

АННОТАЦИЯ

**диссертации на соискание ученой степени доктора философии PhD
по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика»**

Жакипова Нажмитдена Берекелиулы

**Тема диссертации: «Исследование эффективности системы
генерирования электрической энергии автоматически управляемой
парусной ветровой электростанции»**

Актуальность исследования. Экологическая ситуация в современном мире, связанная с глобальным потеплением в следствии выбросов парниковых газов, приводит к необходимости замены органического топлива возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). В этой связи представляет интерес использование ВИЭ в виде ветровых электростанции и повышение эффективности преобразования энергии ветра в электрическую энергию. В настоящее время широкое распространение получили турбинные ветровые электростанции (ТВЭС) с горизонтальным и вертикальным расположением осей роторов. Всесторонний и критический анализ различных технических решений и исследований в области ветроэнергетики показывает, что они в основном направлены на совершенствование ТВЭС. Многие исследования приводят к отдельным положительным результатам, не устраняя главных проблем. Для обеих видов ТВЭС проблемой остается непредсказуемость ветра, скорости и силы порывов ветра, часто изменяющиеся в короткие промежутки времени, а также то, что нижняя граница диапазона скоростей ветра, при котором ТВЭС функционируют с номинальной мощностью, как правило, достаточно высока - около 8 м/с при максимальном КПД равном 0.3. Наиболее подходящей альтернативой ТВЭС является малая автоматически управляемая парусная ветровая электростанция (ПВЭС). Особенностью ПВЭС является то, что он составлен из шести подвижного параллельного манипулятора и качающегося в пространстве рабочего органа (РО) из паруса с аэродинамическим профилем, воспринимающего энергию ветра, и мачты, жестко связанной с верхней платформой параллельного манипулятора. Важным преимуществом ПВЭС, является то, что он функционирует независимо от изменения направления ветра и имеет систему генерирования из шести генераторов электрического тока, расположенных на основаниях шести актуаторов манипулятора. В этой связи актуальным является проведение интегрированных и комплексных исследований и разработок, направленных на создание систем генерирования электрической энергии для источников малой автономной ветроэнергетики, основанных на качающихся парусах, расположенных на платформах из параллельных манипуляторов. Это особенно важно для Казахстана, имеющего большие территорий с низкой скоростью ветра, а также со слабой энергетической инфраструктурой, особенно районов удаленных от линий электропередач.

Цель и задачи исследования. Конструкция ПВЭС состоит из манипуляторного преобразователя (МП) с топологией параллельного манипулятора SHOLKOR и рабочего органа составленного из паруса (парусов) с аэродинамическим профилем сечения и мачты, жестко связанной с верхней платформой МП. Функционально преобразование механической энергии ветра в электрическую энергию выполнятся МП, в котором основным узлом являются шесть актуаторов, а в каждом актуаторе установлен генератор электрического тока. Таким образом эффективность системы генерирования ПВЭС определяется эффективностью преобразования механической энергии в электрическую, которая осуществляется актуаторами.

Целью диссертационной работы – является разработка и совершенствование системы генерирования электроэнергии парусной ветровой электростанции.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие **задачи**:

- Разработать математико-имитационные модели прогнозирования скорости и направления ветра с применением методов искусственного интеллекта на основе экспериментальных данных ветровой ситуации.
- Разработать методологию комплексного исследования эффективности системы генерирования электрической энергии ПВЭС, включающую прогнозирование ветровой ситуации, силовой анализ конструкции и определение входной мощности актуаторов в рабочем цикле установки.
- Разработать и реализовать экспериментальный стенд для исследования актуатора параллельного манипулятора со встроенным электрогенератором и определить его коэффициент полезного действия в лабораторных условиях при воспроизведении прогнозируемой нагрузки.
- Разработать и исследовать структуру системы генерирования и аккумулирования электрической энергии автоматически управляемой парусной ветровой электростанции с использованием шести синхронных генераторов и шести аккумуляторных батарей.

