращения ротора генератора $\omega_{М.Г.}$ и зависимости механической мощности ВК $N_{ВК}$ от угловой частоты вращения ВК $\omega_{ВК}$. Предполагая, что механическими потерями в коробке передач (редуктор) пренебрегают, механическая мощность, вырабатываемая ВК равна механической мощности генератора в относительных единицах ($N_{М.Г.} = N_{ВК}$).

Кроме того, механическая угловая частота вращения ВК равна $\omega_{М.Г.}$ в относительных единицах ($\omega_{М.Г.} = \omega_{ВК}$). Таким образом, характеристики $N - \omega$ для ветроколеса и генератора могут быть показаны на одном графике. Каждая кривая ВК соответствует определенной скорости ветра, а генератор имеет только одну вертикальную линию. В устойчивом состоянии ВЭУ работает в одной из точек пересечения кривых ВК и генератора. Для заданной скорости ветра существует соответствующая точка максимальной мощности (ТММ) на кривых ВК. Для ВЭУ с постоянной скоростью система может работать только в одной ТММ, которая соответствует номинальной скорости ветра. На других скоростях ветра система работает в точках, которые ниже чем ТММ и, поэтому, не может иметь максимальную мощность доступную от ветра, это приводит к понижению эффективности. В практике, когда скорость ветра ниже 60% номинальной скорости ветра, никакая мощность не может быть выработана ВЭУ.

• Подсистема управления положением лопастей (угол β): в результате моделирования при увеличении скорости ветра от номинальной (13 м/с) до (16 м/с) происходит резкое увеличение мощности сверх номинального значения. Однако, за счет включения системы управления положением лопастей (угол β) происходит регулирование угла атаки в диапазоне от 0 до 10 градусов, и следовательно активная мощность вернется к расчетному значению (1,45 МВт).

• Подсистема редуктора: при использовании системы относительных единиц, нет необходимости рассматривать передаточное число коробки передач (редуктора). В устой-

чивом состоянии можно принять что $\omega_{м.г} = \omega_{вк}$ и механическая мощность, вырабатываемая ВК равна механической мощности генератора в относительных единицах. В данной модели для описания вращающихся масс (ВК, редуктор и генератора) используется двух-массовая модель (two-mass model), состоящий из массы ВК и массы генератора и расположенной между ними пружины и демпфера.

• Конденсаторные батареи: генератор генерирует реактивную мощность близкую к одной трети от номинальной активной мощности, когда он не выдает активную мощность в сеть, поэтому для пуска генератора выбирается конденсаторная батарея, обеспечивающая реактивную мощность $Q_{кб} = 0,56$ МВАр. Однако, реактивная мощность, требуемая для генератора $Q_{г}$ увеличивается с увеличением активной мощности генератора и при номинальной скорости ветра (13 м/с) составляет номинальное значение реактивной мощности генератора $Q_{г.ном} = 0,91$ МВАр. Следовательно, реактивная мощность, принимаемая от сети $Q_{сеть}$ также увеличивается. Для решения этой проблемы предлагается включить в систему в момент изменения скорости ветра множество конденсаторных батарей путем переключателей для обеспечения различных уровней компенсации реактивной мощности. Таким образом, это позволяет эффективно компенсировать реактивную мощность во всех режимах работы генератора и позволяет уменьшить реактивную мощность, принимаемую от сети до нуля. Эквивалентная емкость конденсаторных батарей $C_{д}$, которые входят в систему в момент изменения скорости ветра и реактивная мощность, принимаемая от них, показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Эквивалентная емкость конденсаторных батарей, входящих в систему и их реактивная мощность

Время переключения $C_{д}$ в систему	Скорость ветра, м/с	$Q_{г}$, МВА на шине А	$Q_{кб}$, кВАр	$C_{д}$, мкФ	$Q_{сеть}$, МВАр на шине В
$t = 0$	8,8	0,56	$Q_{кб1} = 560$	$C_{д1} = 1798$	0
$t = 20$ сек	10,2	0,61	$Q_{кб2} = 50$	$C_{д2} = 160,5$	0
$t = 26$ сек	11,6	0,72	$Q_{кб3} = 110$	$C_{д3} = 353,2$	0
$t = 32$ сек	13	0,91	$Q_{кб4} = 190$	$C_{д4} = 610$	0
			$\sum_{1}^4 Q_{кб} = Q_{г.ном} = 0,91$ МВАр	$\sum_{1}^4 C_{д} = 2921,7$ мкФ	

Результаты моделирования также показали, что созданная модель в MATLAB рассмотренной ВЭУ с АГБК позволяет регулировать частоту вращения от (1,00013 о.е.) до (1,0072 о.е.) при изменении скорости ветра от (8,1 м/с) до (13 м/с), что приводит к низкой эффективности преобразования ветровой энергии.

Обобщенная разработанная модель сетевой ВЭУ с частично-переменной частотой вращения (ВЭУ с АГДП) в MATLAB показана на рисунке 10. Она состоит из следующих подсистем:

- АГДП: это АГФР мощностью 1,5 МВт при напряжении 690 В.
- Первый трансформатор с мощностью 500кВА при 690В/250В используется для согласования напряжения статора генератора с напряжением ротора генератора. Второй трансформатор с мощностью 2,5МВА при 20кВ/690В используется для подключения генератора к электрической сети мощностью 2500 МВА и частотой 50 Гц.
- Выключатель: для синхронизации АГДП с сетью, выключатель добавлен для подключения статора генератора к сети после достижения синхронизации.
- Резисторы: перед подключением статора генератора к сети осуществляется синхронизация индуцированного напряжения статора через резисторы с напряжением сети.

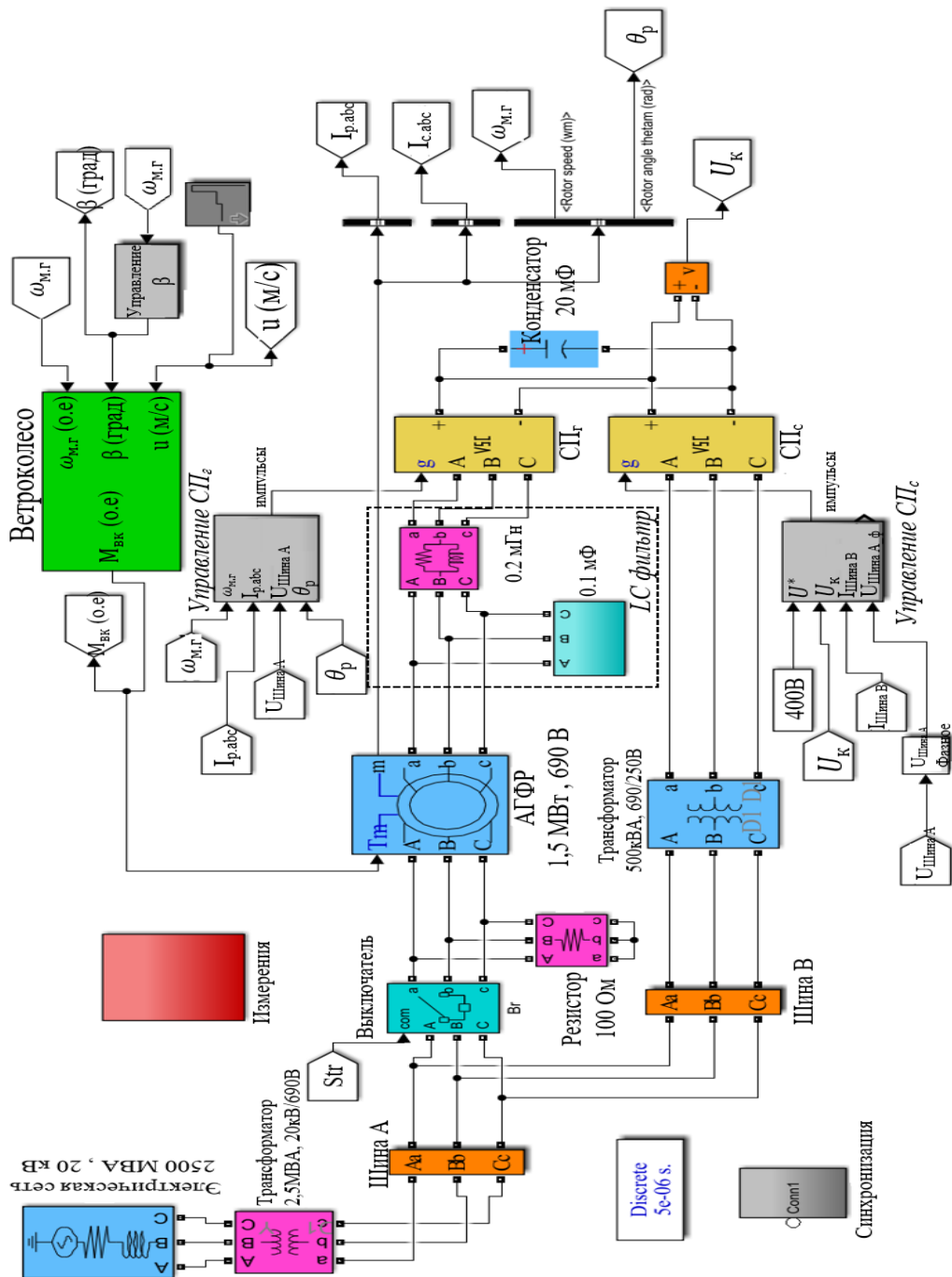


Рисунок 10 – Обобщенная модель сетевой ВЭУ с АГДП в MATLAB

• Ветроколесо: характеристики ВК, использующего в модели сетевой ВЭУ с АГДП в MATLAB при $\beta=0^\circ$ показаны на рисунке 11. ВК при скорости ветра 13 м/с вырабатывает номинальную механическую мощность равную 1,5 МВт. На рисунке 11 также показана рабочая зона АГДП. На рисунке 11 показано что, в зависимости от угловой частоты вращения (скорости) ротора генератора, есть два режима работы для ВЭУ с АГДП: 1) сверхсинхронный режим работы, в котором генератор работает выше синхронной частоты ω_c ; 2) подсинхронный режим работы, в котором генератор работает ниже синхронной частоты. Скольжение s будет отрицательным в сверхсинхронном режиме работы и становится положительным в подсинхронном режиме работы.

