

На правах рукописи



Рамадан Амер

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

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в ВШ «Гидротехнического и энергетического строительства» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель:

Елистратов Виктор Васильевич
Доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы «гидротехнического и энергетического строительства» ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Тягунов Михаил Георгиевич
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва.

Виноградова Анна Владимировна
Кандидат технических наук, инженер 1-й категории, Управление проектирования АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «28» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.14.08 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Гидрокорпус-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.14.08,
д.т.н., с.н.с.



Куколев М. И.

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 диссертационной 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 энергетики 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:
 - а) модели оборудования сетевой ВЭУ с различными типами генераторов.
 - б) 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 PVsyst и Excel.

Основные положения, выносимые на защиту:

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 отсутствуют.

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 расчета 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, четырёх 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.. 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%). В 2018 г. установленная мощность составила 9982 МВт, в том числе на ТЭС – 8489 МВт (85%) и на ГЭС – 1493 МВт (15%). Стоимость электроэнергии, производимой тепловыми электростанциями Сирии, составила 0,16 \$/кВт·ч в 2010 г. В Сирии в силу природного-климатических условий 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.

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. Сотрудничество между сирийским министерством электричества и немецкой компанией "DECON" в течение 2004-2006 гг. позволил выделить несколько перспективных площадей с высоким потенциалом ветровой энергии. На одной из них в 2019 г. была установлена сетевая ветроэлектрическая установка (ВЭУ) мощностью 2,5 МВт. В Сирии существуют в настоящее время планы развития ветровой энергетики с повышением её доли в производстве электроэнергии.

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.

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/м² 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 $N_{cp,i}$, Вт/м² на высоте 50 м,

$$N_{cp,i} = \frac{1}{2} * \rho * \beta^3 * \Gamma(1 + \frac{3}{\gamma}) \quad (1)$$

где: β , γ – параметры распределения Вэйбулла; Γ – гамма-функция; ρ – плотность воздуха (кг/м³); i – номер зоны.

Карта удельной мощности ветрового потока была интегрирована в программу Google Earth и был выделено семь зон по средним значениям удельной плотности (рисунок 1). Инструменты программы Google Earth использовались также для расчета площади каждой зоны S_i .

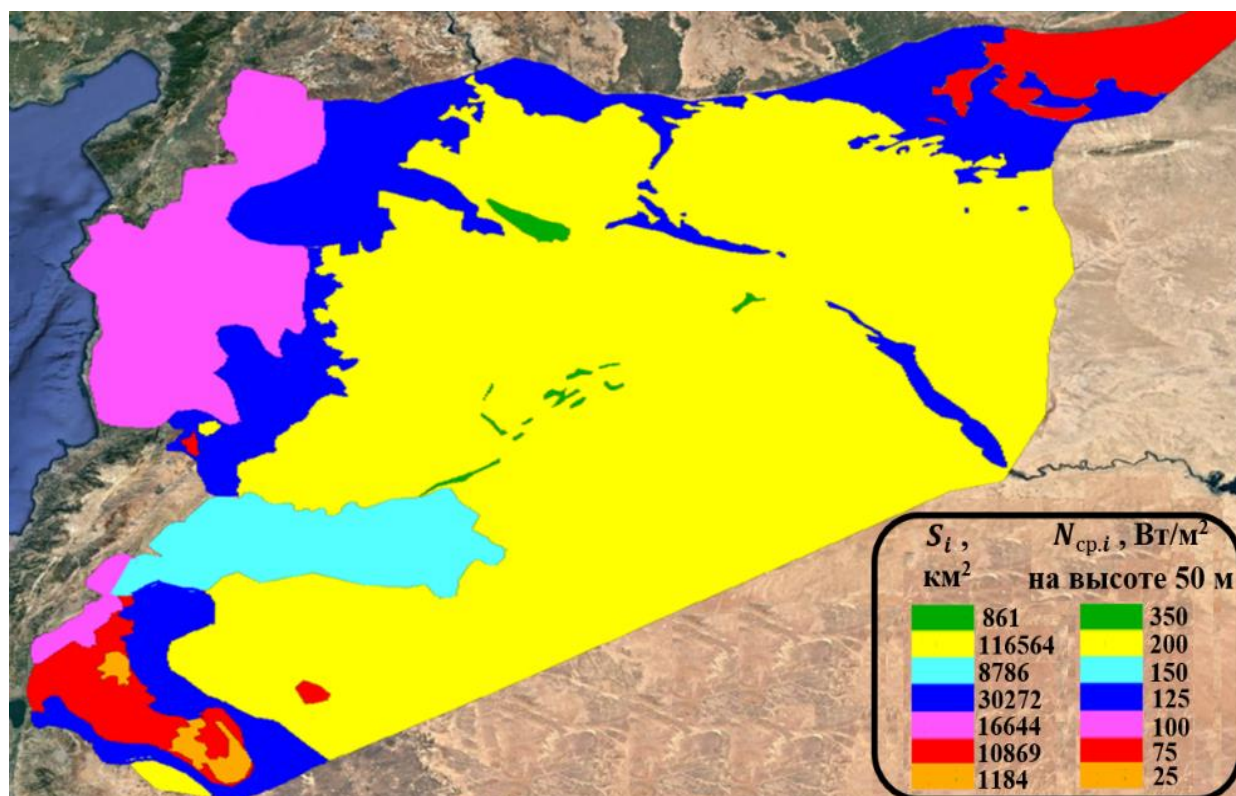


Рисунок 1 – Зонирование территории Сирии по средней удельной мощности ветрового потока на высоте 50 м ($N_{cp,i}$, Вт/м²) и определение площади S_i каждой зоны

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

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

где: $\mathcal{E}_{i,\text{в}}$ – валовый (природный) потенциал ветровой энергии каждой 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 км²) 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 2).