Объект и методы исследования. Объектом исследования в диссертации является актуатор малой автоматически управляемой парусной ветровой электростанции. Для решения перечисленных выше задач использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, получены уравнения энергетического баланса наиболее важного в функциональном отношении узла, в качестве которого выбран актуатор МП, являющийся источником электрической энергии. С применением программы Solidworks сконструирован и изготовлен экспериментальный стенд для исследования эффективности системы генерирования ПВЭС. Для компьютерного моделирования системы генерирования использовались ПП MatLab и Mathcad. Получены закономерности изменения скорости и направления ветра для различной ветровой ситуации (диапазонов скоростей ветра) в виде массивов данных, которые путем создания и обучения многослойной нейросети в ПП Python позволили предсказать ветровую ситуацию на месте установки ПВЭС.

Основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

- Математико-имитационные модели прогнозирования ветровой нагрузки с применением методов искусственного интеллекта, обеспечивающие формирование достоверных исходных данных для эксперимента.
- Оценка энергетической эффективности актуатора параллельного манипулятора со встроенным электрогенератором, которая основывается на разработанной комплексной аналитико-экспериментальной методологии, включающей прогнозирование входной мощности, силовой анализ конструкции ПВЭС и лабораторное определение коэффициента полезного действия актуатора.
- Разработанная система генерирования и аккумуляирования электрической энергии, включающей шесть синхронных генераторов и шесть аккумуляторных батарей и система защиты аккумуляторов от глубокого разряда.

Научная новизна.

- Разработаны математико-имитационные модели прогнозирования ветровой нагрузки для автоматически управляемой парусной ветровой электростанции с использованием методов искусственного интеллекта, позволяющие получать прогнозные значения скорости и направления ветра для дальнейшего энергетического анализа системы.
- Предложена и реализована комплексная методология экспериментального определения коэффициента полезного действия актуатора параллельного манипулятора со встроенным электрогенератором на основе воспроизведения прогнозируемой входной мощности в лабораторных условиях.
- Сформирована и исследована структура системы генерирования и аккумуляирования электрической энергии парусной ветровой электростанции, включающая шесть синхронных генераторов и шесть аккумуляторных батарей, а также разработана система защиты от глубокого разряда.

Практическая значимость. В результате выполнения диссертационной работы получены инструменты для решения задач повышения энергетической эффективности ПВЭС путем повышения КПД актуатора МП. Эти инструменты использовались при создании опытной конструкции малой ПВЭС мощностью 5 кВт.

Достоверность результатов. Подтверждается применением для анализа ветровой ситуации, в качестве исходных, данные, полученные экспериментальным путем. Применение ПО в виде современных пакетов прикладных программ Python, Mathcad, MATLAB. Экспериментальный анализ объекта исследования проведен на специально сконструированном стенде, в котором подготовка данных, проведение испытания и обработка результатов экспериментов выполняется по программе с помощью контроллера Arduino.

Личный вклад автора. Автор лично осуществлял выполнение задач, поставленных в диссертационной работе. В частности, он использовал свои навыки и умения в использовании программных продуктов Python, Mathcad и подготовил скетч в среде разработки Arduino IDE. Автор разработал комплексную методику проведения экспериментального исследования по определению КПД актуатора ПВЭС. Он сконструировал испытательный стенд, производил подготовку, наладку и провел экспериментальные испытания по определению КПД актуатора. В опубликованных научных трудах значительная доля принадлежит автору.

Связь темы диссертации с государственными программами и планом работы университета. Работа выполнялась в НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина» при выполнении проекта грантового финансирования ИРН AP14869386 «Исследование, разработка совокупности конструкций и создание экспериментального образца автоматически управляемой парусной ветровой электростанции с качающимся рабочим органом». В рамках этого проекта и в результате проведенных исследований создана опытная конструкция ПВЭС, получен акт внедрения.

Апробация результатов диссертации.

Полученные в ходе исследования результаты и основные положения диссертационной работы опубликована одна статья в журнале, индексируемой в базе Scopus с процентилями 85. Три статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Кроме того, материалы диссертации включены в Заключительный Отчет по теме ГФ ИРН AP14869386 № гос. регистрации 0122РК00575, 2025 г.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация представлена в 101-страничном компьютерном тексте, состоящем из введения, 5 глав, заключения и 5 приложений. В него включены 26 рисунка, 7 таблиц, заключение, список использованной литературы из 100 источников, 5 приложения.