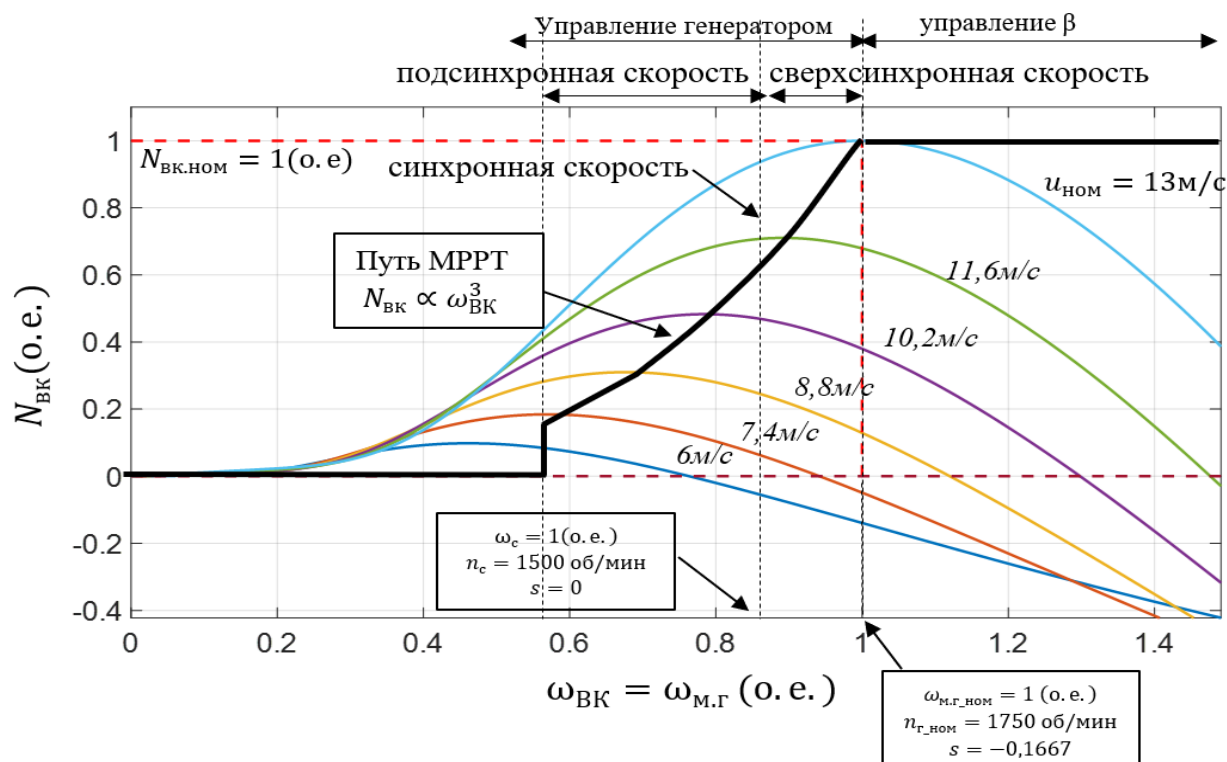


Рисунок 11 – Характеристики ВК и рабочая зона АГДП при $\beta = 0^\circ$

- Подсистема управления положением лопастей (угол β): в результате моделирования при увеличении скорости ветра от номинальной (13 м/с) до (18 м/с) происходит регулирование угла атаки в диапазоне от 0 до 19 градусов, и следовательно, активная мощность возвращается к номинальному значению (1,5 МВт).

- Подсистема редуктора: принято тоже самое допущение как в прошлой модели, но в данной модели для описания вращающихся масс (ВК, редуктор и генератора) используется одно-массовая динамическая модель (one-mass model).

- Силовые преобразователи: первый со стороны генератора (СП_Г) и второй со стороны сети (СП_с). В нашем случае используется тип преобразователя напряжения с функцией переключения.

- Конденсатор цепи постоянного тока: используется между СП_Г и СП_с.

- Гармонические фильтры: используются с силовыми преобразователями для решения проблем, вызванных гармониками;

- Подсистема управления СП_Г: реализована на основе метода ориентированного управления по вектору напряжения статора (stator voltage oriented control SVOC) для управления активной мощностью генератора со слежением за точкой максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking МРРТ) и реактивной мощностью статора генератора.

- Подсистема синхронизации АГДП с сетью: реализована для синхронизации индуцированного напряжения статора с напряжением сети. Индуцированное напряжение через резисторы, подключенные к статору, представляется напряжением статора. Выключатель замыкается, когда напряжение в сети и индуцированное напряжение статора будут близки по амплитуде, частоте и фазе.

- Подсистема управления СП_с: реализована на основе метода ориентированного управления по вектору напряжения сети (voltage oriented control VOC) для управления напряжением цепи постоянного тока на конденсаторе и реактивной мощностью электрической сети.

Результаты моделирования, показанные в таблице 2, показали, что созданная модель в MATLAB рассмотренной ВЭУ с АГДП позволяет регулировать частоту вращения от (0,58

о.е.) до (1 о.е.) и подавать активную мощность в сеть от (0,173 о.е.) до (0,970 о.е.) при изменении скольжения со сверхсинхронного режима (+0,323) до подсинхронного режима (-0,1667) и скорости ветра от (7 м/с) до (13 м/с). Таким образом, данный вариант ВЭУ с АГДП более эффективно преобразовывает энергию ветра, чем рассмотренный выше вариант ВЭУ с АГБК.

Таблица 2 – Мощность статора, ротора генератора и сети при изменении скорости ветра и угловой частоты вращения генератора

Скорость ветра (м/с)	Угловая частота вращения генератора $\omega_{м.г}$ (о.е.)	Скольжение (s)	Мощность статора генератора N_c		Мощность ротора генератора N_p		Мощность сети $N_{сеть}$	
			кВт	(о.е.)	кВт	(о.е.)	кВт	(о.е.)
13	1	-0,1667	1250	0,83	202	0,140	1450	0,970
11,6	0,898	-0,048	1004	0,669	44	0,029	1044	0,696
10,9	0,850	0,008	895	0,60	-12	0,008	878	0,590
10,2	0,790	0,078	775	0,516	-64	0,043	705	0,470
8,8	0,696	0,19	595	0,396	-117	0,078	473	0,315
7	0,58	0,323	400	0,26	-141	0,094	260	0,173

Для оценки точности созданной модели в MATLAB и на сколько он имеет способность слежения за ТММ рассчитана средняя абсолютная ошибка в процентах (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) между $N_{сеть}$ и $\omega_{м.г}$, рассчитанные из характеристик ВК (рисунок 11) и $N_{сеть}$ и $\omega_{м.г}$, полученные при моделировании (таблица 2). Результаты показали, что MAPE для $\omega_{м.г}$ равняется 1,42% и MAPE для $N_{сеть}$ равняется 3,49%.

Обобщенная разработанная модель сетевой ВЭУ с полно-переменной частотой вращения (ВЭУ с СГПМ) в MATLAB показана на рисунке 12. Она состоит из следующих подсистем:

- Синхронный генератор с постоянными магнитами на поверхности ротора мощностью 2 МВт и напряжении 690 В.
- Первый трансформатор с мощностью 2,5МВА на 690В/20кВ для подключения генератора к шинам 20 кВ. Второй трансформатор с мощностью 40МВА на 20кВ/66кВ для подключения генератора к электрической сети мощностью 2500 МВА и частотой 50 Гц с помощью 20 км трехфазной линии электропередачи.
- Силовые преобразователи (СП_с и СП_г): блок СП_с или СП_г состоит из шести силовых ключей (IGBT/diodes), которые образуют трехфазный мост. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) используются как силовые переключатели так как их низкие потери и размеры по сравнению с другими силовыми переключателями.
 - Конденсатор цепи постоянного тока: используется между СП_г и СП_с.
 - Гармонические фильтры: используются с силовыми преобразователями для решения проблем, вызванных гармониками;
 - Подсистема управления положением лопастей (угол β): в результате моделирования при увеличении скорости ветра от номинальной (13 м/с) до (15 м/с) происходит регулирование угла атаки в диапазоне от 0 до 9 градусов, и следовательно активная мощность вернется к номинальному значению (2 МВт).
 - Подсистема редуктора: ВЭУ с СГПМ является безредукторной ВЭУ. Для описания вращающихся масс (ВК и генератора) используется одно-массовая динамическая модель, при этом эквивалентная постоянная инерция вращающихся масс меньше, чем в модели ВЭУ с АГДП, так как редуктора нет в наличии.
 - Подсистема управления СП_г: реализована на основе метода управления нулевой продольной составляющей тока статора генератора (Zero d-Axis Current Control) для управления активной мощностью генератора со слеживанием точки максимальной мощности (MPPT).

• Подсистема управления СПс: реализована на основе метода ориентированного управления по вектору напряжения сети (voltage oriented control VOC) для управления напряжением цепи постоянного тока на конденсаторе и реактивной мощностью электрической сети.

