

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»**

На правах рукописи



Черников Вадим Геннадиевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Павлыш Владимир Николаевич,
ФГБОУ ВО «ДонНТУ» (г. Донецк),
заведующий кафедрой «Прикладная математика и
искусственный интеллект»

Официальные оппоненты: **Шевцов Дмитрий Валерьевич**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет» (г. Донецк),
заведующий кафедрой «Прикладная математика и
теория систем управления»

Шеховцов Алексей Игоревич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донецкий институт
железнодорожного транспорта» (г. Донецк),
декан факультета «Управление на
железнодорожном транспорте»


Ведущая организация: Государственное учреждение «Научно-
исследовательский и проектно-
конструкторский институт по автоматизации
горных машин «Автоматгормаш им.
В.А. Антипова» (г. Донецк)

Защита состоится «28» ноября 2023 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 02.2.006.02 при ФГБОУ ВО «ДонНТУ» и ФГБОУ ВО «ДонГУ» по адресу : г. Донецк, ул. Артема, 58, корпус 1, ауд. 203, Тел./факс: +7(856)304-30-55, e-mail: uchensovnet@donntu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: г. Донецк, ул. Артема, 58, корпус 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.2.006.02
кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи со стремительным развитием энергетических технологий, базирующихся на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), большое внимание уделяется развитию систем управления, которые способны обеспечить необходимую эффективность работы источников энергии в условиях нестабильного энергетического потока, свойственного возобновляемой энергетике. В наибольшей степени вышесказанное относится к ветрогенераторным установкам, которым приходится работать в условиях нестабильной, постоянно меняющейся скорости ветра, а также фотоэлектрическим установкам, работающим в условиях изменяющейся плотности потока солнечной энергии. Нестабильность энергетического потока обусловлена как природными факторами, так и конструктивными особенностями этих энергоустановок. В связи с этим основной задачей систем управления специализированных энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии является достижение максимально возможного КПД в условиях постоянно изменяющихся внешних факторов и обеспечение стабильных регламентированных показателей вырабатываемой электроэнергии.

Перечисленные задачи систем управления энергоустановками на базе ВИЭ ввиду их сложности и разнообразности могут быть решены только за счет применения микропроцессорных систем управления с использованием программируемых логических контроллеров, причем разрабатываемые программы управления должны учитывать особенности функционирования энергоустановок в различных режимах работы, связанных с изменением плотности энергетического потока.

Для разработки программ управления энергоустановками на базе ВИЭ целесообразны также разработка и применение математических моделей, которые с максимальной степенью достоверности позволят оценить эффективность предлагаемых методов управления. Наряду с разработкой эффективных программ управления важным аспектом при решении поставленных задач является выбор надежного и доступного аппаратного обеспечения.

В этой связи совершенствование структур и параметров систем управления функционированием возобновляемых источников энергии является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам разработки эффективных методов управления возобновляемыми источниками энергии посвящено большое количество научных работ как отечественных ученых Елистратова В. В., Амерханова Р. А., Васькова А.Г., Лукутина Б. В., Аржанова К.В., Китаевой М. В., так и зарубежных Heier S., Hau E., Quaschnig V., Wesselak V., Aissaoui A., Precup R., Munteanu I., Gasch R. Предметом рассмотрения в данных работах является общая структура и отдельные элементы систем управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими

установками, однако недостаточно комплексно рассмотрены особенности функционирования систем управления в различных режимах работы установок, не учитывается влияние конструктивных особенностей установок на работу системы управления. На основании вышеизложенного можно сказать, что в результате использования существующих методов настройки регуляторов и формирования управляющих сигналов в контурах регулирования энергоустановок не всегда удается достичь оптимальных динамических и энергетических показателей работы системы управления.

Цель и задачи исследований. Цель работы – повышение эффективности функционирования ветрогенераторных и фотоэлектрических энергоустановок за счет совершенствования системы управления на базе создания новых математических моделей и разработки программного и аппаратного обеспечения.

Задачи исследований:

- разработать математические модели поведения скорости ветра, ветроколеса и генератора и усовершенствовать методику определения параметров регуляторов, а так же методы формирования управляющих сигналов для основных контуров регулирования ветроустановки. Провести математическое моделирование работы усовершенствованной системы регулирования ветроустановки в различных режимах;

- разработать методику определения скорости ветра перед ветроколесом без использования датчика скорости ветра;

- разработать способ повышения эффективности и создать программу реализации алгоритма управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля на базе программируемого логического контроллера;

- оценить эффективность предложенного метода управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля на экспериментальной установке.

Объект исследования. Объектом исследования являются системы управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками в условиях изменяющейся плотности энергетического потока.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые на основе использования нейронной сети разработана математическая модель, которая описывает зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла лопасти. Использование предложенной модели позволяет в режиме ограничения снизить отклонения мощности ветроустановки от заданной с 7–8% до 2%.

2. Разработанная математическая модель ветроколеса позволила повысить точность метода формирования управляющих сигналов, а также методики определения параметров регуляторов для основных контуров регулирования ветроустановки.

3. Впервые разработан расчётный метод определения скорости ветра перед ветроколесом по мгновенным значениям момента ветроколеса и pitch-угла лопасти, который позволяет усовершенствовать работу системы регулирования ветроустановки в условиях эффекта затенения башни.

4. Обоснован метод управления одноосной системой ориентирования фотоэлектрического модуля с наклонной осью, проведена оценка его энергоэффективности.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии особенностей формирования сигналов управления и определения параметров регуляторов в системах управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками применительно к различным режимам работы и обосновании предложенных методов управления с точки зрения улучшения динамических параметров системы регулирования и повышения энергоэффективности работы установок.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»: Н-23-18 «Исследование цифровых систем автоматического управления промышленными и энергетическими установками», в которых соискатель являлся исполнителем.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная программа управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля позволяет провести оценку повышения энергоэффективности ориентируемого модуля по сравнению с зафиксированным модулем на экспериментальной установке.

2. Применение математической модели системы регулирования ветрогенераторной установки позволяет выбрать оптимальные параметры регуляторов и оценить поведение основных параметров ветроустановки в режимах пуска, частичной и полной нагрузки генератора.