Во **введении** диссертационной работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены основная идея, научная новизна, а также результаты исследований и апробация в виде публикаций.

В **первом разделе** проведен анализ существующих научных исследований в области ветровой энергетики и энергетики Казахстана, в частности. На основе анализа исследований из литературного обзора в области электроэнергетики и ветровой энергетики показаны недостатки современных ТВЭС. Учитывая указанные недостатки присущие ТВЭС в диссертационной поставлена цель разработки и совершенствование системы генерирования электроэнергии ПВЭС. Предлагается использовать и совершенствовать ПВЭС путем исследования и повышения эффективности использования систем генерирования и аккумуляирования с шестью синхронными генераторами и расчетным количеством аккумуляторов. Такое решение особенно важно для

Казахстана, имеющего большие территории с низкой скоростью ветра, а также со слабой энергетической инфраструктурой, особенно районов удаленных от линий электропередач. Таким образом совершенствование автоматически управляемых парусных ветровых электростанций с качающимися парусами на основе повышения эффективности системы генерирования ПВЭС в современных условиях является актуальной и важной задачей. Для широкого применения необходимо, чтобы ПВЭС работали, начиная от малых скоростей ветра независимо от изменения направления с высокой эффективностью т.е. достаточно высоким КПД. Эффективность ПВЭС во многом зависит от эффективности важного узла ПВЭС - актуатора, который непосредственно выполняет функции преобразования энергии механического движения в электрическую энергию. Для оценки эффективности актуатора в работе предлагается использовать такой показатель как КПД актуатора.

В разделе 2 диссертационной работы основное внимание уделяется обработке экспериментальных данных характеристик ветровой ситуации. Так как ветровая ситуация носит стохастический характер, то в работе используются метод искусственного интеллекта, который позволяет создать закономерный предсказуемый характер ветра. Данный раздел содержит материалы исследования по формированию предсказанных закономерностей ветровых характеристик (скорости и направления). В результате использованы полученные ранее ежесекундные значения скорости и направления ветра на высоте 14 м. Эта обширная база данных в Excel, сформированная контроллером с помощью измерительных приборов. Затем используется программа, подготовленная на языке Python, с помощью которой производится выборка полученной ранее базы данных и сформирована база данных по 4-м диапазонам изменения скоростей ветра: [0-5], [до 10], [до 15], [свыше 15]. Эти базы данных состоят из величин, имеющих случайный характер. По этой причине, в дальнейшем, путем создания и обучения многослойной нейросети в Python получены закономерности изменения скорости ветра для различной ветровой ситуации (диапазонов скоростей ветра), полученные в виде массивов данных. Этот массив данных используется в дальнейшем для расчета ПВЭС, а также для определения штильного и энергетического времени. Полученные на этом этапе результаты являются новыми и могут быть использованы другими исследователями применительно к любым ветровым электростанциям, например, для определения емкости аккумуляторов автономных ветровых электростанций. При этом возможно использовать в качестве исходных и другие данные, например, полученные метеостанциями. Также в данном разделе по предсказуемой характеристике ветра предложена методика определения штильного времени. Показано, что определение максимального штильного времени позволяет выбрать емкость аккумуляторов для системы аккумулирования ПВЭС.

В разделе 3 продолжается реализация принятой в данной диссертационной работе методологии, направленной на экспериментальное исследование системы генерирования. Решается задача имитации действия на манипуляторный преобразователь (МП) предсказанной ветровой нагрузки для того, чтобы установить прогнозируемую входную мощность на актуатор. При этом применяется разработанный ранее алгоритм силового анализа параллельного манипулятора SHOLKOR. Исходными для расчетов выбраны предсказанные с помощью Python характеристики ветра, а также конструктивные данные реального опытного образца ПВЭС. Для математико-имитационного моделирования использовалась ППП Mathcad. Задача в данной главе решалась поэтапно: в начале была составлена математическая модель для силового анализа МП методом кинетостатики. В результате получена система уравнений, которые позволили установить составляющие сил реакций на шести актуаторах. Далее рассматривая кинематику движения рабочего органа (РО), состоящего из мачты и паруса и МП с применением, метода преобразований однородных матриц установлены приращения перемещений кареток актуаторов при малых отклонениях перемещения РО от вертикальной ориентации при прямом и обратном качательном движении РО как маятника. Полученные результаты позволили определить входную прогнозируемую мощность выбранного минимально загруженного манипулятора при пространственных перемещениях РО. Выбирается минимально загруженный актуатор потому, что актуатору оценивается по минимальному значению КПД при генерировании электрического тока.