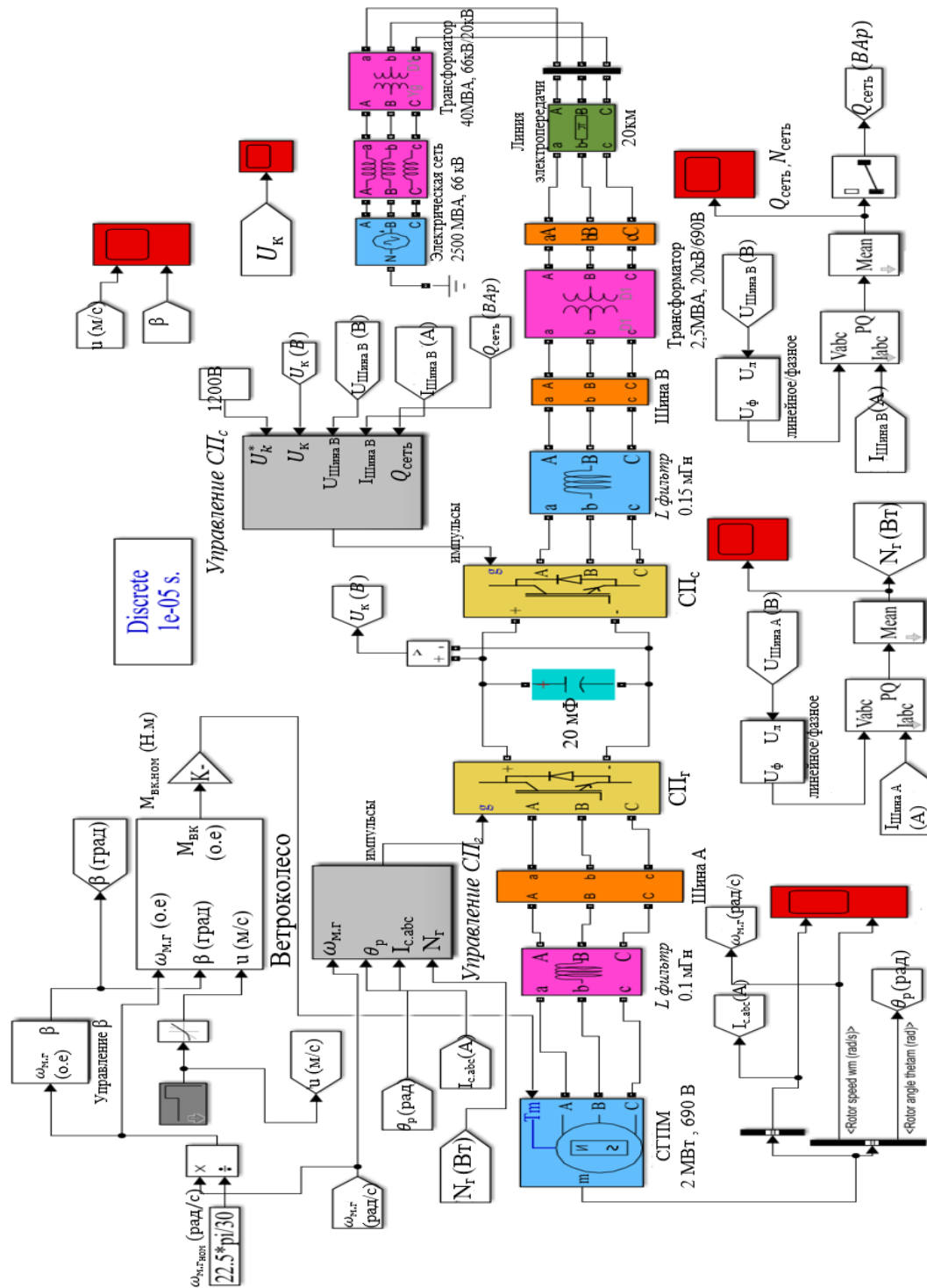


Рисунок 12 – Обобщенная модель сетевой ВЭУ с СГПМ в MATLAB

• Ветроколесо: характеристики ВК, использующего в модели сетевой ВЭУ с СГПМ в MATLAB при $\beta=0^\circ$ показаны на рисунке 13. ВК при скорости ветра 13 м/с вырабатывает номинальную механическую мощность, равную 2 МВт = 1 (о.е). На рисунке 13 также показана рабочая зона СГПМ.

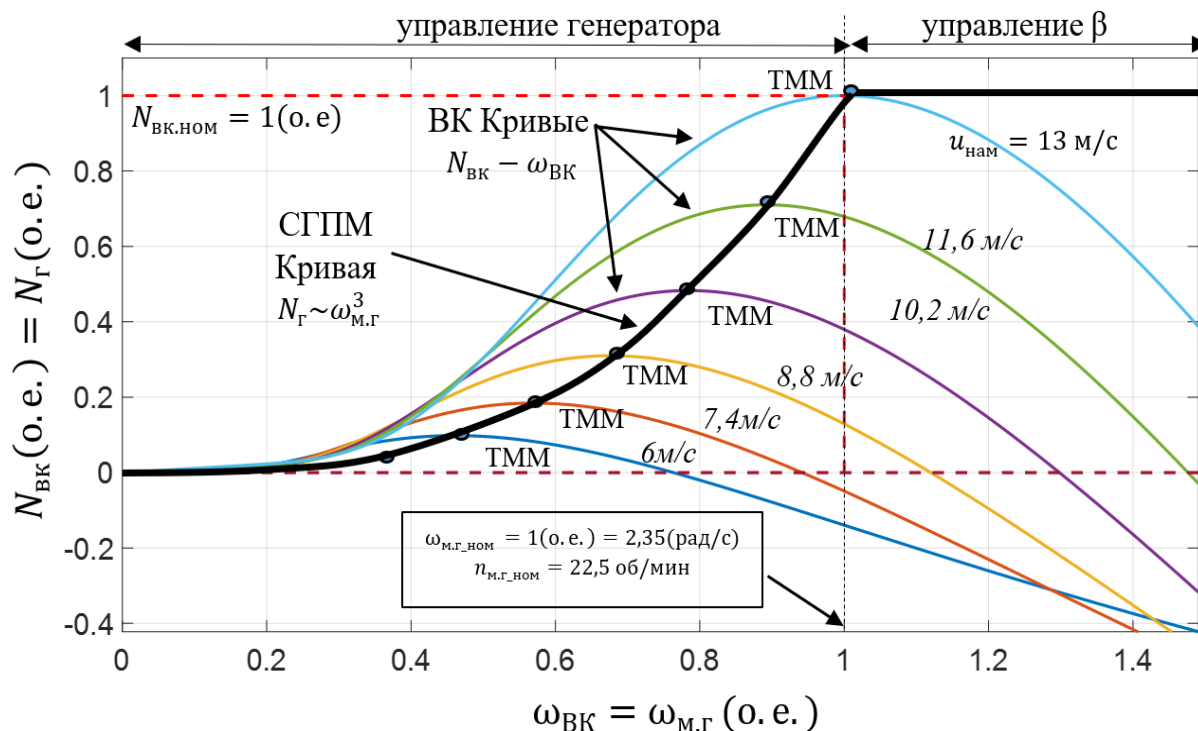


Рисунок 13 – Характеристики ВК и рабочая зона СГПМ при $\beta = 0^\circ$

Результаты моделирования, показанные в таблице 3, показали, что созданная модель в MATLAB рассмотренной ВЭУ с СГПМ позволяет проводить полномасштабное преобразование мощности от (0,0085 о.е.) до (0,985 о.е.) с ошибкой 2,07% при изменении скорости ветра от начальной (3 м/с) до номинальной (13 м/с) и позволяет регулировать частоту вращения генератора в полном диапазоне от (0,2 о.е.) до (0,995 о.е.) с ошибкой 0,81%. Таким образом, данный вариант ВЭУ с СГПМ наиболее эффективно преобразовывает энергию ветра по сравнению с ВЭУ с АГБК и ВЭУ с АГДП.

Таблица 3 – Активная мощность, подаваемая в сеть и угловая частота вращения генератора при изменении скорости ветра

Скорость ветра (м/с)	$\omega_{M.G.}$, (о.е.) на основе созданной модели (результат моделирования)	$\omega_{M.G.}$, (о.е.) на основе характеристик ВК (рисунок 13) в ТММ	Активная мощность, подаваемая в сеть $N_{сет}$ на основе созданной модели (результат моделирования)		Активная мощность, подаваемая в сеть $N_{сет}$ на основе характеристик ВК (рисунок 13) в ТММ		МАРЕ для $\omega_{M.G.}$, (%)	МАРЕ для $N_{сет}$, (%)
			кВт	(о.е.)	кВт	(о.е.)		
13	0,995	1	1970	0,985	2000	1	0,81	2,07
11,6	0,885	0,891	1400	0,7	1420	0,710		
10,2	0,781	0,781	950	0,475	966	0,483		
8,8	0,672	0,681	610	0,305	620	0,310		
7,4	0,565	0,571	360	0,18	368	0,184		
6	0,455	0,461	188	0,094	196	0,098		
5	0,376	0,351	106	0,053	115	0,057		
4	0,293	0,241	51	0,025	60	0,030		
3	0,200	0,200	17	0,0085	25	0,012		

В результате расчетов были построены для всех трех вариантов электроэнергетического оборудования ВЭУ зависимости активной мощности, подаваемой в сеть, от угловой частоты вращения ротора генератора при различных скоростях ветра (рисунок 14).