3. Использование предложенного расчётного метода определения скорости ветра в различных частях плоскости вращения ветроколеса позволяет реализовать принцип отдельного управления лопастями для более точного поддержания заданной мощности ветроустановки и уменьшения колебаний аксиального усилия, метод может применяться при проектировании системы регулирования ветроустановки и расчёте её конструктивных параметров.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями при проектировании систем управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 30-12/164а от 29. 12. 2022 г.) об использовании в учебном процессе при проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Оптимальное управление возобновляемыми источниками

энергии», «Управление ветровыми электроустановками», «Фотоэлектрические автономные системы», «Микропроцессорные системы управления возобновляемыми источниками энергии» по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а так же справкой о внедрении в ГБУ «НИИВЭ» (справка о внедрении № 1/561 от 11.10.2022 г.).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на положениях теории аэродинамики ветроколеса, физических принципах работы фотоэлектрических модулей. При построении математических моделей использовалась теория векторного регулирования для машин переменного тока и элементы теории нейронных сетей. Синтез контуров системы регулирования проводился на основе принципов оптимального управления. Для анализа эффективности предложенных методов управления использовались современные цифровые способы измерения, регистрации и обработки данных.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что регулятор скорости вращения ветроколеса должен адаптироваться к нелинейным параметрам ветроколеса, как неотъемлемой части объекта регулирования.

2. Установлено, что вследствие существенного влияния эффекта затенения башни на скорость ветрового потока, контур регулирования скорости целесообразно разделить на три канала, при этом скорость ветра для каждой из лопастей определяется расчетным методом на основании рабочих параметров ветроколеса.

3. Установлено, что применение предложенного метода управления одноосной системой ориентирования с наклонной осью позволяет существенно увеличить энергоэффективность ориентируемого фотоэлектрического модуля по сравнению с его жестко закрепленным положением.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования при решении поставленных задач в компьютерной среде и результатами натуральных экспериментов.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки), в частности: п. 4 «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами»; п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами».

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на 8-ой Международной

конференции «Возобновляемая энергетика 21-го столетия» (пос. Николаевка 2007 г.), 6-ой Международной научно-технической конференции «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем – 2013» (г. Донецк, ДОННТУ, 2013 г.), 5-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, ДОННТУ, 2019 г.), XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Молодая мысль: наука, технологии, инновации» (Братск, БГУ, 2020г.), 27-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2021 г.), X Международной научно-практической конференции «Информационные технологии. Проблемы и решения» (г. Уфа, УГНТУ, 2022г.).

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, в решении научно-практической задачи усовершенствования систем управления ветрогенераторных и фотоэлектрических установок, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе: 1 работа в профессиональном издании ВАК Украины, 3 работы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР, 4 – в других изданиях, 8 – по материалам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 298 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 96 источников и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе работы «Анализ характеристик систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии» показаны особенности электромеханических и фотоэлектрических систем для преобразования энергии ветра и Солнца в электрическую энергию, а также проведен анализ современного состояния систем управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками.

Анализ литературы показал, что наилучшая эффективность работы ветроустановки достигается при переменной скорости вращения ветроколеса за счет применения преобразователя частоты и деления системы управления ветроустановки на два контура: контура регулирования скорости вращения ветроколеса и контура регулирования момента генератора.

Несмотря на отработанную структуру системы регулирования при ее реализации возникает ряд сложностей, связанных с особенностями характеристик ветроколеса. Во-первых, следует отметить нелинейную зависимость коэффициента мощности ветроколеса от двух параметров: быстроходность и pitch-угол, во-вторых, при работе современных установок с трубчатой башней эффект затенения башни оказывает существенное влияние на неравномерность распределения скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса. Выше названные факторы усложняют процесс определения параметров регуляторов в основных контурах регулирования ветроустановки. Поэтому, для решения этих проблем, целесообразно проводить разработку новых математических моделей и методов определения параметров регуляторов, которые позволят учесть нелинейные свойства ветроколеса и особенности поведения скорости ветра.

В системах управления фотоэлектрическими установками выделяются две стратегии: первая стратегия подразумевает слежение за рабочей точкой фотоэлектрического модуля на его вольт-амперной характеристике с целью достижения точки максимальной мощности (ТММ), вторая стратегия стремится к обеспечению максимальной плотности солнечного излучения, поступающего на поверхность модуля, за счет применения активных систем слежения за Солнцем. Отмечается, что для фотоэлектрических модулей без оптических концентрирующих элементов наиболее целесообразным является система управления на основе алгоритма определения солнечной позиции.

Несмотря на множество функционирующих вариантов систем ориентирования, оказались недостаточно проработанными вопросы разработки способа энергоэффективного управления системой ориентирования с наклонной осью и сравнительного анализа повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля в результате применения одноосных и двухосных систем ориентирования.

В связи с этим был сделан вывод о необходимости создания экспериментальной установки, реализующей систему ориентирования с наклонной осью на базе позиционного электропривода переменного тока и программируемого логического контроллера, с целью практической оценки корректности функционирования предложенного метода управления и повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля в результате использования активной системы слежения за Солнцем.

Во втором разделе работы «Совершенствование системы управления ветроустановкой с переменной скоростью вращения ветроколеса и моделирование режимов ее работы» рассматривается ветроустановка на основе преобразователя частоты, силовая часть и основные блоки системы регулирования которой показаны на рисунке 1. Отмечается, что такая концепция позволяет с наилучшей эффективностью использовать энергию ветрового потока и стабилизировать выходную мощность ветроустановки в условиях колебаний скорости ветра:

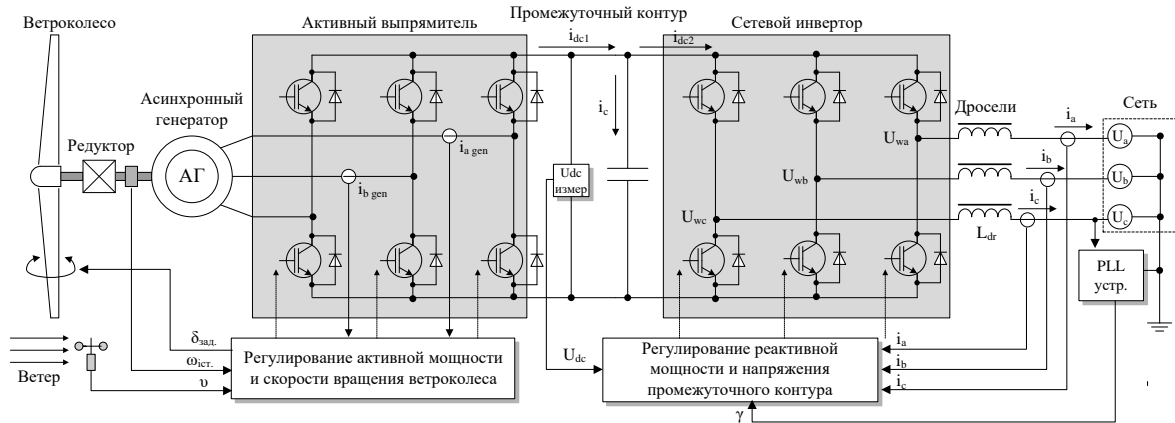


Рисунок 1 – Структурная схема силовой части и системы регулирования ветроустановки на основе преобразователя частоты

Для ветроустановки с переменной частотой вращения ветроколеса можно выделить три основных режима работы, показанные на рисунке 2: режим пуска генератора со ступенчатым изменением pitch-угла лопасти для увеличения приводного момента ветроколеса, режим работы с частичной нагрузкой генератора и отбором максимальной мощности от ветра, режим работы с полной нагрузкой генератора и ограничением мощности на уровне заданной.