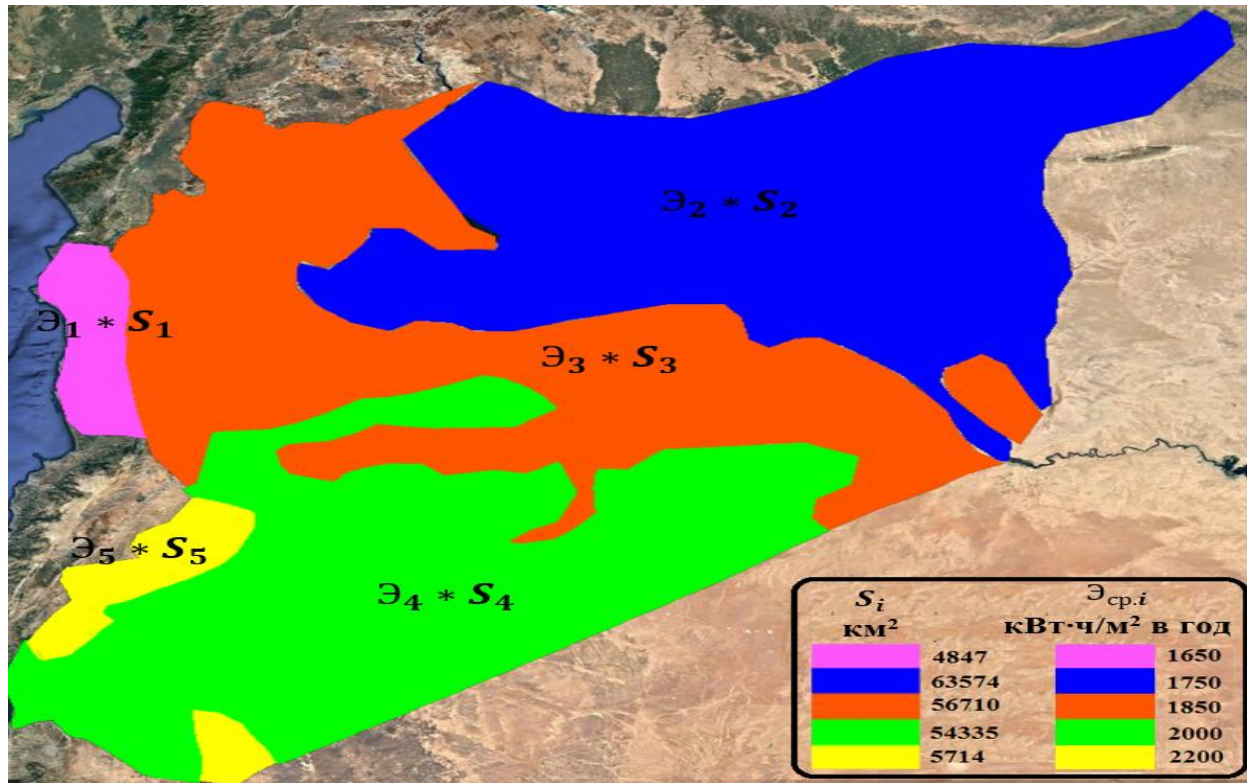


Рисунок 2 – Зонирование территории Сирии на S_i зон по среднегодовому значению удельного прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность

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

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

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

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

где: $\eta_{\text{ФЭС}}$ – 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 км²) 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.

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, характеризующиеся оптимальным углом наклона солнечной батареи и значения удельного годового прихода солнечной энергии на эти оптимальные площадки (рисунки 3 и 4). Показано, что годовой оптимальный угол наклона солнечной батареи для территории Сирии изменяется в диапазоне от 23° до 28°, при этом среднегодовой удельный 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.