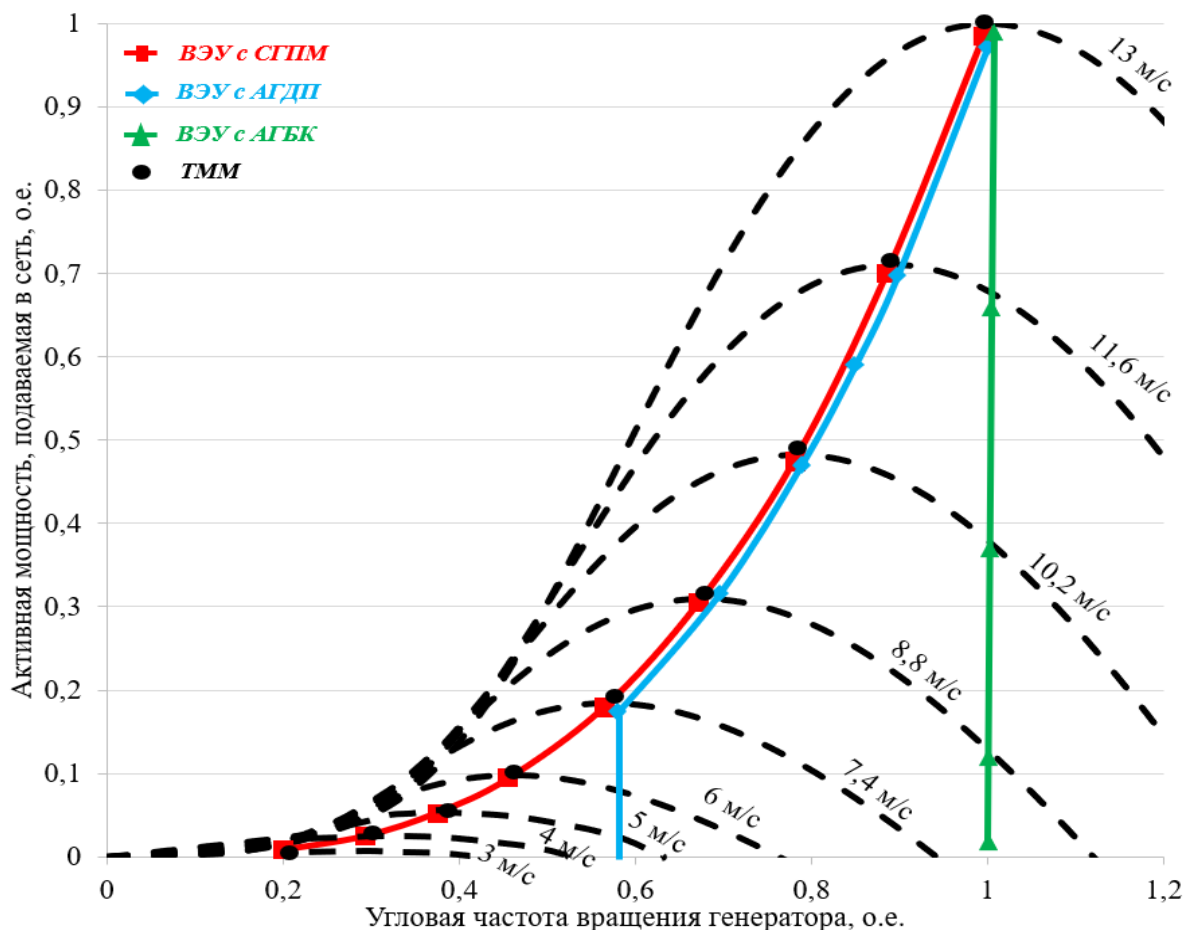


Рисунок 14 – Зависимость активной мощности, подаваемой в сеть, от угловой частоты вращения генератора для всех типов ВЭУ

Анализ результатов моделирования на рисунке 14 показал:

1) схема ВЭУ с АГБК практически не позволяет регулировать частоту вращения, работает только с номинальной частотой вращения, далеко от точек максимальной мощности (ТММ) и выдает мощность в диапазоне скоростей ветра от 8,1 м/с до номинальной 13 м/с, что говорит о низкой эффективности преобразования ветровой энергии;

2) схема ВЭУ с АГДП обеспечивает оптимальное регулирование частоты вращения в диапазоне от 0,58 о.е. до 1 о.е. при изменении скорости ветра от 7 м/с до 13 м/с, в режимах близких к ТММ, что значительно эффективнее чем у ВЭУ с АГБК.

3) схема ВЭУ с СГПМ позволяет оптимально регулировать частоту вращения генератора в полном диапазоне от 0,2 о.е. до 0,995 о.е. при изменении скорости ветра от 3 м/с до 13 м/с и практически обеспечивает работу в точках максимальной мощности ветроколеса.

Таким образом, вариант ВЭУ с СГПМ наиболее эффективно преобразует энергию ветрового потока и наиболее эффективен для условий Сирии, где значительная мощность ветра приходится на диапазоны сравнительно низких скоростей ветра.

Моделирование режимов работы СФЭС

Сетевые СФЭС можно разделить на две категории: двухступенчатая и одноступенчатая. Двухступенчатая сетевая СФЭС состоит из повышающего преобразователя постоянного тока и инвертора. Поэтому она имеет достаточно простую схему управления, но более сложную структуру оборудования, более высокую стоимость и большие потери энергии по сравнению с одноступенчатой сетевой СФЭС. Поэтому в работе исследованы режимы работы одноступенчатой сетевой СФЭС с центральным инвертором. Обобщенная модель одноступенчатой сетевой СФЭС в MATLAB показана на рисунке 15. Она состоит из следующих подсистем:

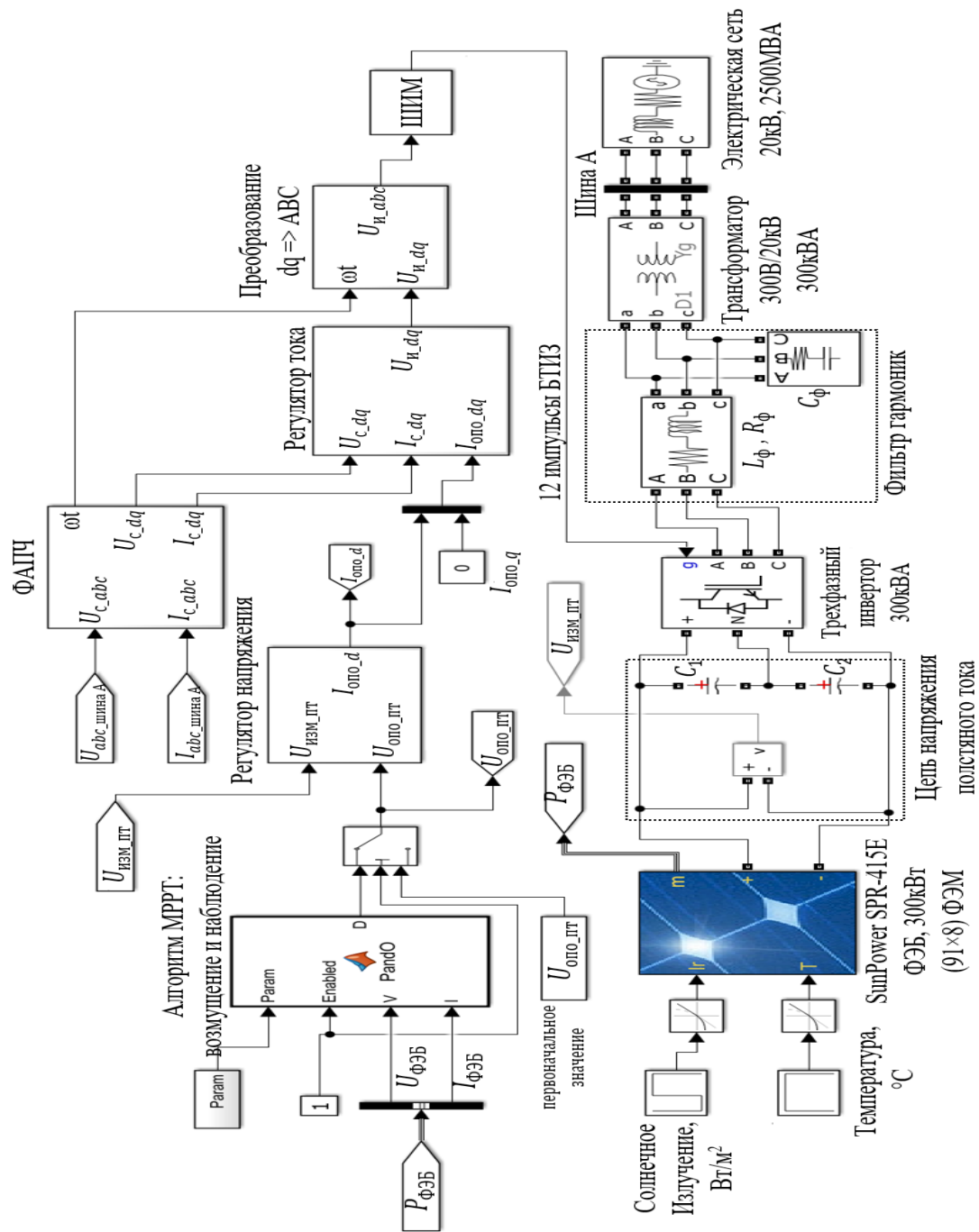


Рисунок 15 – Обобщённая модель одноступенчатой СФЭС в MATLAB

• Солнечная фотоэлектрическая батарея (ФЭБ): ФЭБ состоит из 91ого ряда фотоэлектрических цепей (PV string), каждый из которых состоит из 8 последовательно соединенных фотоэлектрических модулей (ФЭМ) типа SunPower SPR-415E-WHT-D мощностью 415 Вт. В резюме анализа рынка производителей ФЭМ выбрана компания SunPower, которая является одной из самых качественных производители ФЭМ, предлагая лучшее обслуживание, длительную гарантию, высокой эффективностью и низкой деградации в периоде службы. При стандартных условиях испытания (Standard Test Conditions STC) максимальная выходная мощность ФЭБ составляет $P_{ФЭБ} = 91 \cdot 8 \cdot 415 = 302 \text{ кВт}$.

• Силовой преобразователь (инвертор): использован трёхуровневый инвертор с топологией I-типа. БТИЗ применяются как силовые переключатели. Инвертор преобразует выходное напряжение постоянного тока ФЭБ (583 В) в напряжение переменного тока (300 В).

• Фильтр гармоник: для фильтрации гармоник, возникающих в результате использования моста БТИЗ для улучшения формы выходного сигнала и приближения к синусоидальному.

- Конденсаторы цепи постоянного тока (DC link): использованы на выходе блока ФЭБ как устройство накопления энергии для обеспечения на входе инвертора мощности со стабилизированным напряжением.

- Трансформатор 300 В/20 кВ мощностью 300 кВА использован для подключения инвертора к электрической сети мощностью 2500 МВА напряжением 20 кВ.

- Подсистема управления инвертором, включающая алгоритм слежения за точкой максимальной мощности (МРРТ) на основе метода возмущения и наблюдения (perturbation and observation method), регулятор напряжения, регулятор тока, блок фазовой автоподстройки частоты и формирователь широтно-импульсного модулятора. Такая подсистема реализована для управления активной мощностью ФЭБ со слеживанием точки максимальной мощности (МРРТ), напряжением цепи постоянного тока на конденсаторе и реактивной мощностью электрической сети.

На основе разработанной модели выполнены исследование режимов работы СФЭС мощностью 300 кВт при изменении интенсивности солнечного излучения и температуры поверхности модулей, характеристикой для условий Сирии.

Результаты моделирования характеристик ФЭБ, показанных в таблице 4, при изменении интенсивности солнечного излучения от 200 до 1000 Вт/м² показали, что значения характеристик ФЭБ (мощность $P_{ФЭБ}$, напряжение $U_{ФЭБ}$ и ток $I_{ФЭБ}$) в точки максимальной мощности, полученные в результате моделирования, хорошо совпадают с расчётными значениями ФЭБ на основе паспортных данных ФЭМ (погрешности не повышают 1 %).