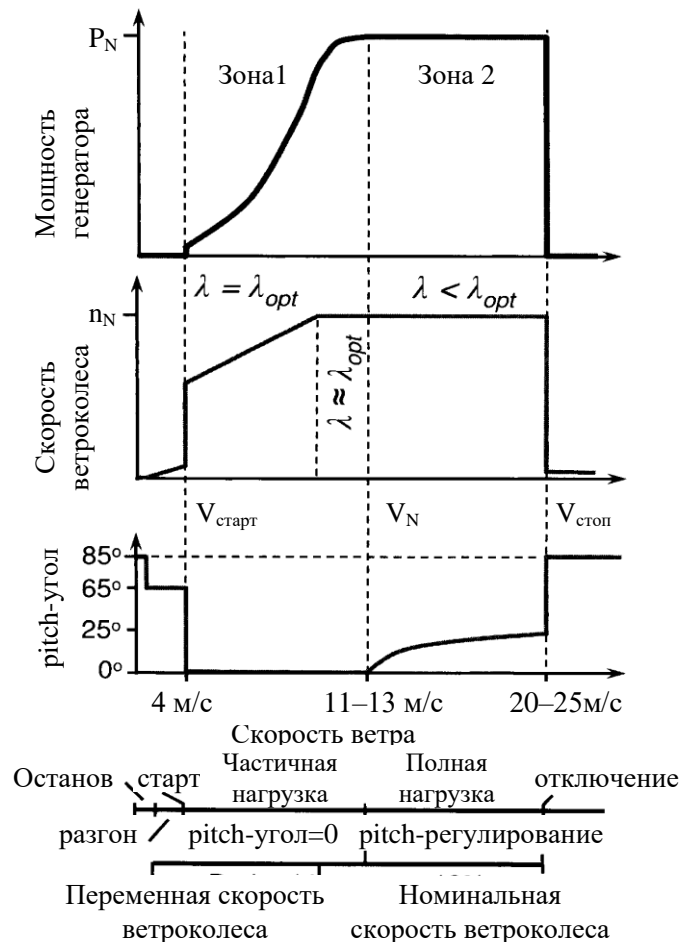


Рисунок 2 – Режимы работы ветроустановки и поведение её параметров

Принципы функционирования системы управления ветроустановкой зависят от режима ее работы, который в свою очередь определяется текущим значением скорости ветра. Структурная схема двухконтурной системы регулирования ветрогенераторной установки, обеспечивающая работу в вышеперечисленных режимах, приведена на рисунке 3.

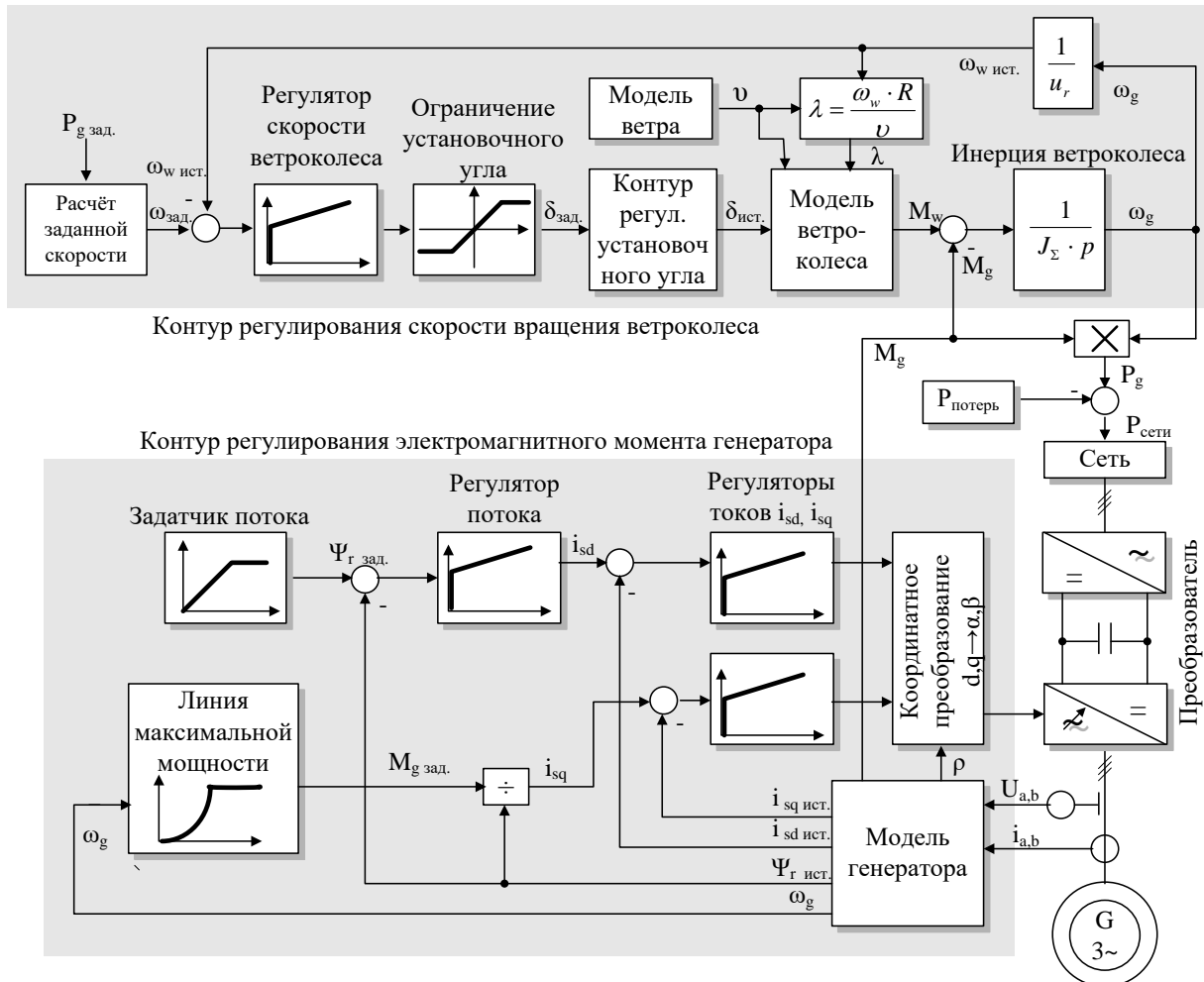


Рисунок 3 – Структурная схема двухконтурной системы регулирования ветрогенераторной установки

Для обеспечения эффективной работы в режиме пуска система управления должна обеспечить заданную последовательность формирования потока генератора, аэродинамического момента ветроколеса, момента генератора и заданного pitch-угла лопасти в процессе разгона ветроколеса до рабочей скорости вращения. Такая последовательность обеспечивается блоком логики управления, работа которого зависит от текущего значения быстроходности ветроколеса.