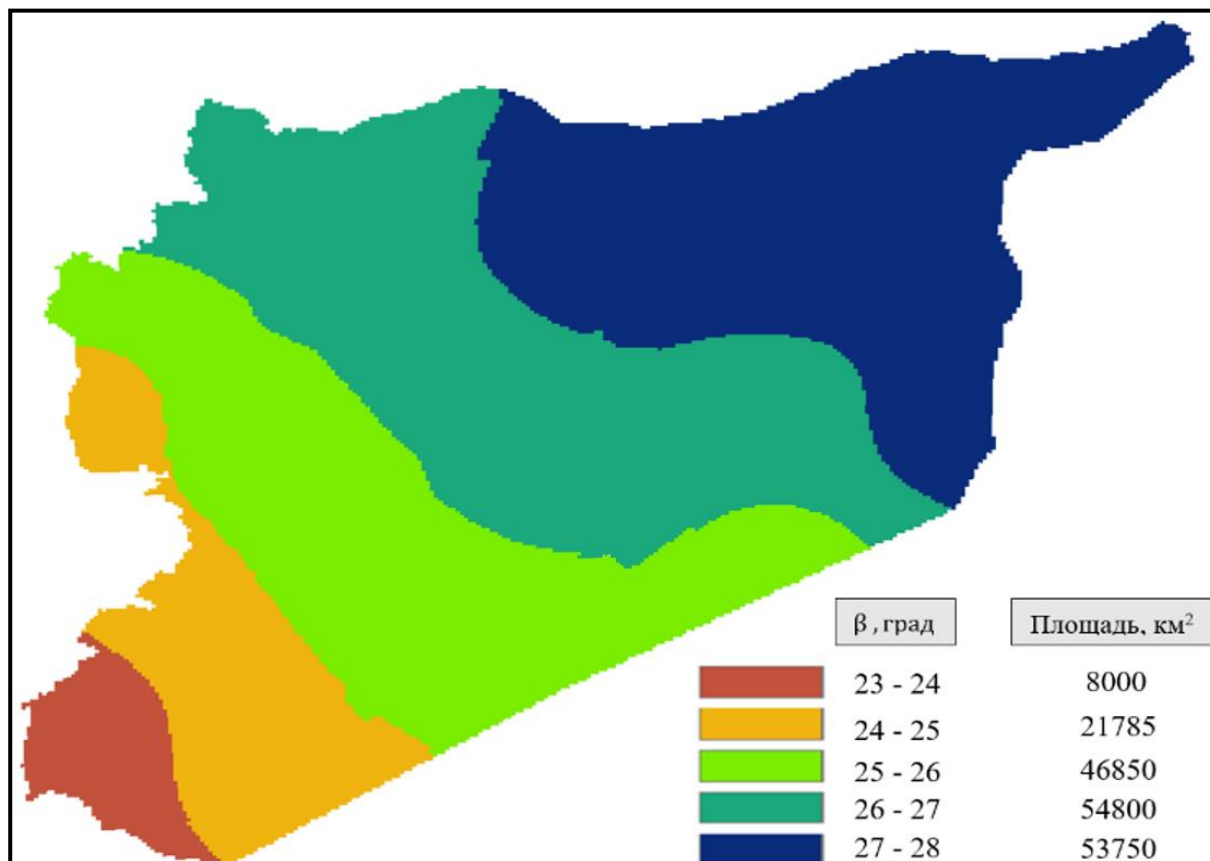


Рисунок 3 – Годовой оптимальный угол наклона солнечной батареи

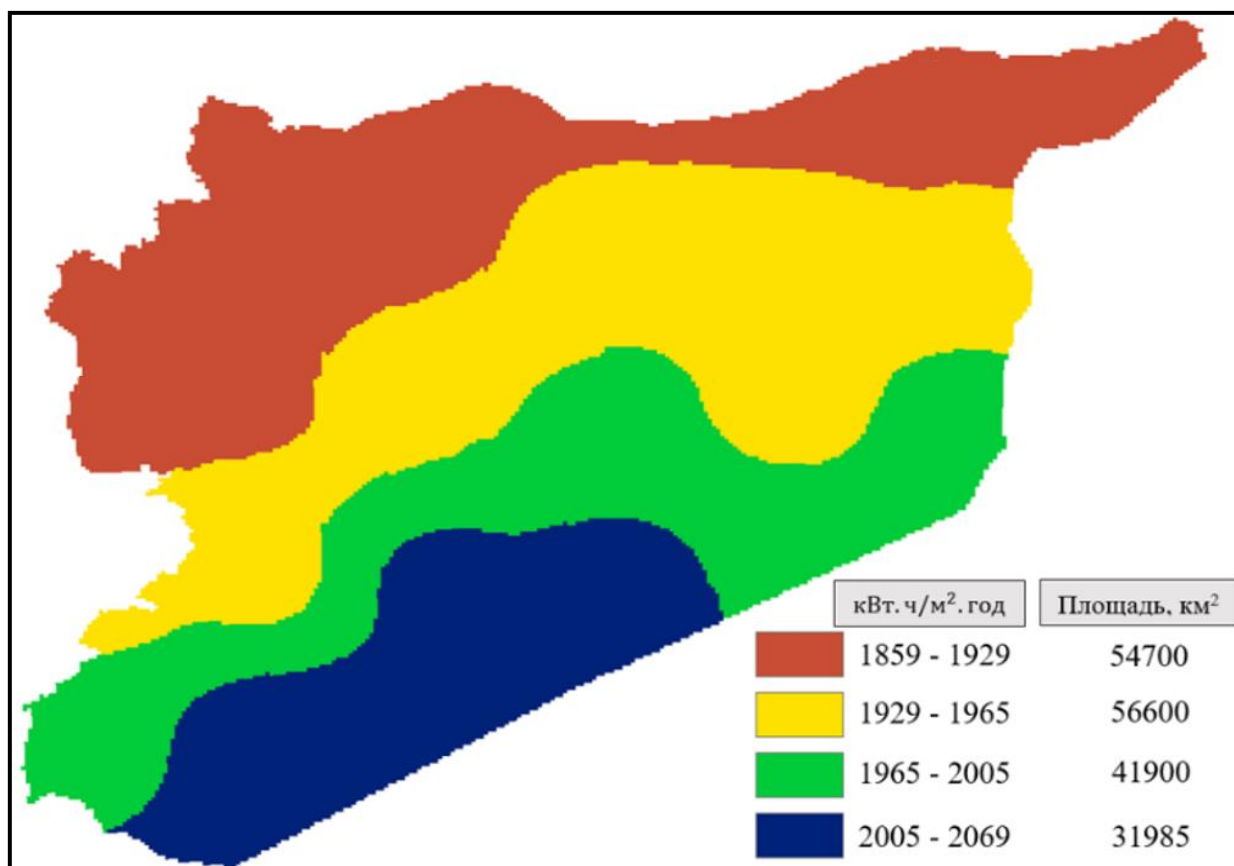


Рисунок 4 – Средний удельной приход солнечной энергии на оптимальную площадку

Во третьей главе для математического моделирования элементов энергоустановки и систем на основе ВИЭ проведен анализ существующего программного обеспечения (ПО), таких как HYBRID DESIGNER, HYBRID2, INSEL, iHOGA, 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 (СППМ)) 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 интенсивности солнечного излучения и температуры поверхности модулей.

На рисунке 5 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:

- ВЭУ с постоянной частотой вращения с генератором АГБК.
- ВЭУ с частично-переменной частотой вращения с генератором АГДП.
- ВЭУ с полно-переменной частотой вращения с генератором СППМ.