Таблица 4 – Сходимость характеристик ФЭБ при температуре поверхности модулей 25 °С

Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²	Паспортные данные			Параметры, полученные в результате моделирования			Погрешность		
	$P_{ФЭБ}$, кВт	$U_{ФЭБ}$, В	$I_{ФЭБ}$, А	$P_{ФЭБ}$, кВт	$U_{ФЭБ}$, В	$I_{ФЭБ}$, А	$P_{ФЭБ}$, %	$U_{ФЭБ}$, %	$I_{ФЭБ}$, %
1000	302	583,2	517,8	302	583,3	517,7	1,07	0,17	0,97
800	241,5	580,9	415,8	243	581,8	417,7			
600	180,7	580,4	311,3	182,2	579,5	314,5			
400	119,6	577,1	207,2	121,2	577	209,9			
200	58,7	565,6	103,8	60,2	568,5	105,9			

При оценке влияния изменения температуры поверхности модулей от 25°С до 70°С (таблица 5) погрешности слежения за ТММ не повышают 2 %, что говорит о достоверности разработанной модели. На рисунке 16 показаны вольтамперная характеристика (ВАХ) и вольт-мощностная характеристика ФЭБ при изменении температуры. Из рисунка 16 и таблицы 5 можно отметить, что при температуре поверхности модулей 70°С (как для условий Сирии) мощность ФЭБ снижается от 302 кВт до 264,2 кВт, что говорит о потерях 12,5%, что следует учитывать при проектировании СФЭС в условиях Сирии.

Таблица 5 – Сходимость характеристик ФЭБ при интенсивности излучения 1000 Вт/м²

Температура поверхности модулей, °С	Паспортные данные			Параметры, полученные в результате моделирования			Погрешность		
	$P_{ФЭБ}$, кВт	$U_{ФЭБ}$, В	$I_{ФЭБ}$, А	$P_{ФЭБ}$, кВт	$U_{ФЭБ}$, В	$I_{ФЭБ}$, А	$P_{ФЭБ}$, %	$U_{ФЭБ}$, %	$I_{ФЭБ}$, %
25	302	583,2	517,8	302	583,3	517,7	0,24	1,62	1,81
40	289,6	558,3	518,7	289,6	569,3	508,8			
50	281,3	541,9	519,1	280,2	556,6	503,5			
60	272,9	525,5	519,3	271	542,7	499,3			
70	264,5	507,7	521	264,2	508,4	519,7			

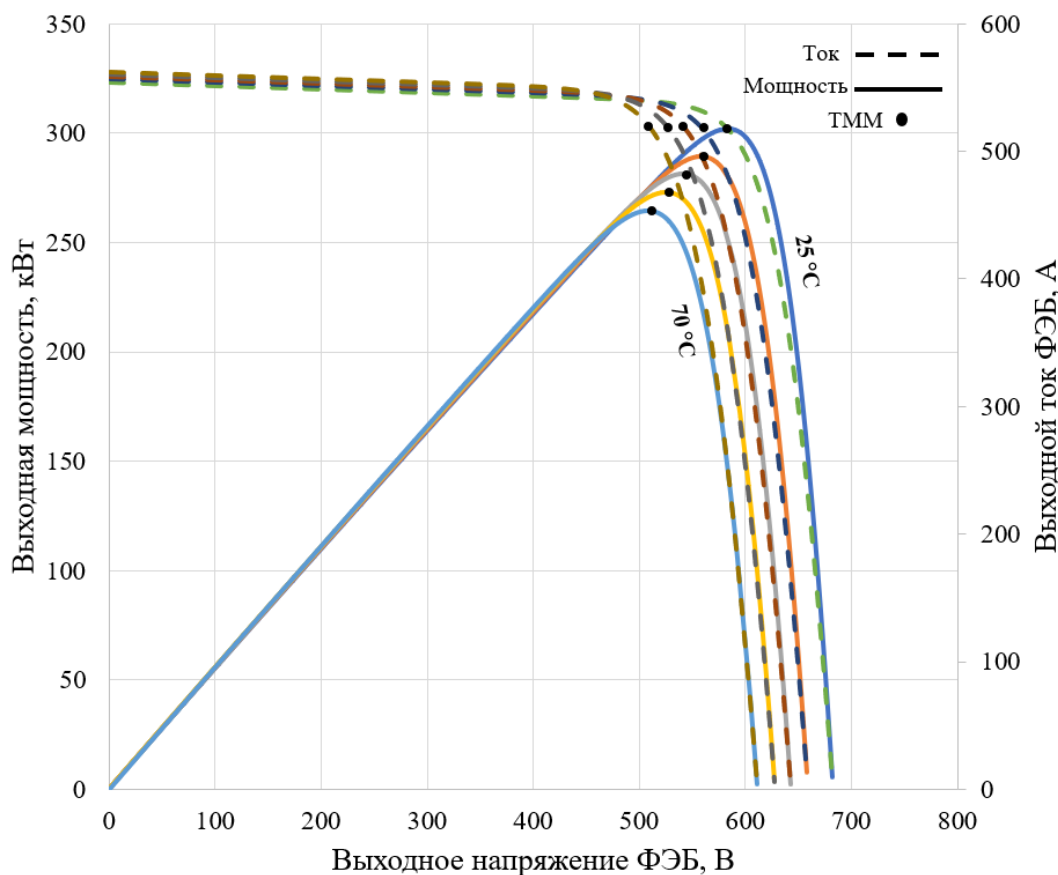


Рисунок 16 – Вольт-амперная и вольт-мощностная характеристика ФЭБ при стандартном значении интенсивности солнечного излучения равном 1000 Вт/м^2

В четвертой главе разработана методика обоснования технических и экономических параметров сетевой ВЭС для условий Сирии. Апробация методики выполнена на примере проектирования ВЭС на площадке, выбранной по результатам оценки ВЭР, вблизи города Эс-Сухне (в провинции Хомс). На основании анализа программных обеспечений, позволяющих проводить расчеты в области ветроэнергетических расчетов, таких как WASP, WindFarmer, WindPRO, WindSim, Openwind, GH BLADED, Windographer и WindRose был выбрана для технической оценки рассмотренной ВЭС профессиональная программа комплекса WindPRO, являющимся общепринятым в мировой практике комплексом по проектированию ветроэлектрических станций с широкой базой данных, на который имеется лицензия в НОЦ "ВИЭ" СПбПУ. Ресурсно-энергетическая оценка строительства ВЭС у города Эс-Сухне предусматривает выполнение следующих шагов:

1. Оценка природно-климатических характеристик и географического положения площадки: площадка близки города Эс-Сухне, расположена на расстоянии 7 км к северу от города Эс-Сухне и на расстоянии 3 км к западу от главной дороги. Площадка свободна от любых обременений. Окружающий ландшафт – это плоская неиспользуемая пустынная территория без растительности. Земля является государственной собственностью.

2. Формирование файла исходных данных, включающих карту рассматриваемой площадки размером 50x50 км масштабом 1:250000, исходный ряд измерений характеристик ветрового режима на высоте 40м с метеостанции Эс-Сухне за 2 года и 4 месяца.

3. Создание цифровой модели рельефа на основе онлайн-базы данных Shuttle Radar Topography Mission (STRM). Размер карты – 50 км x 50 км, разрешение – 5 м.

4. Создание цифровой модели шероховатости подстилающей поверхности: для расчетов была оцифрована вручную области одинаковой шероховатости с топографических карт в соответствии с типами подстилающей поверхности. Размер карты – 70 км x 70 км.

5. Синтезирование ряда многолетней статистики наблюдений за ветром: в целях получения ряда многолетней ветровой статистики был выполнен прогнозный корреляционный анализ (MCP - Measure Corelate Predict) данных многолетних наблюдений (база реанализа CFSR-E).

6. Выполнены расчеты и получены основные характеристики ветрового потока (роза ветров, средняя скорость ветра, распределение Вейбулла и вероятность появления скорости ветра) в центре предполагаемой площадки на высоте 85м (соответствует высоте башни ВЭУ).

7. Построена карта ВЭР площадки строительства ВЭС и произведена предварительная оценка зон с наивысшими значениями удельной плотности ветрового потока (рисунок 17). Численное моделирование ветрового потока для создания карт ВЭР производится на основе теории Джексона и Ханта, основным предположением которой является линейность решений системы уравнений Навье-Стокса. Анализ карты ВЭР показали, что удельная плотность ветрового потока на рассматриваемой площадке составляет около 350-450 Вт/м².

8. Выбор оборудования ВЭС: 1) выбор класса ВЭУ - для заданной местности выбран класс Ша. 2) выбор типа ВЭУ – на основе результатов проведенного моделирования предложена ВЭУ с СГПМ как наиболее перспективная для Сирии. В результате анализа рынка производителей ВЭУ для сравнения были выбраны две ВЭУ с СГПМ мегаваттного класса от компаний VENSYS и GOLDWIND, которые имеют мощность 1,5 МВт, высоту башни 85 м и диаметр ветроколеса 82 м.

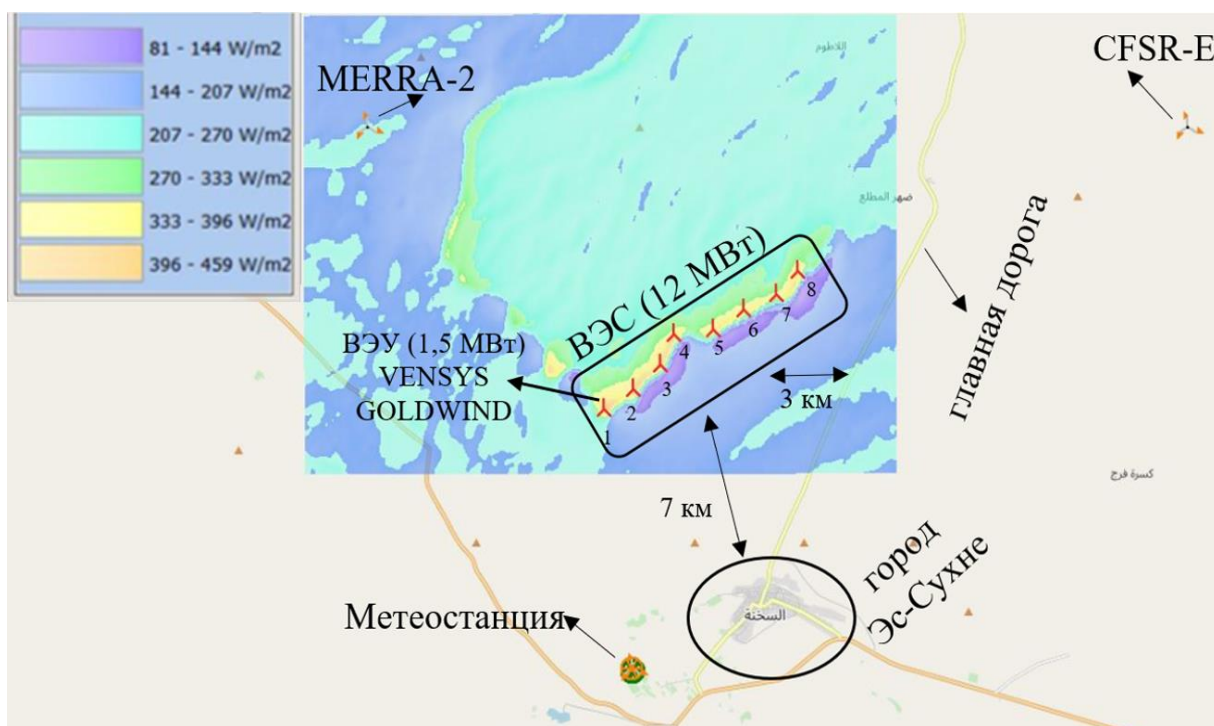


Рисунок 17 – Карта ВЭР и предлагаемая компоновка ВЭС в перспективной зоне строительства