Задачей системы регулирования в режиме частичной нагрузки является получение максимальной мощности от ветрового потока. Для этого требуется поддержание оптимального угла притекания воздушного потока к лопасти ветроколеса β_{opt} , что обеспечит максимальный коэффициент мощности – $c_{pw \text{ max}}$.

Для моделирования работы ветроустановки в режиме частичной нагрузки были созданы математические модели скорости ветра, ветроколеса, генератора и системы векторного регулирования момента генератора. В этом режиме из двух контуров регулирования ветроустановки функционирует только контур регулирования момента генератора. Формирование задания на момент генератора в этом режиме (Рисунок 3) происходит в соответствии с формулой

$$M_{g \text{ зад.}} = \frac{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot D^2 \cdot v_N^3}{\omega_{gN}^3} \cdot \omega_g^2, \quad (1)$$

где, $c_{pw \max}$ – максимальный коэффициент мощности ветроколеса, D – диаметр ветроколеса, $\eta_{\text{мех}}$ – к.п.д. механических потерь, $\eta_{\text{эл}}$ – к.п.д. электрических потерь, v_N – номинальная скорость ветра, ω_{gN} , ω_g – номинальная и текущая угловая скорость вращения генератора соответственно.

Реализация вышеперечисленных математических моделей обеспечивалась средствами программного пакета Matlab-Simulink. Результаты моделирования показывают, что исследуемая система регулирования ветроустановки в режиме частичной нагрузки позволяет поддерживать коэффициент мощности ветроколеса c_{pw} очень близко к его максимальному значению (Рисунок 4).

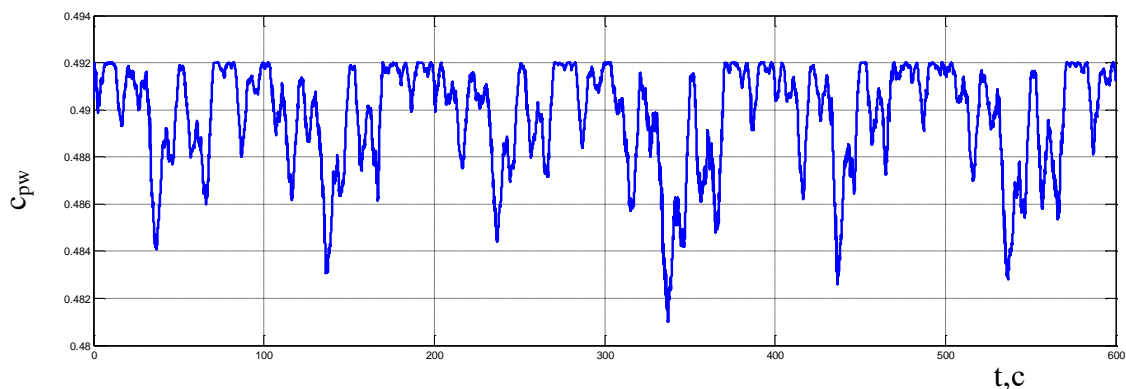


Рисунок 4 – Поведение коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} с расчетной быстроходностью $\lambda_d=7$ при моделировании в режиме частичной нагрузки

Если оценивать среднее значение коэффициента мощности ветроколеса в течении 10-минутного интервала времени по формуле (2), то отклонение коэффициента мощности от максимума (0,492) составит лишь 0,2% что свидетельствует о высокой эффективности работы системы управления.

$$c_{pw}^* = \frac{\int_0^{600} P_w dt}{\int_0^{600} P_0 dt} = \frac{\int_0^{600} c_{pw}(\lambda) \cdot v^3 dt}{\int_0^{600} v^3 dt}, \quad (2)$$

где, P_w – отданная ветроколесу, P_0 – теоретическая мощность ветрового потока.

Режим ограничения мощности является наиболее сложным режимом в работе системы регулирования, поскольку в этом режиме, в дополнение к контуру регулирования момента генератора, включается в работу контур регулирования скорости вращения ветроколеса (Рисунок 3). Включение второго контура в работу происходит в случае превышения скоростью ветра определенного значения. В этом режиме задачей обоих контуров является поддержание заданных значений момента и скорости вращения генератора, что позволяет поддерживать заданную мощность при колебаниях скорости ветра.

Однако процесс определения оптимальных параметров регулятора скорости ветроколеса сопряжен с рядом сложностей, обусловленных спецификой работы ветрогенераторной установки: во-первых, коэффициент мощности ветроколеса является нелинейной зависимостью от быстроходности ветроколеса – λ и pitch-угла лопасти – δ (Рисунок 5), во-вторых, в современных ветроустановках с трубчатой башней лопасти работают в условиях неравномерной скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса, что обусловлено эффектом затенения башни.

Для решения указанных проблем в работе предложено использовать адаптивный дискретный регулятор скорости вращения ветроколеса, при определении параметров которого учитываются нелинейные свойства ветроколеса за счет использования нейросетей и с помощью предложенного расчетного метода определяется скорость ветра в различных секторах вращения ветроколеса. В связи с неравномерностью скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса контур регулирования скорости вращения целесообразно разделить на три канала для обеспечения индивидуального регулирования скорости каждой лопастью. Структура одного из трех каналов регулирования скорости ветроколеса показана на рисунке 6.