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

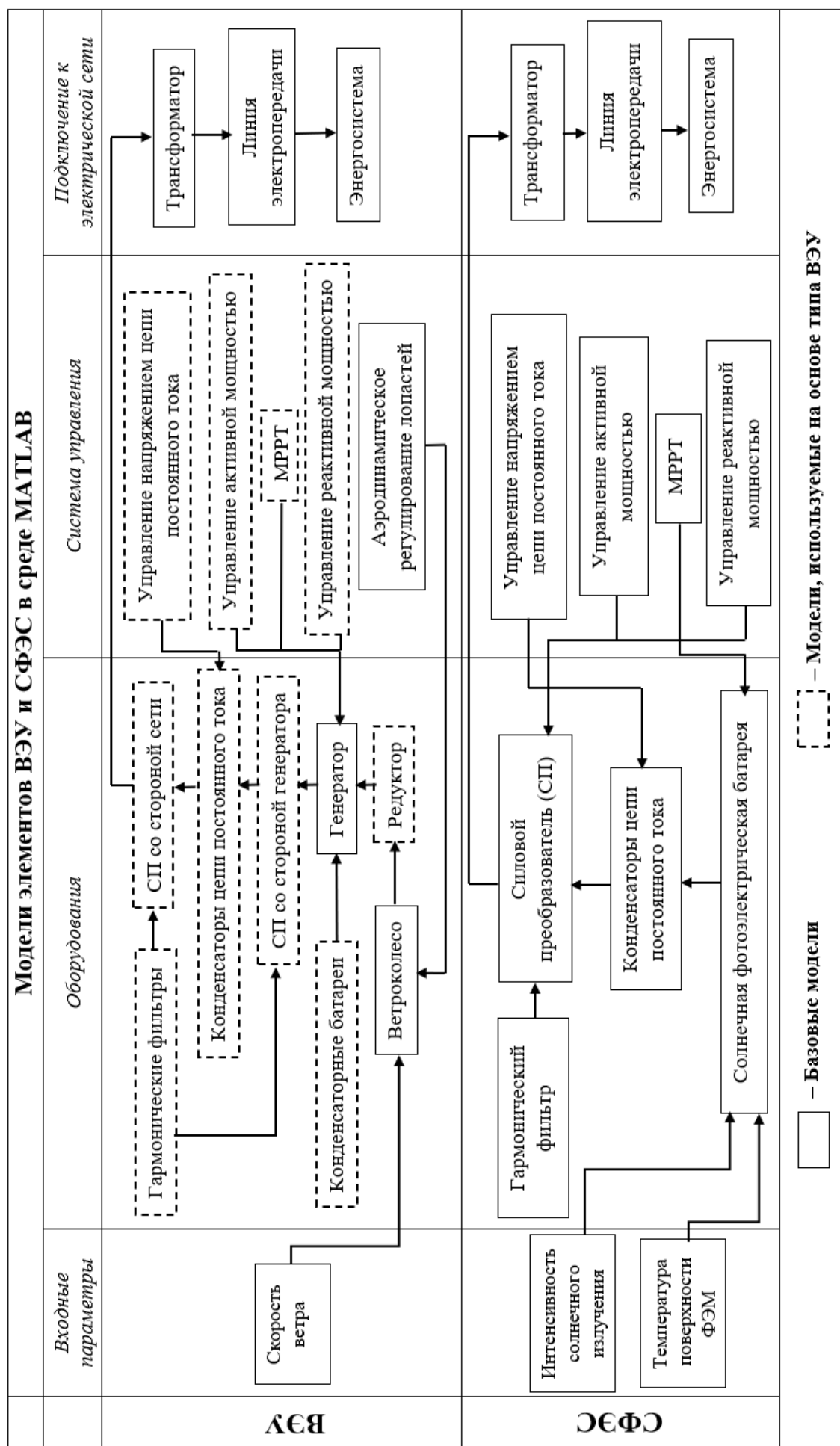


Рисунок 5 – Блок-схема методики расчета параметров и режимов работы ВИЭ в среде MATLAB

Задачей моделирования для каждого типа оборудования являются определение 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.

В качестве примера формирования в MATLAB расчетных моделей ВЭУ на рисунке 6 приведена структура моделей ВЭУ с СГПМ. Модели оборудования объединены в следующие подсистемы:

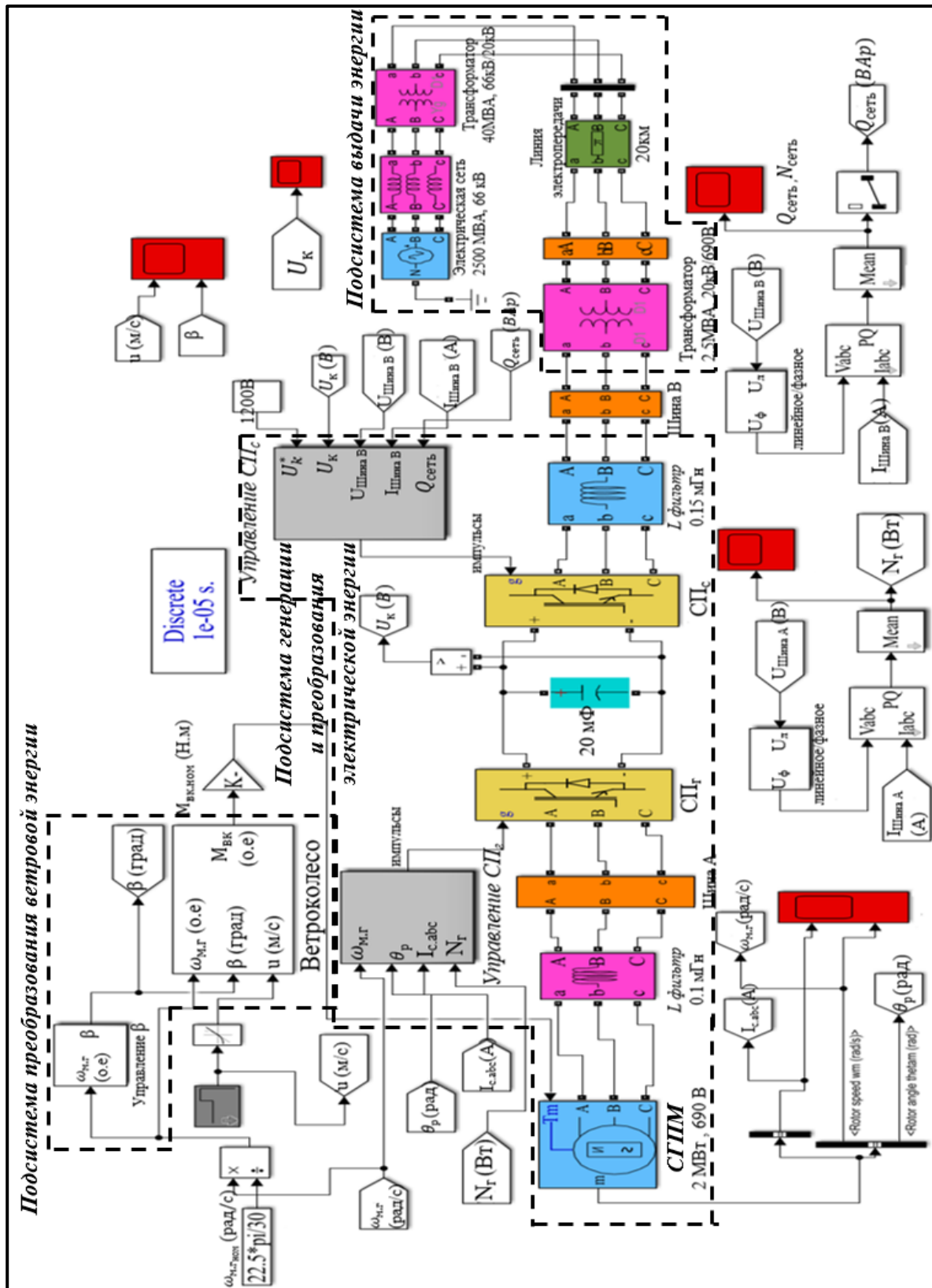


Рисунок 6 – Обобщенная модель сетевой ВЭУ с СГПМ в MATLAB

- Подсистема преобразования ветровой энергии, включающая:
 - модель ветроколеса,
 - модель Pitch-регулирования лопасти ветроколеса.
- Подсистема генерации и преобразования электрической энергии, включающая:
 - модель синхронного генератора с постоянными магнитами на поверхности ротора (мощность 2 МВт = 1 о.е. и напряжение 690 В),
 - модели силового преобразователя со стороны генератора (СП_Г) и со стороны сети (СП_С),
 - модель конденсатора в цепи постоянного тока,
 - модели гармонических фильтров,
 - модель управления СП_Г для управления активной мощностью генератора со слеживанием за точкой максимальной мощности (MPPT),
 - модель управления СП_С для управления напряжением в цепи постоянного тока на конденсаторе и реактивной мощностью.
- Подсистема выдачи энергии, включающая:
 - модель трансформатора мощностью 2,5 МВА на 690В/20кВ,
 - модель трансформатора мощностью 40 МВА на 20кВ/66кВ,
 - модель электрической сети мощностью 2500 МВА, частотой 50 Гц, к которой ВЭУ подключается по трехфазной линии электропередачи длиной 20 км.