9. Размещение ВЭУ на местности основывается на розе ветров площадки и рекомендуемых расстояниях между соседними установками. Основным показателем оптимальности расположения ВЭУ в составе ВЭС является коэффициент затенения соседними установками, который должен составлять не менее 98%. При диаметре ВК выбранных ВЭУ, составляющем $D=82$ м и мощности ВЭУ=1,5 МВт, на площадке можно разместить 8 ВЭУ

10. Определение установленной мощности ВЭС: с учетом параметров площадки установленная мощность ВЭС составит $8 \cdot 1,5 = 12$ МВт.

11. Расчет выработки ВЭС: результаты расчета выработки предлагаемой ВЭС для рассматриваемых моделей ВЭУ приведены в таблице 6. Согласно полученным результатам, выбрана установка VENSYS, имеющая лучшие значения выработки и КИУМ.

Таблица 6 – Анализ показателей выработки ВЭС при рассмотренных типах ВЭУ

Параметры	Тип ВЭУ	
	VENSYS	GOLDWIND
Выработка ВЭС (без учета потери), МВт·ч/год	42762,8	42181
Выработка ВЭС (с учетом только потери от затенения 0,2%), МВт·ч/год	42656,8	42081
Выработка ВЭС (с учетом суммарных потери 10,2%), МВт·ч/год	38391,1	37872,9
Число часов использования установленной мощности ($T_{исп}$), ч/год	3199	3156
КИУМ _{ВЭС} , %	36,5	36

12. Оценка экологической эффективности проекта показал, что рассматриваемая ВЭС с выработкой электроэнергии 38391,1 МВт·ч/год обеспечит энергией около 17200 человек, что превышает потребности всего населения города Эс-сухне и позволит сэкономить около 3301,04 т.н.э. в год и снизить выбросы около 25000 тСО₂/год.

13. Оценка экономической эффективности данного проекта выполнена в программе Excel, где рассчитаны экономические показатели проекта: чистый дисконтированный доход (Net Present Value NPV), дисконтированный срок окупаемости (Discounted Payback Period DPP), внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return IRR), индекс доходности (Profitability Index PI) и нормированная стоимость энергии (Levelized Cost of Energy $LCOE$) с помощью следующих формул:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 = \sum_{t=1}^T \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5)$$

$$DPP = \min T, \text{ при котором } \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} > I_0 \quad (6)$$

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - C_t}{(1+IRR)^t} - I_0 \quad (7)$$

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{I_0} = 1 + \frac{NPV}{I_0} \quad (8)$$

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{\mathcal{E}_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

где I_0 – капитальные вложения, R_t – доходы, достигаемые на t -м шаге проекта, C_t – затраты, осуществляемые на том же шаге, CF_t – денежный поток в период времени t , r – ставка дисконтирования, которая в данном проекте равняется 9%, T – жизненный цикл проекта, который в данном проекте равняется 20 лет, \mathcal{E}_t – выработка электроэнергии ВЭС в год, которое составляет в нашем случае 38391,1 МВт·ч/год.

Капитальные вложения (I_0) на ВЭС в этом исследовании определены на основе текущих рыночных цен (1497 \$/кВт). Таким образом, I_0 рассмотренной ВЭС при установленной мощности 12 МВт составляет 17964000 \cong 18 млн. долл.

Расходами (C_t) в данном проекте является годовые постоянные расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание ВЭС (Operations and Maintenance O&M). Текущие затраты на O&M для наземных ВЭС оцениваются в среднем с 20 до 60 \$/кВт/год или 1,5 до 2 % капитальных вложений. Стоимость рабочей силы в Сирии намного меньше, чем в США или Европе, поэтому расходы на O&M приняты 1,5% капитальных вложений или 22,45 \$/кВт в год. Таким образом, годовые расходы (C_t) рассмотренной ВЭС составят 269460 \$/год.

Годовые доходы R_t в этом исследовании состоят из доходов от сокращения выбросов парниковых газов и доходов от продажи электроэнергии, произведенной от рассматриваемой ВЭС. На основании закона № 1763, объявленный министерством электричества Сирии в 2016 году, инвестор может продать произведенную энергию от своей ВЭС государственному предприятию распределения и эксплуатации электрической энергии (Public

Establishment for Distribution and Exploitation of Electric Energy PEDEEE) по цене $\left(\frac{2500}{T_{\text{исп}}}\right) * 0,08$ €/кВт·ч если ($T_{\text{исп}} > 2500$). Таким образом, при курсе валюты (1€ = 1,12\$) предлагаемая ВЭС с выработкой электроэнергии 38391,1 МВт·ч/год обеспечит годовой доход, равный 2725768,1 \$/год. При стоимости тонны выбросов CO₂ 20 €/тCO₂, годовой доход от сокращения выбросов парниковых газов для предлагаемой ВЭС составляет 558974,08 \$/год. Таким образом, суммарные годовые доходы (R_t) составит 3284742,18 \$/год \cong 3,3 млн. долл.

Результаты расчетов экономических показателей показали, что LCOE, NPV, DPP, PI и IRR, составляют, соответственно, 0,058 \$/кВт·ч, 9,6 млн. долл., 9 лет, 1,53 и 16%. Таким образом, проект полностью прибыльный с точки зрения инвестора. Кроме того, с точки зрения сирийского государства, проект будет также прибыльным если оно профинансирует его, так как стоимость электроэнергии, вырабатываемой государственными электростанциями на ископаемом топливе в Сирии оценивалась в 2010 году в 0,16 \$/кВт·ч.

В четвертой главе также разработана методика обоснования технических и экономических параметров сетевой СФЭС для условий Сирии. Апробация методики выполнена на примере проектирования сетевой СФЭС мощностью 300 кВт недалеко от деревни Умм-эль-Зайтун в провинции Эс-Сувайда. Место выбрано из анализа созданного автором атласа солнечных ресурсов. Место характеризуется высокой среднегодовом приходом солнечной радиацией на горизонтальной поверхности около 1900 кВт·ч/м² (местоположение недалеко от точки 48 на рисунке 6). На основании анализа программных обеспечений, позволяющих проводить расчеты в области фотоэнергетических расчетов, таких как SAM, PVSyst, PVSOL, Solarius PV, HelioScope, Solar Pro, SOLARGIS и PV F-Chart был выбрана для технической оценки рассмотренной СФЭС профессиональная программа PVSyst, являющимся промышленным стандартом для моделирования фотоэлектрических систем, поскольку он имеет дело с сетевой СФЭС, автономными СФЭС, насосными СФЭС и сетевой СФЭС с постоянным током, а также включает в себя большие базы данных для метеорологических данных и компонентов фотоэлектрической системы. Ресурсно-энергетическая оценка строительства рассмотренной СФЭС в деревне Умм-эль-Зайтун проведена в PVSyst с выполнением следующих шагов:

1. Выбор местоположения СФЭС: солнечный атлас Сирии, построенный в главе 2, показывает, что юго-восточная часть Сирии имеет наибольшую солнечную радиацию на горизонтальной поверхности и на наклонной поверхности с оптимальным углом наклона. В связи с этим для строительства предлагаемой сетевой СФЭС выбрана деревня Умм-эль-Зайтун в провинции Эс-Сувайда. Деревня Умм-эль-Зайтун находится в районе Шахба. Она расположена недалеко от дороги Дамаск-Эс-Сувайда, в 6 км от города Шахба и в 74 км от города Дамаск. Население Умм-эль-Зайтуна составляло 1913 человек.

2. Формирование метеорологических исходных данных: PVSyst импортирует из базы данных NASA (1983-2005) среднемесячные значения прихода суммарной и диффузной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, температуры и альбедо для данного местоположения. Среднегодовой приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность данного местоположения СФЭС составляет 1888,7 кВт·ч/м² в год.

3. Определение горизонта местоположения (путь движения Солнца): путь движения Солнца в течение года для выбранного местоположения изображен графически в PVSyst путем построения высотных углов Солнца по оси y и азимутальных углов солнца по оси x.

4. Определение ориентации и оптимального угла наклона ФЭМ: Использование PVSyst позволяет оптимизировать ориентацию и угол наклона ФЭМ. В нашем случае оптимизированный угол наклона ФЭМ и азимута составляют 25° и 0° соответственно, при этом суммарный среднегодовой приход солнечной излучения на оптимальную наклонную площадку равен 2066 кВт·ч/м²/год. Отмечено, что значения оптимального угла наклона (25°) и падающего излучения на наклонной плоскости (2066 кВт·ч/м²) находятся в диапазоне значений сирийского солнечного атласа, построенного в главе 2, для выбранного места (см. рисунки 5 и 6).