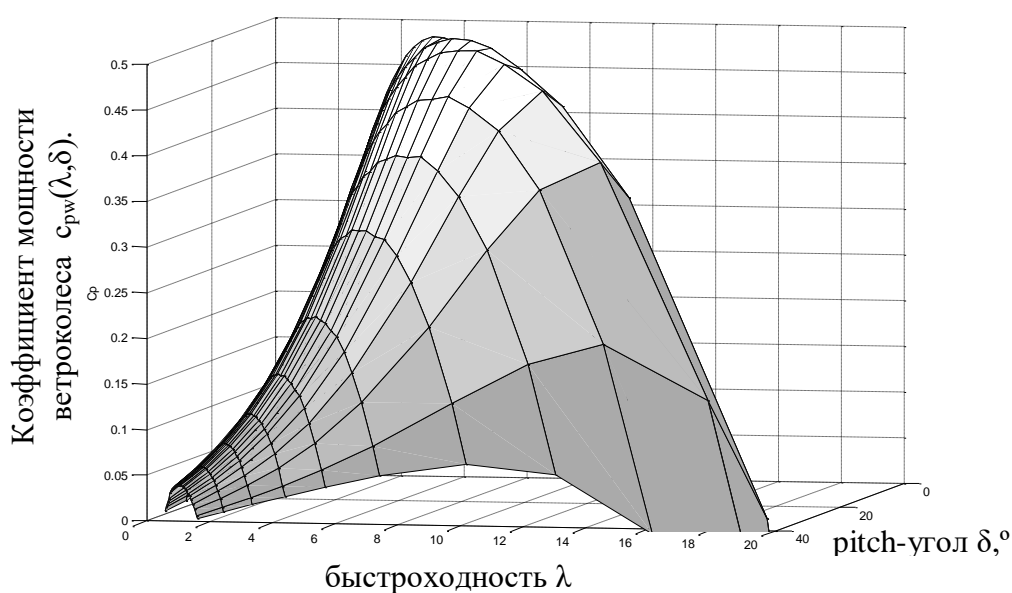


Рисунок 5 – Расчетная зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и pitch-угла лопасти δ

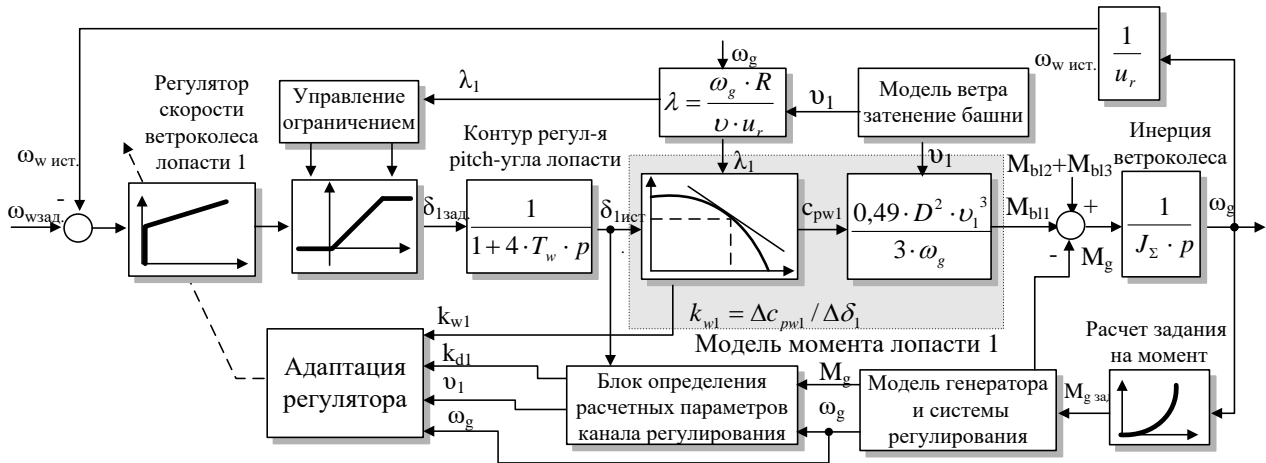


Рисунок 6 – Один из трех каналов регулирования скорости вращения ветроколеса посредством одной лопасти

Функционирование адаптивного дискретного ПИ-регулятора скорости вращения ветроколеса обеспечивается разностным уравнением в соответствии с формулой

$$\delta_{\text{зад}}[k] = \delta_{\text{зад}}[k-1] + b_0 \cdot \Delta\omega_w[k] + b_1 \cdot \Delta\omega_w[k-1], \quad (3)$$

где $\Delta\omega_w$ – ошибка регулирования скорости вращения ветроколеса на указанном шаге регулирования, $\delta_{\text{зад}}$ – выход регулятора (заданный pitch-угол).

При этом значения коэффициентов разностного уравнения определяются по формулам

$$b_0 = \frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 + \frac{T}{2 \cdot T_{wR}}\right) \cdot \frac{\omega_g}{v_1^3 \cdot k_{w1} \cdot k_{d1}} \quad (4)$$

$$b_1 = -\frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 - \frac{T}{2 \cdot T_{wR}}\right) \cdot \frac{\omega_g}{v_1^3 \cdot k_{w1} \cdot k_{d1}}, \quad (5)$$

где T_{wR} и T_{w0}^* – расчетные параметры непрерывного регулятора, T – период дискретности, ω_g , v_1 – скорость генератора и расчетная скорость ветра для лопасти соответственно, k_{w1} , k_{d1} – нелинейный коэффициент ветроколеса и долевой коэффициент лопасти в формировании общего момента ветроколеса соответственно (рассчитываются с использованием нейросетей).

Процесс работы обоих контуров регулирования ветроустановки показан на рисунке 7. Результаты моделирования в пакете Matlab с использованием моделей ветра, ветроколеса, генератора и системы регулирования показали, что предложенные в работе методы расчета параметров регуляторов позволяют поддерживать активную мощность генератора с отклонением не более 2% от заданного значения.