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 7).

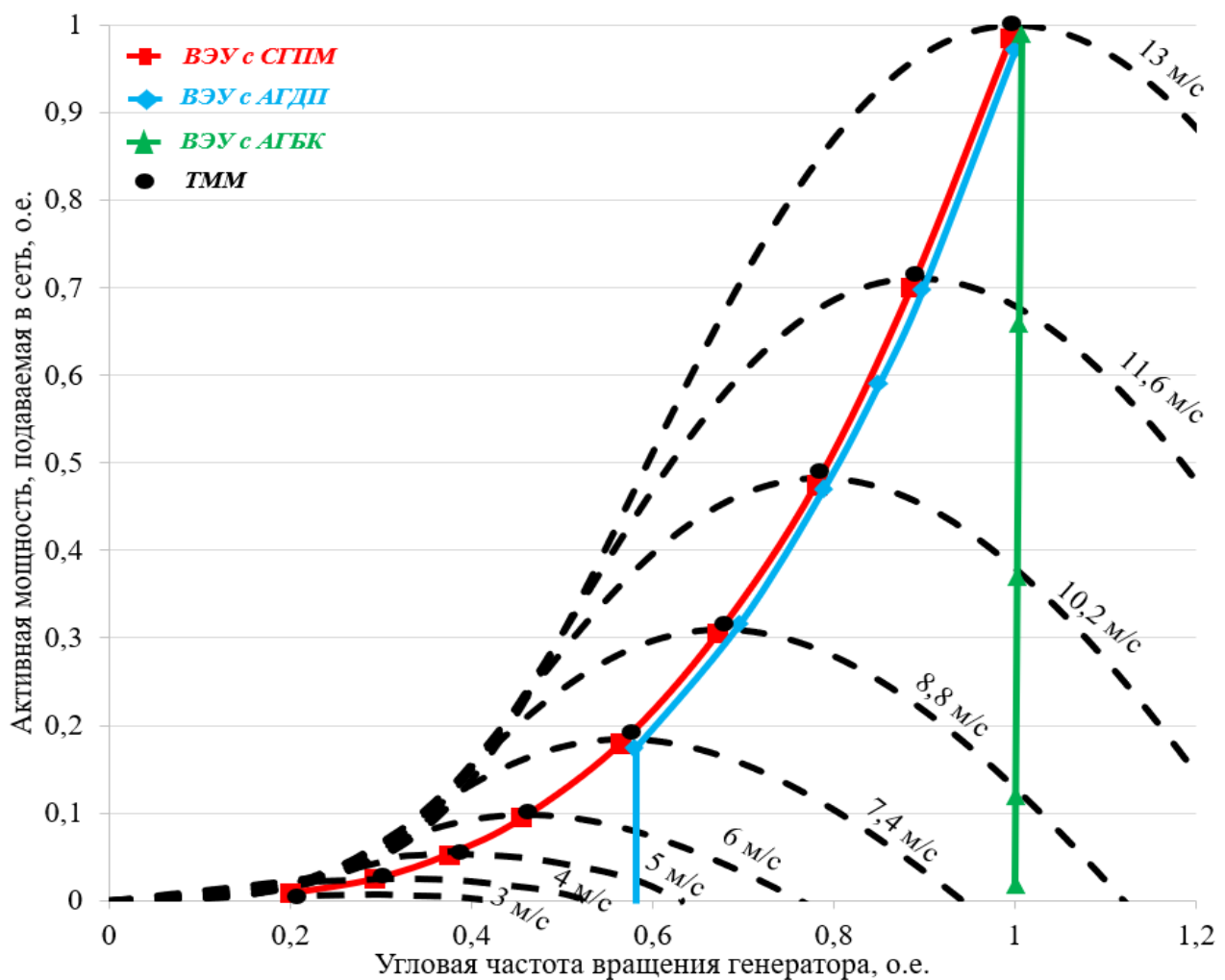


Рисунок 7 – Зависимость активной мощности, подаваемой в сеть, от угловой частоты вращения генератора для всех типов ВЭУ

Анализ результатов моделирования на рисунке 7 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

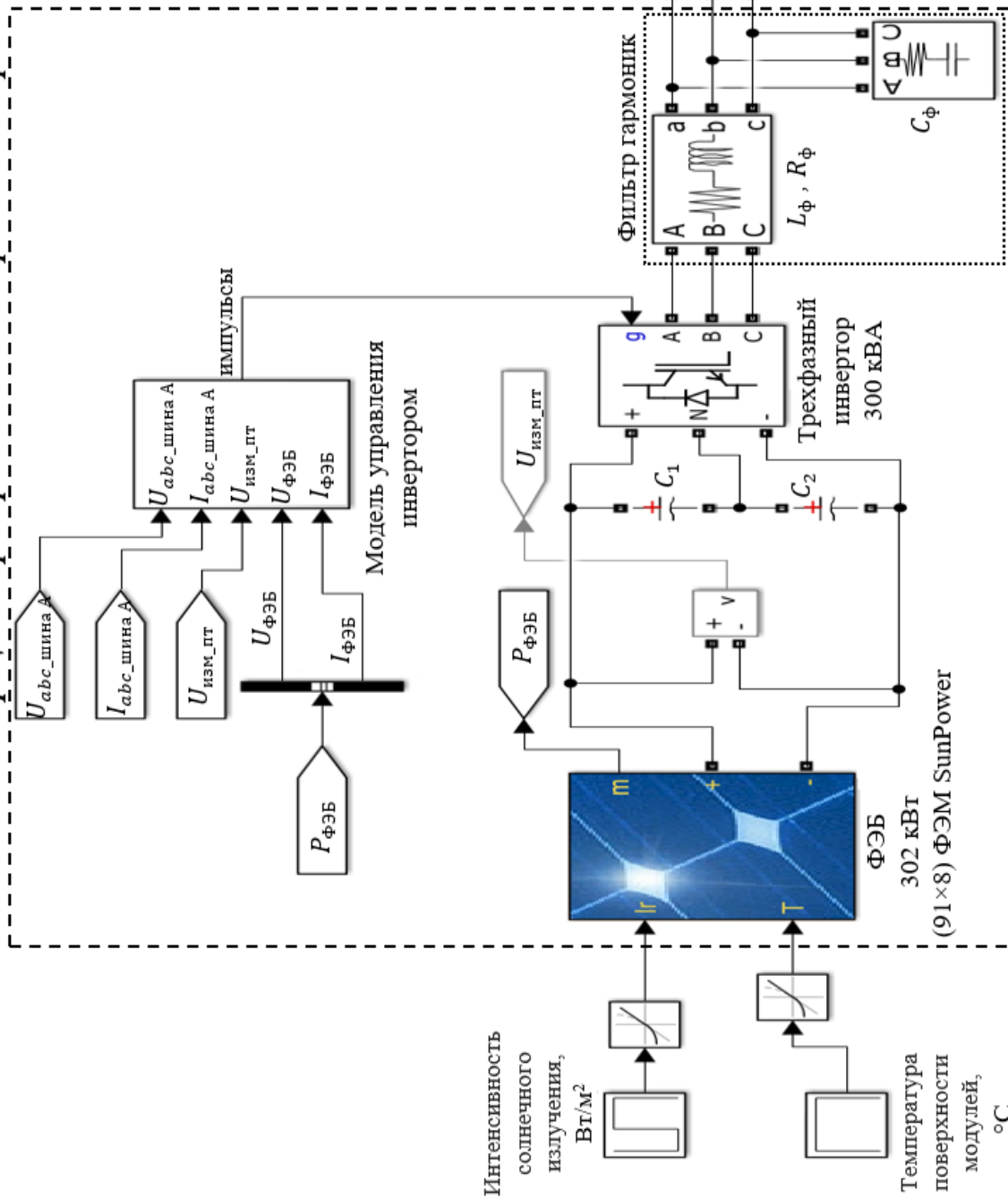
Сетевая СФЭС можно разделить на две категории: двухступенчатая и одноступенчатая. Двухступенчатая сетевая СФЭС состоит из повышающего преобразователя постоянного тока и инвертора. Поэтому она имеет достаточно простую схему управления, но более сложную структуру оборудования, более высокую стоимость и большие потери энергии по сравнению с одноступенчатой сетевой СФЭС. Поэтому в работе исследованы режимы работы одноступенчатой сетевой СФЭС с центральным инвертором. Структура моделей СФЭС в MATLAB показана на рисунке 8. Модели оборудования объединены в следующие подсистемы:

- Подсистема генерации и преобразования электрической энергии, включающая:
 - Модель солнечной фотоэлектрической батареи (ФЭБ): ФЭБ состоит из 91-го 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. При стандартных условиях испытания (STC) максимальная выходная мощность ФЭБ составляет $P_{\text{ФЭБ}} = 302 \text{ кВт}$,
 - Модель силового преобразователя (инвертора), который преобразует выходное напряжение постоянного тока ФЭБ (583 В) в напряжение переменного тока (300 В),
 - Модель управления инвертором, которое реализует управление активной мощностью ФЭБ со слеживанием за точкой максимальной мощности (MPPT), напряжением цепи постоянного тока на конденсаторах (C_1 , C_2) и реактивной мощностью,
 - Модель фильтра гармоник: для фильтрации гармоник для улучшения формы выходного сигнала и приближения к синусоидальному,
 - Модель конденсаторов в цепи постоянного тока (DC-link): использованы на выходе блока ФЭБ как устройство накопления энергии для обеспечения на входе инвертора мощности со стабилизированным напряжением.
- Подсистема выдачи энергии, включающая:
 - Модель трансформатора 300 В/20 кВ мощностью 300 кВА для подключения инвертора к электрической сети,
 - Модель электрической сети мощностью 2500 МВА, частотой 50 Гц, к которой СФЭС подключается.

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

Подсистема генерации и преобразования электрической энергии



Подсистема выдачи энергии

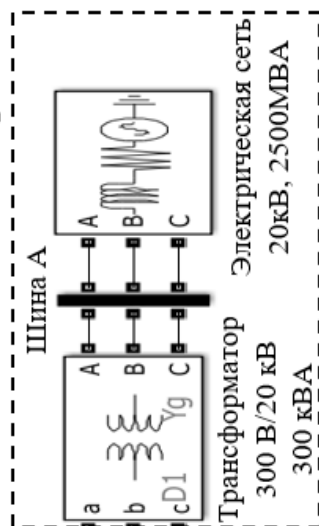


Рисунок 8 – Обобщённая модель одноступенчатой СФЭС в MATLAB

Таблица 1 – Сходимость характеристик ФЭБ при температуре поверхности модулей 25 °С

Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²	Паспортные данные			Параметры, полученные в результате моделирования			Погрешность		
	$P_{\text{ФЭБ}}$, кВт	$U_{\text{ФЭБ}}$, В	$I_{\text{ФЭБ}}$, А	$P_{\text{ФЭБ}}$, кВт	$U_{\text{ФЭБ}}$, В	$I_{\text{ФЭБ}}$, А	$P_{\text{ФЭБ}}$, %	$U_{\text{ФЭБ}}$, %	$I_{\text{ФЭБ}}$, %
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 2) погрешности слежения за ТММ не повышают 2 %, что говорит о достоверности разработанной модели. На рисунке 9 показаны вольтамперная характеристика (ВАХ) и вольт-мощностная характеристика ФЭБ при изменении температуры с интенсивностью 1000 Вт/м². Из рисунка 9 и таблицы 2 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 2 – Сходимость характеристик ФЭБ при интенсивности излучения 1000 Вт/м²

Температура поверхности модулей, °С	Паспортные данные			Параметры, полученные в результате моделирования			Погрешность		
	$P_{\text{ФЭБ}}$, кВт	$U_{\text{ФЭБ}}$, В	$I_{\text{ФЭБ}}$, А	$P_{\text{ФЭБ}}$, кВт	$U_{\text{ФЭБ}}$, В	$I_{\text{ФЭБ}}$, А	$P_{\text{ФЭБ}}$, %	$U_{\text{ФЭБ}}$, %	$I_{\text{ФЭБ}}$, %
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			