5. Выбор компонентов и определение размера системы: при выборе компонентов и определении размера системы приняты в рассмотрение следующие условия:

- Согласование мощности постоянного и переменного тока: номинальная мощность инвертора должна находиться в пределах $\pm 20\%$ от мощности ФЭБ на STC.
- Совпадение напряжения: рабочий диапазон инвертора должен быть согласован с вольтамперной характеристикой солнечной батареи. Таким образом, точки максимальной мощности ФЭБ должны находиться в пределах диапазона напряжений в точках максимальной мощности инвертора. Напряжение ФЭБ зависит от температуры, поэтому при определении размера системы рассматриваются крайние случаи зимней и летней эксплуатации.
- Совпадение тока: максимальный ток ФЭБ не должен превышать максимальный входной ток инвертора.

Как было показано выше в результате моделирования в MATLAB для строительства СФЭС мощностью 300 кВт в деревне Умм-эль-Зайтун были предложены следующие элементы из базы данных PVsyst: ФЭМ типа SunPower SPR-415E-WHT-D мощностью 415 Вт и центральный инвертор Bosch BPT-C300 от производителя Bosch Power Tec мощностью 300кВт.

С учетом природных и климатических условий, в т. ч. изменении температуры поверхности модулей и среднегодового прихода солнечной радиации для предлагаемой СФЭС мощностью 300 кВт количество ФЭМ составило 720 штук. Общая площадь ФЭМ составила 1557 м^2 и угол наклона ФЭМ принят постоянным для всего года и равным 25° .

6. Размещение ФЭБ на местности: на рисунке 18 приведен генеральный план размещения оборудования СФЭС, где 720 ФЭМ объединены в 24 ФЭБ в 2 ряда. Каждый ряд имеет 12 ФЭБ и расстояние между рядами составляет 4 м. Каждая ФЭБ имеет ширину ($L=5,23 \text{ м}$), длину ($e=12,40 \text{ м}$) и включает 30 ФЭМ. Каждая ФЭБ наклонена на оптимальный угол наклона ($\beta=25^\circ$) и ориентирована непосредственно на юг. Расстояние между отдельными ФЭБ, равное 10 м ($d=10 \text{ м}$) было выбрано с учетом потерь на затенение равных $1,5\%$. Общая площадь земли, отводимой под строительство предлагаемой СФЭС, составила ($120 \times 29 = 3456 \text{ м}^2$).

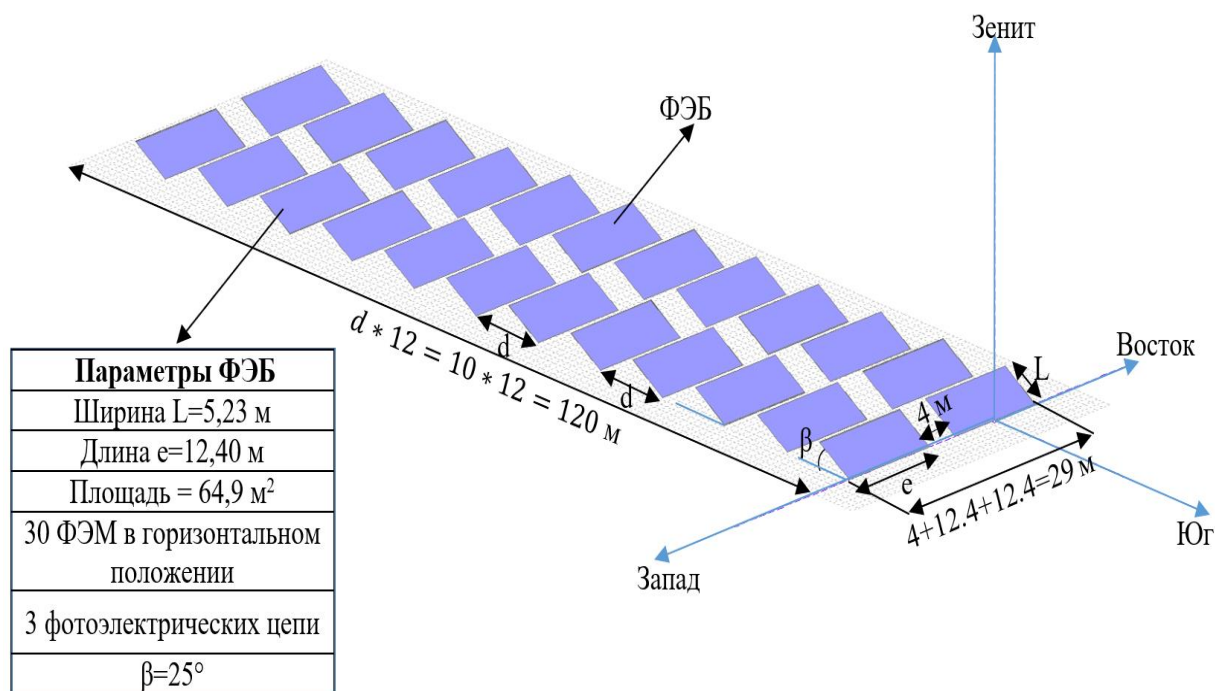


Рисунок 18 – Генеральный план размещения оборудования СФЭС

7. Расчет выработки СФЭС: результаты моделирования показали, что полезная энергия (выработка), подаваемая в сеть с учетом всех потерь, составила $493 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год}$ (рисунок 19). Оптические потери составили $7,2\%$, потери в ФЭМ и на коммутацию в ФЭБ составили

12,4% и потери при трансформации и передаче энергии составили 2,9% (рисунок 19). КИУМ предлагаемой СФЭС составил 18,7%. Число часов использования установленной мощности составило 1640 часов в год.

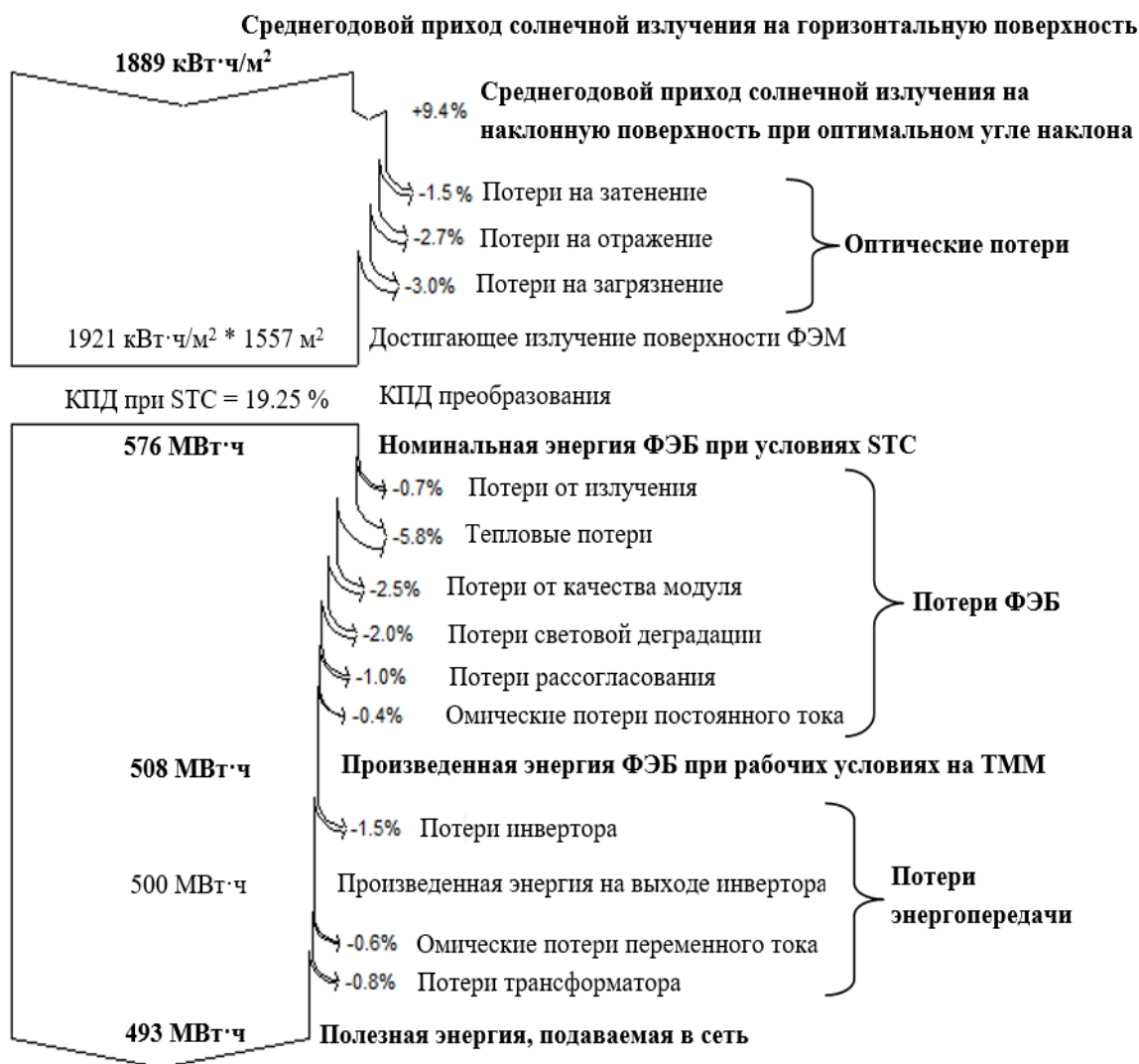


Рисунок 19 – Диаграмма потерь предлагаемой СФЭС

8. Оценка экологической эффективности проекта показал, что рассматриваемая СФЭС с выработкой электроэнергии 493 МВт·ч/год обеспечит около 220 человек в год (около 12% населения деревни Умм-эль-Зайтун) и позволит сэкономить около 42,4 т.н.э. в год и снизить выбросы около 320,45 т CO₂/год.

9. Оценка экономической эффективности данного проекта выполнена в программе Excel, где рассчитаны *NPV*, *DPP*, *IRR*, *PI*, *LCOE* при $r = 9\%$ и $T = 25$ лет.

Капитальные вложения (I_0) на СФЭС в этом исследовании определены на основе текущих рыночных цен (1388 \$/кВт). Таким образом, I_0 составляет 416400 \$.

Текущие затраты на O&M для сетевой СФЭС мощностью от 100 до 1000 кВт оцениваются 20 \$/кВт/год. Расходы на O&M приняты для Сирии на 25-50% меньше или 13,5 \$/кВт/год. Таким образом, годовые расходы (C_t) рассмотренной СФЭС составят 4050 \$/год.