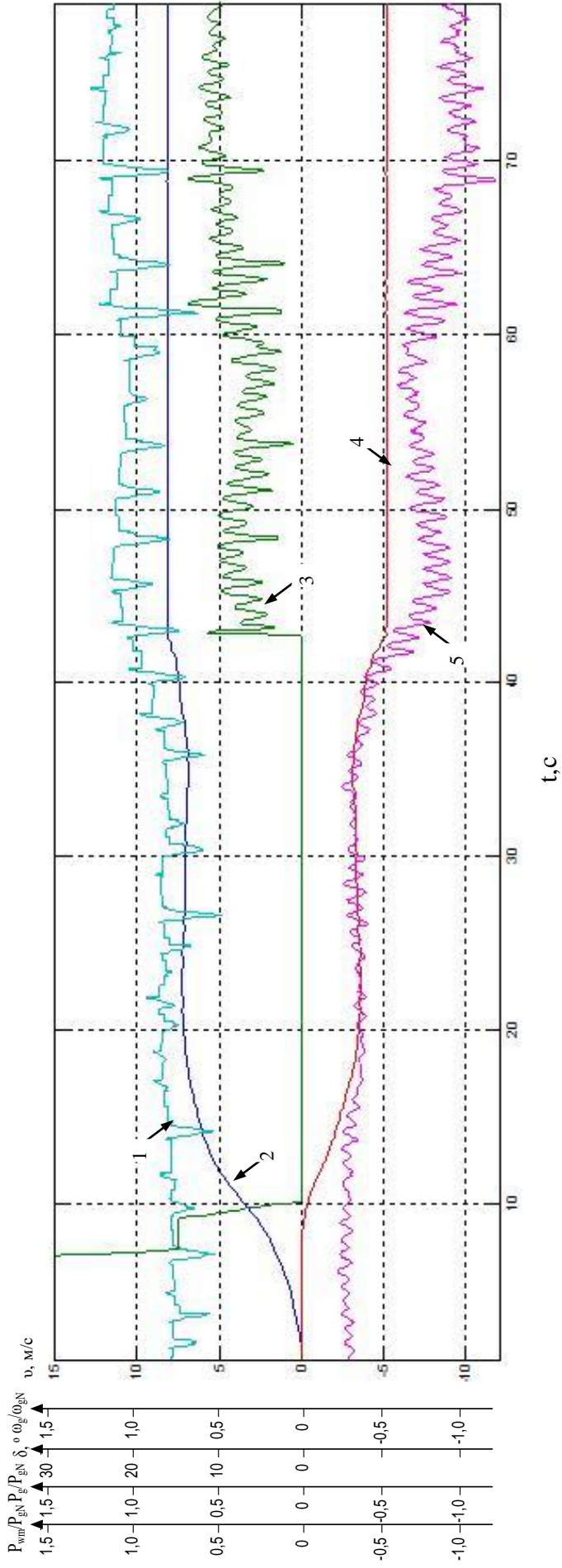


Рисунок 7 – Поведение скорости ветра – v (1), скорости генератора – ω_g (2), pitch-угла лопасти – δ (3), активной мощности генератора – P_g (4) и максимальной мощности ветроколеса – P_{wm} (5) при работе системы регулирования в режимах пуска, частичной нагрузки и ограничения мощности

В третьем разделе работы «Обоснование новых параметров и элементов системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля и оценка эффективности ее работы» рассматривается вопрос повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля за счет применения активной системы слежения за Солнцем на базе одноосной системы ориентирования с наклонной осью.

В этом разделе разрабатывается метод энергоэффективного управления системой ориентирования с наклонной осью и проводится сравнительный анализ повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля в результате применения различных систем ориентирования.

Для решения поставленной задачи была разработана экспериментальная установка, в которой использовался программируемый логический контроллер, преобразователь частоты и асинхронный двигатель. Основные компоненты системы управления ориентированием модуля приведены на рисунке 8.

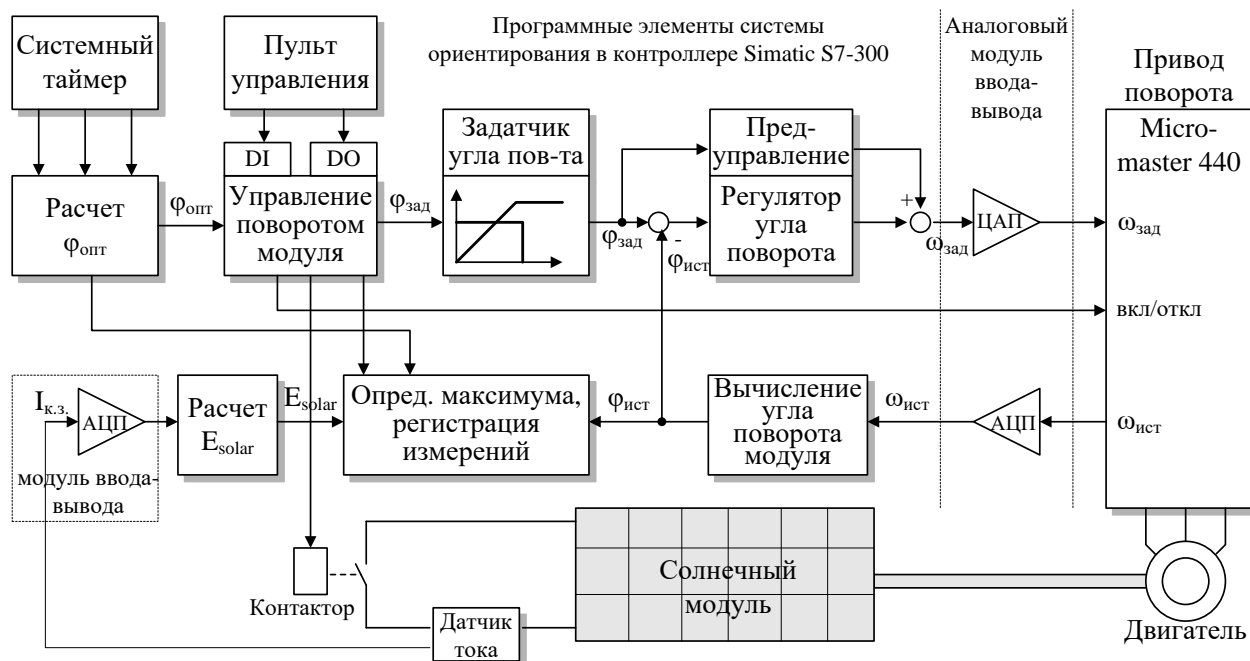


Рисунок 8 – Структура системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля на базе программируемого логического контроллера и преобразователя частоты

В ходе исследований было установлено, что для одноосной системы ориентирования с наклонной осью энергоэффективный угол поворота модуля относительно южного направления – φ_{opt} должен вычисляться по формуле

$$\varphi_{opt} = \arccos \left(\frac{\sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta}{\sqrt{(\sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta)^2 + (\cos \alpha_c \cdot \sin \gamma_c)^2}} \right), \quad (6)$$

где γ_c и α_c – углы положения Солнца, β – угол наклона полудиска системы ориентирования к земной поверхности.

Предложенный метод управления позволяет избежать процедуры поиска точки максимальной мощности и обеспечивает высокую эффективность при периодичности включения системы ориентирования – 0,5 часа. Конструкция экспериментальной установки приведена на рисунке 9.