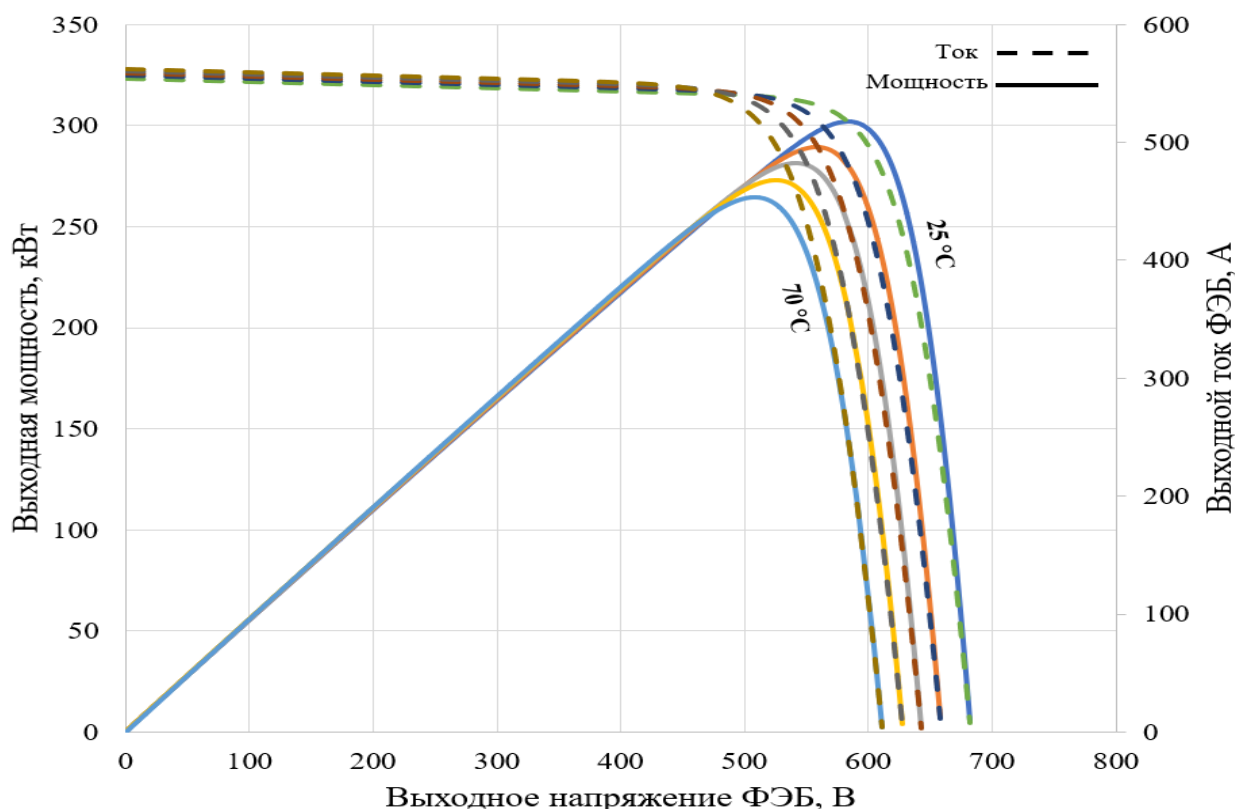


Рисунок 9 – Вольт-амперная (----) и вольт-мощностная (—) характеристика ФЭБ при изменении температуры поверхности модулей от 25 до 70 °С

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 программного обеспечения, позволяющего проводить расчеты параметров ВЭС был выбран для технической оценки рассмотренной ВЭС программный комплекс 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 50х50 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 х 50 км, разрешение – 5 м.

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

5. Синтезирование ряда многолетней статистики наблюдений за ветром: в целях получения ряда многолетней ветровой статистики был выполнен прогнозный корреляционный анализ (MCP - Measure Correlate 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 10), в которых предлагается разместить ВЭС. Численное моделирование ветрового потока для создания карт ВЭР производится на основе теории Джексона и Ханга, 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 IIIa. 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.

9. Размещение ВЭУ в составе ВЭС на местности основывается на розе ветров площадки и рекомендуемых расстояниях между соседними установками. Основным показателем оптимальности расположения ВЭУ в составе ВЭС являются потери от затенения соседними ВЭУ, которые должны составлять не более 2%. При диаметре ВК выбранных ВЭУ, составляющем D=82 м расстояние между ВЭУ будет 820 м и на площадке можно разместить 8 ВЭУ (рисунок 10).

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 3. Согласно полученным результатам, выбрана установка VENSYS, имеющая лучшие значения выработки и КИУМ.

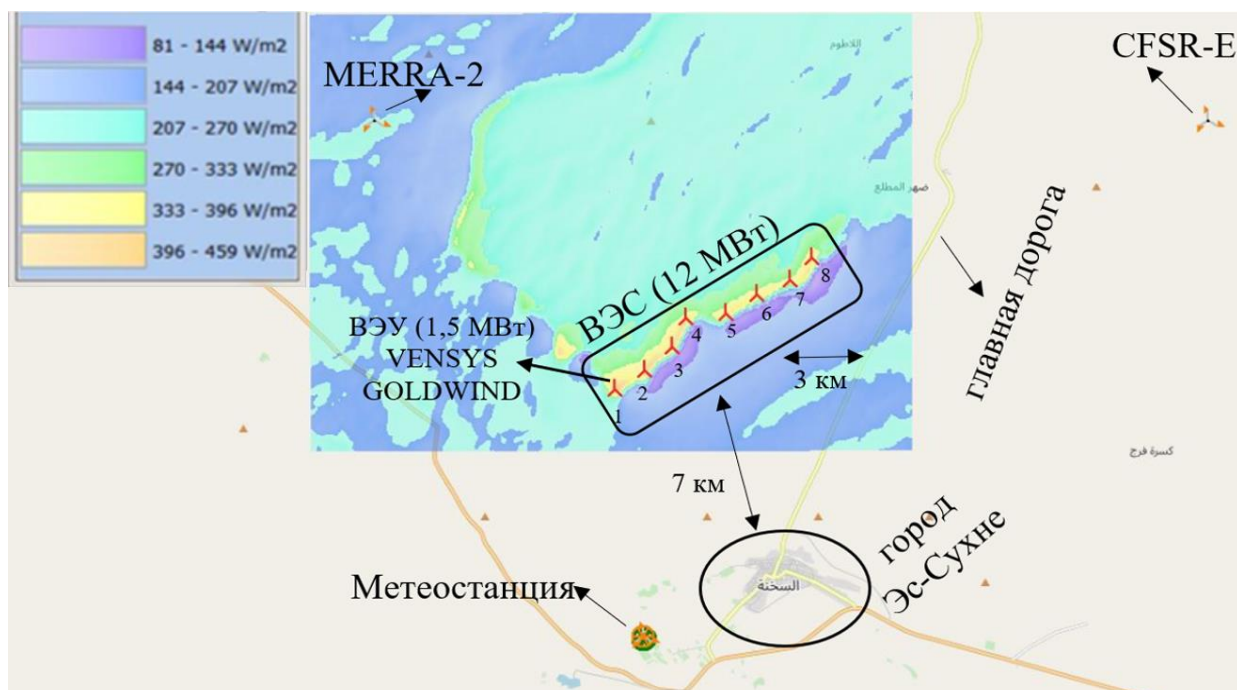


Рисунок 10 – Карта ВЭР и предлагаемая компоновка ВЭС в перспективной зоне строительства

Таблица 3 – 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 24954,2 тCO₂/год.