На основании закона № 1763 инвестор может продать произведенную энергию от своей СФЭС к PEDEEE по цене 0,106 €/кВт·ч, если установленная мощность СФЭС составляет от 101 до 1000 кВт. Таким образом, при курсе валюты (1€ = 1,12\$) предлагаемая СФЭС с выработкой электроэнергии 493 МВт·ч/год обеспечит годовой доход, равный 58667 \$/год. При стоимости тонны выбросов CO₂ 20 €/тCO₂, годовой доход от сокращения выбросов парниковых газов для предлагаемой ФЭС составляет 7178,1 \$/год. Таким образом, суммарные годовые доходы (R_t) составили 65845,1 \$/год.

Результаты показали, что LCOE, NPV, DPP, PI и IRR, составили, соответственно, 0,094 \$/кВт·ч, 190587,3 \$, 11 лет, 1,46 и 14%. Таким образом, проект полностью прибыльный с точки зрения инвестора и с точки зрения сирийского государства, если оно профинансирует этот проект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Сирия по своим климатогеографическим условиям обладает значительными и неисчерпаемыми ресурсами солнечной энергии, практически привлекательными ресурсами ветровой энергии, которые целесообразно использовать для развития энергетики страны.

2. На основе электронного ресурса (Global Wind Atlas) и программы (Google Earth) разработана методика и проведены оценки валовых и технических ресурсов ветровой энергии для территории Сирии. Общий валовый потенциал ветровой энергии территории Сирии на высоте 50 м составляет 13678 ТВт·ч/год, расчётный технический потенциал ветровой энергии Сирии при необходимой площади $q = 7,5\%$ (13890 км²) от общей составляет 48,32 ТВт·ч/год.

3. На основе электронных ресурсов (Solar Atlas for the Mediterranean и базы метеоданных NASA) и программ (Google Earth и ArcGIS) разработаны методики и проведены оценки природного и технического потенциала солнечной энергии территории Сирии на горизонтальную поверхность. Валовый потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность составляет около 345406 ТВт·ч/год. Технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии при необходимой площади $q = 0,09\%$ (167 км²) составляет около 49,74 ТВт·ч/год.

4. Разработана методика, проведены расчеты и построен атлас прихода солнечной энергии на наклонную площадку с выбором оптимальных углов наклона солнечных батарей на характерных территориях Сирии. Показано, что среднегодовой приход солнечной энергии на наклонную площадку на территории Сирии изменяется в диапазоне от 1859 кВт·ч/м²·год до 2069 кВт·ч/м²·год. Общий природный (валовый) потенциал солнечной энергии в Сирии на оптимальные наклонные площадки составляет 362100 ТВт·ч/год, расчётный технический потенциал солнечной энергии на оптимальные наклонные площадки Сирии, при необходимой площади $q = 0,18\%$ (334 км²) составляет 52,14 ТВт·ч/год.

5. Разработаны в среде MATLAB адекватные и достоверные модели элементов ВЭУ, подключённой к электрической сети с параметрами энергосистемы Сирии, с различными типами генераторов для расчета их параметров и режимов работы.

6. Результаты моделирования ВЭУ с асинхронным генератором с беличьей клеткой (АГБК) показали, что использование генератора такого типа при изменении скорости ветра от 8,1 м/с до 13 м/с позволяет регулировать частоту вращения только от 1,00013 о.е. до 1,0072 о.е. что говорит о низкой эффективности преобразования ветровой энергии.

7. Для исследования режимов работы ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания (АГДП) проведено компьютерное моделирование с рассмотрением сверхсинхронных и подсинхронных режимов работы при изменении скорости ветра. Результаты моделирования показали, что ВЭУ с АГДП обеспечивает регулирование частоты вращения от 0,58 о.е. до 1 о.е. при изменении скорости ветра от 7 м/с до 13 м/с, что значительно эффективнее чем у ВЭУ с АГБК.

8. Для исследования режимов работы ВЭУ с синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ) при изменении скорости ветра проведено компьютерное моделирование электроэнергетических элементов такой ВЭУ с помощью готовых и созданных моделей в среде MATLAB. Результаты моделирования показали, что ВЭУ с СГПМ позволяет регулировать частоту вращения генератора в полном диапазоне от 0,2 о.е. до 0,995 о.е. при изменении скорости ветра от начальной 3 м/с до номинальной 13 м/с. Таким образом, данный вариант наиболее эффективно преобразовывает энергию ветра.

9. Разработана в среде MATLAB адекватная и достоверная модель СФЭС мощностью 300 кВт, подключённой к электрической сети энергосистемы Сирии, и проведены расчеты

ее параметров и режимов работы при изменении солнечного излучения и температуры окружающей среды с реализацией схемы управления максимизации мощности СФЭС с блоком слежения за точкой максимальной мощности с процентной ошибкой, не превышающей 2 %.

10. Разработана и апробирована методика обоснования технических и экономических параметров сетевой ВЭС на примере проекта сетевой ВЭС мощностью 12 МВт вблизи города Эс-Сухне (в провинции Хомс), отобранная на основе созданного атласа ветров, как обладающая высоким ветровым потенциалом. Результаты микромасштабного моделирования ветрового потока в программном комплексе WindPRO показали, что удельная плотность ветрового потока рассматриваемой площадки строительства ВЭС на высоте башни ВЭУ составляют 333-459 Вт/м² при среднемноголетних скоростях ветра 6,5-7,7 м/с. Для ВЭС с 8-ю ВЭУ мощностью 1,5 МВт, получено значение среднегодовой выработки энергии 38391,1 МВт·ч/год. КИУМ ВЭС составил 36,5 % при числе часов использования установленной мощности 3199 часов. Полученное значение выработки обеспечит электроэнергией все население города Эс-Сухне, сэкономит около 3301,04 т.н.э./год и позволит снизить выбросы парниковых газов в объеме 24954,2 тСО₂/год. Экономические показатели проекта LCOE, NPV, DPP, PI и IRR, составляют, соответственно, 0,058 \$/кВт·ч, 9,6 млн. долл., 9 лет, 1,53 и 16%.

11. Разработана инженерная методика обоснования технических и экономических параметров СФЭС для систем энергоснабжения Сирии. Апробация методики выполнена на примере проектирования СФЭС мощностью 300 кВт в деревня Умм-эль-Зайтун в провинции Эс-Сувайда, которая характеризуется годовым приходом солнечной радиации на горизонтальную поверхность около 1900 кВт·ч/м². Результаты технической оценки в программном обеспечении PVsyst показали, что годовой оптимальный угол наклона фотоэлектрических модулей составляет 25°, выработка электроэнергии составляет 493 МВт·ч/год и КИУМ составляет 18,7% при числе часов использования установленной мощности 1638 часов. Предлагаемая СФЭС обеспечит электроэнергией около 12% населения деревни Умм-эль-Зайтун, позволит сэкономить около 42,4 т.н.э./год и снизить выбросы около 320,45 тСО₂/год. Экономические показатели проекта LCOE, NPV, DPP, PI и IRR, составляют, соответственно, 0,094 \$/кВт·ч, 190587,3 \$, 11 лет, 1,46 и 14%.

12. Предлагаемые проекты строительства ВЭС и СФЭС являются прибыльными с точки зрения инвестора и с точки зрения сирийского государства, если оно профинансирует эти проекты. Полученные результаты могут быть практически использованы для строительства в будущем ВЭС и СФЭС в предлагаемых местах на территории Сирии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

1. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Компьютерное моделирование сетевой ветроэнергетической установки с асинхронным генератором // *Электричество*, 2017, № 12, С. 4-11.
2. **Рамадан А.**, Денисов Р.С. Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB SIMULINK // *Вестник аграрной науки Дона*, 2017, Т. 3, № 39, С. 11-20.
3. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Оценка прихода солнечной энергии и выбор оптимального угла наклона солнечной батареи для условий Сирии // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*, 2018, № 22-24 (270-272), С. 12-27.
4. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Моделирование и управление сетевой ветроэнергетической установкой с асинхронным генератором двойного питания // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2018, Т. 24, № 3, С. 22-37.
5. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Моделирование режимов работы сетевой ветроэнергетической установки с синхронным генератором на постоянных магнитах // *Электричество*, 2019, № 7, С. 11-21.

6. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Моделирование режимов работы солнечной фотоэлектрической станции со слежением за точкой максимальной мощности // Энергетик, 2019, № 11, С. 34-39.
7. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Методика обоснования технических и экономических параметров сетевой ветроэлектрической станции для условий Сирии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2020, № (1-6), С. 12-30.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

1. Elistratov Viktor, **Ramadan Amer**. Energy potential assessment of solar and wind resources in Syria // Journal of Applied Engineering Science, 2018, vol. 16, No. 2, pp. 208-216.
2. **Ramadan A.**, Elistratov V. Techno-Economic Evaluation of a Grid-Connected Solar PV Plant in Syria // Applied Solar Energy, 2019, Volume 55, Issue 3, pp. 174–188.

Публикации в изданиях и в сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ

1. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Потенциал традиционных и возобновляемых источников энергии в Сирии // Энергохозяйство за рубежом, 2017, № 5 (294), С. 15-21.
2. **Рамадан А.** Потенциал возобновляемых источников энергии в Сирии // Сборник докладов молодежной научно-практической конференции в рамках Недели науки СПбПУ, СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014, С. 49-51.
3. **Рамадан А.**, Елистратов В.В. Использование возобновляемых источников энергии в Сирии // Материалы V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», Махачкала, 2017, С. 135-141.
4. **Рамадан А.М.**, Елистратов В.В. Использование потенциала ветровой энергии для энергоснабжения провинции Хомс (Сирия) // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность», Севастополь, 2018, С. 983-986.
5. **Рамадан А.** Определение энергетического потенциала солнечных и ветровых ресурсов на территории Сирии // Неделя науки СПбПУ 2017: материалы научного форума с международным участием, СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017, С. 282-284.
6. **Рамадан А.**, Денисов Р.С. Моделирование режимов работы ВЭУ с асинхронным генератором в MATLAB SIMULINK // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием, СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015, С. 222-224.
7. **Рамадан А.** Исследование режимов работы сетевой ВЭУ 1,3 МВт с асинхронным генератором в MATLAB SIMULINK // Политехническая неделя в Санкт-Петербурге: материалы научного форума с международным участием, СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016, С. 163-166.