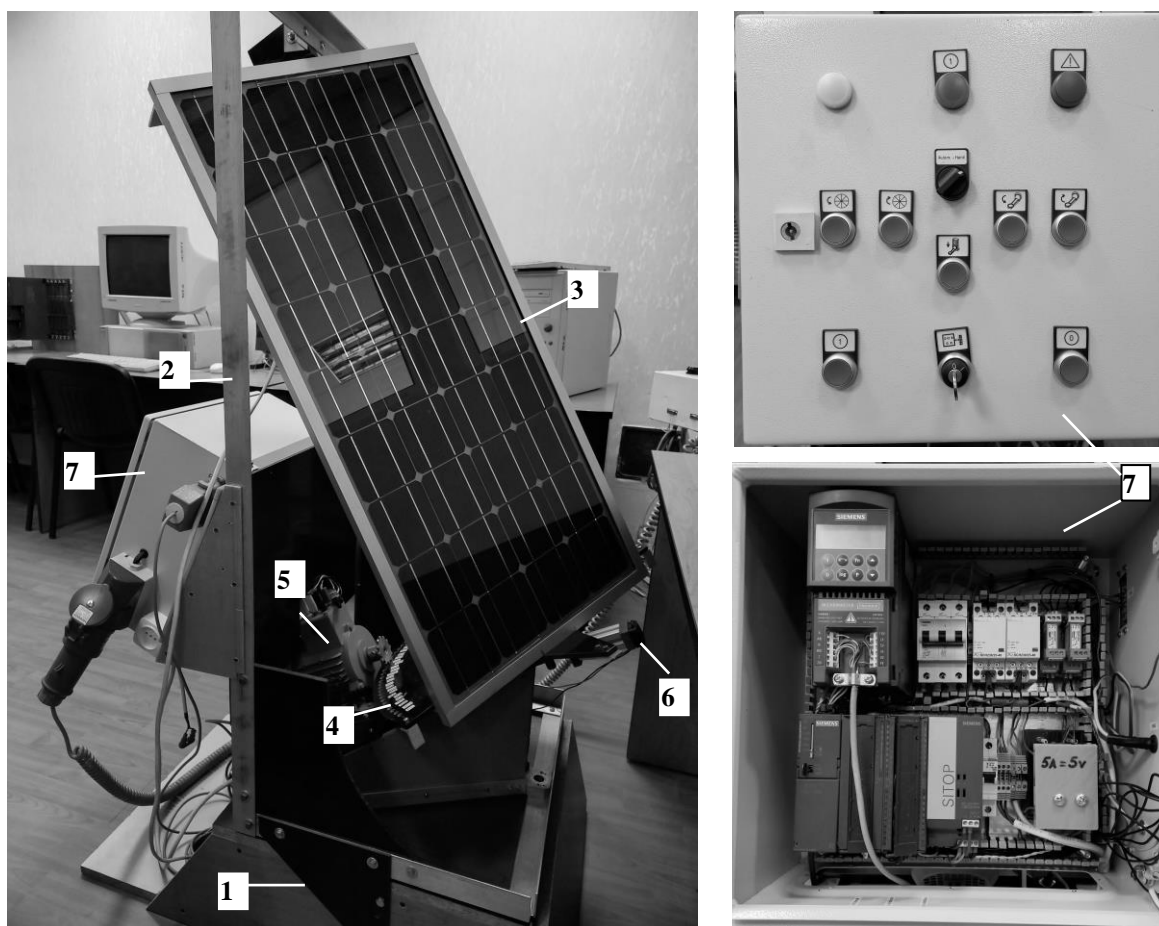


Рисунок 9 – Конструкция экспериментальной установки с системой управления ориентированием: 1 – неподвижное основание; 2 – рама; 3 – фотоэлектрический модуль; 4 – передаточный полудиск; 5 – асинхронный двигатель; 6 – центральный конечный выключатель (направление на юг) 7 – шкаф управления

Для географических координат г. Донецк теоретические расчеты показывают, что в среднегодовом выражении применение одноосной системы ориентирования с наклонной осью позволяет увеличить энергоэффективность фотоэлектрического модуля в условиях чистого неба до 28,5% при однократном ежемесячном изменении наклона оси вращения, что близко к аналогичному показателю для двухосной системы ориентирования.

В четвертом разделе работы «Рекомендации по практическому применению усовершенствованных систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии» сформулированы рекомендации по формированию управляющих сигналов и структуре контуров регулирования, выработанные в ходе выполнения работы.

Совместное использование адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса и расчетного метода определения скорости ветра требует большого количества вычислительных операций с плавающей запятой, поэтому целесообразно определить максимальную длительность выполнения таких операций для соблюдения требований к периоду дискретности системы управления по формуле

$$t_{\text{выч.опер.макс}} = \frac{T_{\text{ws}}}{30 \cdot (2 \cdot m_1 + m_{\text{рег}} + m_{\text{выч.}\Sigma})}, \quad (7)$$

где T_{ws} – постоянная времени объекта регулирования; m_1 , $m_{\text{рег}}$, $m_{\text{выч.}\Sigma}$ – количество вычислительных операций при адаптации регулятора, выполнении программы ПИ-регулятора и вычислении скорости ветра соответственно.

При подстановке значений m_1 , $m_{\text{рег}}$, $m_{\text{выч.}\Sigma}$ получим $t_{\text{выч.опер.макс}} = 0,93 \text{ мкс}$.

Эксперименты, проведенные для оценки энергоэффективности предложенной системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля 10 июня при чистом небе, позволили получить график изменения во времени плотности мощности солнечной энергии для фиксированного модуля – $E_{\text{solar}}(\varphi=0^\circ)$ и ориентированного модуля – $E_{\text{solar}}(\varphi_{\text{опт}})$ в течение дня (Рисунок 10).

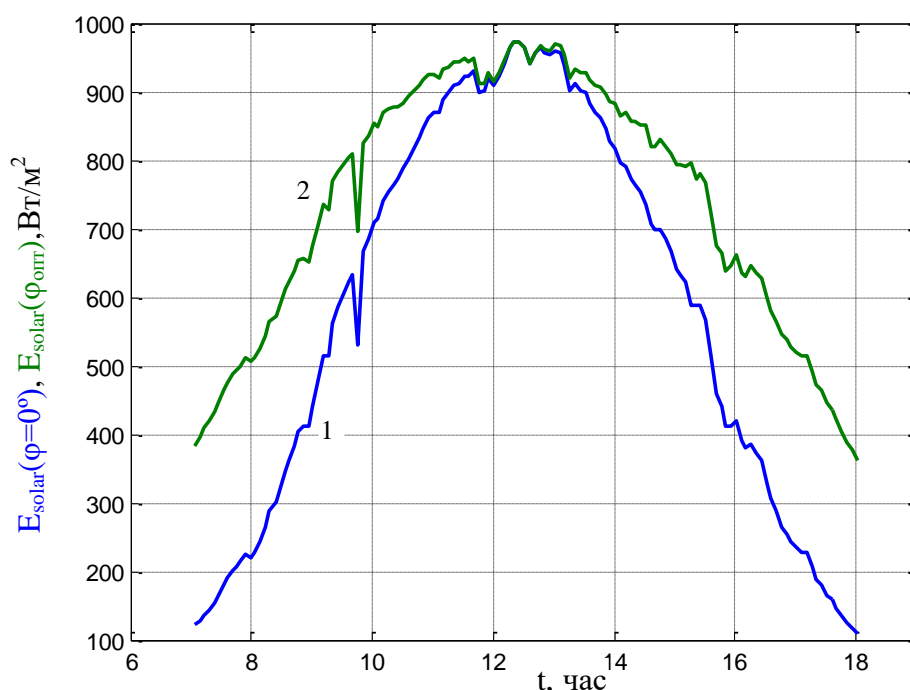


Рисунок 10 – График изменения плотности мощности солнечной энергии для: 1– фиксированного модуля $E_{\text{solar}}(\varphi=0^\circ)$, 2 – ориентированного модуля $E_{\text{solar}}(\varphi_{\text{опт}})$