На основе созданной ранее авторами аналитической модели ПВЭС, разработан измененный алгоритм силового анализа зонтового ПВЭС с применением ППП Mathcad. Этот алгоритм отличается тем, что в качестве исходных данных используются предсказанные для данной ветровой ситуации характеристики ветра, полученные в разделе 2, с применением функции Mathcad по обмену информации с табличным процессором Excel. Кроме того, в исходные данные для расчетов включены параметры опытного образца ПВЭС мощностью 5 кВт. Составленная программа позволяет определить прогнозируемые нагрузки и их мощности, действующие на вход каждого из шести актуаторов в зависимости от характеристики ветра. Эта программа может быть в дальнейшем использована при расчетах на прочность и надежность деталей, узлов и ПВЭС в целом. По программе Mathcad с применением функции обмена, экспортируются в Excel вычисленные данные по прогнозируемой входной мощности на актуаторах при различных предсказанных значениях скоростей и направлений ветра.

В разделе 4 сконструирован и предложен автоматически функционирующий стенд для экспериментального исследования КПД актуатора, в состав которого входит актуатор и автоматически управляемая с помощью контроллера Arduino пневмосистема реализующая прогнозируемую входную нагрузку вместе с компрессором, а также контрольно-измерительная аппаратура. Здесь экспериментальным путем установлено значение КПД минимально загруженного актуатора ПВЭС равное $\bar{\eta} = 0,56 \div 0,58$. Этот

результат получен путем использования сформированных ранее данных по прогнозируемой входной мощности, полученной в свою очередь методом математико-имитационного моделирования по предсказуемым характеристикам ветра. Процесс экспериментального исследования автоматизирован, также как и сбор и обработка данных. Для этого использовался контроллер Arduino и подготовленная программа в среде Arduino IDE. Для того, чтобы подтвердить достоверность полученных результатов построены гистограмма и график плотности распределения вероятности получения КПД и распределения функции Вейбулла, которые подтвердили результаты эксперимента по определению КПД актуатора. Подобный эксперимент позволяет оценить эффективность выбранных конструктивных параметров актуатора. Используемая методология открывает возможности совершенствовать конструкцию ПВЭС путем выбора параметров, обеспечивающих наибольшую эффективность при преобразовании энергии ветра в электрическую энергию. В целом следует отметить, что найдено решение технической задачи по оценке энергетической эффективности ПВЭС путем экспериментального определения КПД актуатора.

В разделе 5 диссертационной работы указано, что отличительная особенность исследуемого ПВЭС в том, что актуатор имеет систему отбора мощности из двух зубчато-реечных передач, также электрическую машину, генерирующую электрический ток. В этой связи в этом разделе выполняется анализ электрических машин и выбран электрическая машина в виде синхронного генератора PMSG модели Naier Wind Power 1000W 24V/500rpm. Причем выбрано шесть трехфазных синхронных генераторов переменного тока, так как генераторы установлены в каждом актуаторе. В виду того, что крутящий момент на валу генератора имеет случайный характер, генерируемый каждым генератором электрический ток отличается по характеристикам. Поэтому в данном разделе создана принципиальная схема системы генерирования и аккумулирования электрической энергии, основанная на преобразовании переменного генерируемого тока в постоянный и дальнейшее параллельное соединение на общую шину с электрохимическими вторичными элементами. Эта система через инвертор на выходе обеспечивает потребителя переменным электрическим током требуемой мощности. На основе разработанной принципиальной схемы создана экспериментальная модель системы генерирования и аккумулирования, содержащая подсистему автоматической защиты аккумуляторов от глубокого разряда. Проведены испытания на экспериментальной модели. Испытания показали, что разработанная система генерирования и аккумулирования с подсистемой защиты от глубокого разряда может быть использована в созданном опытном образце парусной ветровой электростанции.