13. Оценка экономической эффективности данного проекта выполнена в программе Excel, где рассчитаны экономические показатели проекта: чистый дисконтированный доход (NPV), дисконтированный срок окупаемости (DPP), внутренняя норма доходности (IRR), индекс доходности (PI), нормированная стоимость энергии ($LCOE$). Результаты расчетов экономических показателей показали: $LCOE = 0,058$ \$/кВт·ч, $NPV = 9,6$ млн. долл., $DPP = 9$ лет, $PI = 1,53$ и $IRR = 16\%$. Таким образом, проект полностью прибыльный с точки зрения инвестора и с точки зрения сирийского государства, если оно профинансирует этот проект.

В четвертой главе также разработана методика обоснования параметров сетевой СФЭС для условий Сирии. Апробация методики выполнена на примере проектирования сетевой СФЭС мощностью 300 кВт недалеко от деревня Умм-эль-Зайтун в провинции Эс-Сувайда. Место выбрано из анализа созданного автором атласа солнечных ресурсов. Для технической оценки рассмотренной СФЭС используется программа PVsyst. Для расчетов использованы те же шаги, что и при выборе ВЭС. Как было показано выше в результате моделирования в MATLAB для строительства СФЭС мощностью 300 кВт в деревне Умм-эль-Зайтун были предложены следующие элементы СФЭС: ФЭМ типа SunPower SPR-415E-WHT-D

мощностью 415 Вт и центральный инвертор Bosch BPT-C300 из производителя Bosch Power Тес мощностью 300 кВт.

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 м² и угол наклона ФЭМ принят постоянным для всего года и равным 25°.

На рисунке 11 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 ($L=5,23$ м), длину ($e=12,40$ 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 ($d=10$ м) было выбрано с учетом потерь на затенение равных 1,5%. Общая площадь земли, отводимой под строительство предлагаемой СФЭС, составила ($120 \times 29 = 3456$ м²).

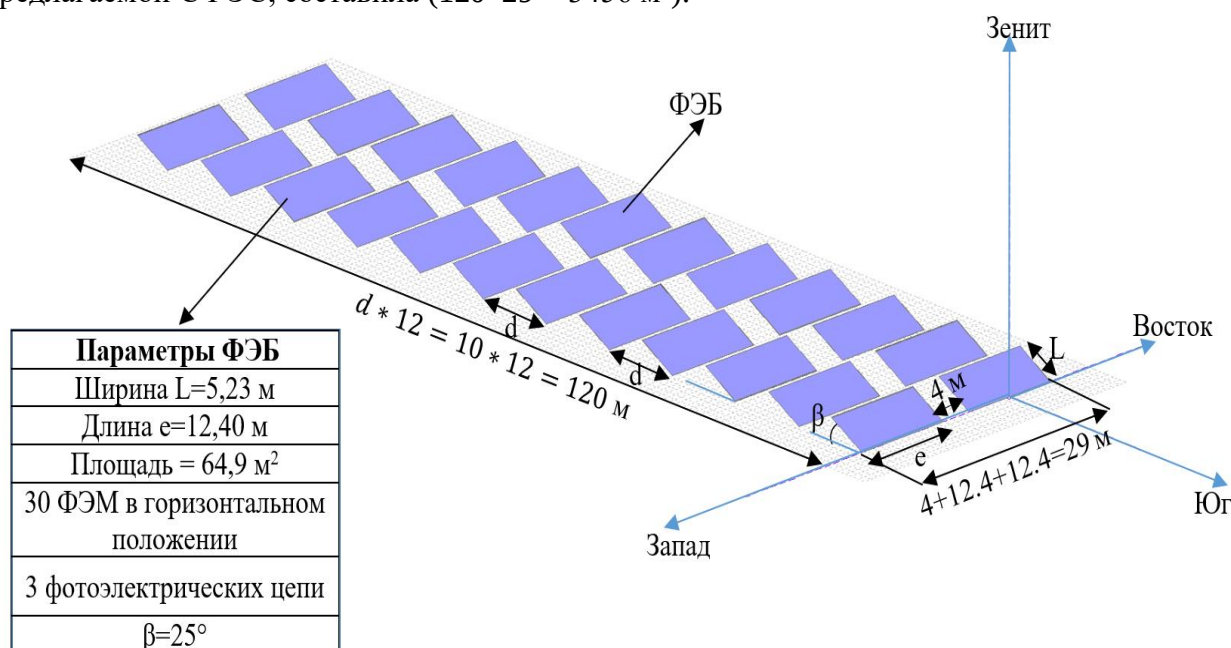


Рисунок 11 – Генеральный план размещения оборудования СФЭС

Результаты моделирования показали, что полезная энергия (выработка), подаваемая в сеть с учетом всех потерь, составила 493 МВт·ч/год. Оптические потери составили 7,2%, потери в ФЭМ и на коммутацию в ФЭБ составили 12,4% и потерь при трансформации и передаче энергии составили 2,9%. КИУМ предлагаемой СФЭС составил 18,7%. Число часов использования установленной мощности составило 1640 часов в год.

Оценка экологической эффективности проекта показала, что рассматриваемая СФЭС с выработкой электроэнергии 493 МВт·ч/год обеспечит электроэнергий около 220 человек (около 12% населения деревни Умм-эль-Зайтун) и позволит сэкономить около 42,4 т.н.э. в год и снизить выбросы около 320,45 тСО₂/год.

Оценка экономической эффективности данного проекта показала: LCOE = 0,094 \$/кВт·ч, NPV = 190600 \$, DPP = 11 лет, PI = 1,46 и IRR = 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.

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.

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.

5. Разработаны в среде MATLAB адекватные и достоверные модели элементов ВЭУ, подключённой к электрической сети с параметрами энергосистемы Сирии, с различными типами генераторов (АГБК, АГДП, СГПМ) для исследования их режимов работы и оценки возможностей регулирования частотой вращения генератора при изменении скорости ветра.

6. Разработана адекватная и достоверная модель СФЭС, подключённой к электрической сети на основе параметров энергосистемы Сирии, в среде MATLAB для расчета ее параметров и режимов работы при изменении интенсивности солнечного излучения и температуры поверхности модулей.

7. 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.

8. 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 высоким годовым приходом солнечной радиации.

9. Полученные результаты могут быть практически использованы для строительства в будущем СФЭС и ВЭС в предлагаемых местах на территории Сирии. Также рекомендуется проведение других исследований для строительства СФЭС и ВЭС в других местах территории Сирии, которые характеризуются высоким солнечным и ветровым потенциалом.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ 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.