Анализ графиков показывает, что энергия, поступающая на поверхность ориентируемого модуля – $W_{\text{Г,накл, ориент}} = 8,16 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, а для фиксированного модуля – $W_{\text{Г,накл, фикс}} = 6,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, т.е. эффективность повышается на 27,5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является законченным научным исследованием, в котором решена актуальная научно-практическая задача создания модифицированной системы управления ветрогенераторной установкой, в том числе разработана математическая модель системы регулирования и метод определения параметров регуляторов, а также разработана программа пользователя и аппаратное обеспечение системы ориентирования фотоэлектрического модуля, что позволяет повысить эффективность работы специализированных энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. В результате анализа состояния вопроса установлено, что имеющиеся математические модели и методы расчета параметров системы регулирования ветроустановки недостаточно учитывают особенности её функционирования в различных режимах работы. Так же недостаточно комплексно рассмотрены методы энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля.

2. Разработанные математические модели поведения скорости ветра, ветроколеса и генератора позволили усовершенствовать метод формирования управляющих сигналов в режиме пуска за счет управления pitch-углом лопасти в зависимости от текущей быстроходности ветроколеса, а так же проанализировать эффективность работы системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки. В результате анализа установлено, что при формировании задания на момент генератора в зависимости от текущей скорости вращения ветроколеса и поведении скорости ветра без учёта эффекта затенения башни, уровень отклонения коэффициента мощности ветроколеса от расчетного максимального значения незначителен (не превышает 0,2 %). При учёте влияния эффекта затенения башни на поведение скорости ветра уровень отклонения коэффициента мощности ветроколеса от расчетного максимального значения составляет приблизительно 3%, что обусловлено снижением скорости ветра в секторе затенения.

3. Усовершенствована методика определения параметров дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса в режиме ограничения мощности ветроустановки. В результате анализа нелинейных свойств ветроколеса установлено, что адаптацию регулятора скорости ветроколеса к изменяющимся параметрам объекта регулирования целесообразно обеспечивать за счёт применения нейросети, которая воспроизводит зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла лопасти.

4. Установлено, что в связи с неравномерностью скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса, обусловленной эффектом затенения башни, контур регулирования скорости вращения целесообразно разделить на три канала для обеспечения индивидуального регулирования скорости каждой лопастью. Предложенная трёхканальная система регулирования позволяет

сократить отклонения мощности установки от заданной в режиме ограничения до 2%, а также существенно уменьшает колебания аксиального усилия лопасти.

5. Показано, что для функционирования трёхканальной системы регулирования скорости вращения ветроколеса необходимо использовать расчетный метод определения скорости ветра в секторах вращения, основанный на применении нейросети, способной на базе момента ветроколеса и pitch-угла лопасти определить скорость ветра в секторах.

6. Разработана методика управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля с наклонной осью, при которой микропроцессорный контроллер вычисляет оптимальное с точки зрения энергоэффективности положение модуля относительно южного направления. Для такого вычисления достаточно данных системного таймера контроллера и географических координат местности. Установлена оптимальная периодичность формирования заданного угла поворота для системы регулирования положения модуля, которая составляет 0,5 часа.

7. Установлено, что в случае чистого неба применение разработанной методики для системы ориентирования с неизменным углом наклона оси вращения позволяет увеличить годовую энергоэффективность фотоэлектрического модуля на 25 % по сравнению с жестко закрепленным модулем. Применение такой методики для системы ориентирования с однократно в месяц изменяемым углом наклона оси вращения позволяет увеличить энергоэффективность модуля на 28,5 % по сравнению с жестко закрепленным модулем, что по своему показателю практически совпадает с увеличением энергоэффективности за счет применения двухосной системы ориентирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки ДНР:

1. **Черников, В.Г.** Разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля / **Черников В.Г.**, Павлыш В.Н. // Научный журнал «Информатика и кибернетика». – Донецк, 2021. – №4(26). – С. 14–21.

2. **Черников, В.Г.** Разработка методики определения параметров адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса / **Черников В.Г.** // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2022. – №1(24). – С. 13–28.

3. Павлыш, В.Н. Модификация алгоритма управления фотоэлектрическим модулем с применением 3-D технологий / Павлыш В.Н., Зори С.А., **Черников В.Г.** // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2022. – №3(26) – С. 29-40.

– в профессиональных изданиях ВАК Украины:

4. **Черников, В.Г.** Оценка энергоэффективности работы ветроустановки в режиме максимальной мощности с использованием спектральной модели ветра Ван дер Ховена / Черников В.Г. // Научно-производственный журнал Кременчугского национального университета «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчуг, 2014. – №2(26). – С. 78–84.

– в других изданиях:

5. **Черников, В.Г.** Стабилизация выходной мощности ветрогенератора за счет использования кинетической энергии ветроколеса / Черников В.Г. // Міжвідомчий науково-технічний збірник одеського національного технічного університету «Електромашинобудування та електрообладнання». – Киев: «Техніка», 2006. – №66. – С. 211–213.

6. **Черников, В.Г.** Стабилизация мощности ветрогенератора посредством механизма поворота лопасти / Черников В.Г. // Міжвідомчий науково-технічний збірник одеського національного технічного університету «Електромашинобудування та електрообладнання». – Киев: «Техніка», 2006. – №67. – С. 21–26.

7. **Черников, В.Г.** Электромеханическая модель ротора ветроустановки в квазистационарных режимах работы / Черников В.Г. // Научно-прикладной журнал «Відновлювальна енергетика». – Киев: ІВЕ НАН України, 2007. – №2(9). – С. 51–54.

8. **Черников, В.Г.** Построение двухконтурной системы стабилизации мощности ветрогенераторной установки / Черников В.Г. // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2008. – №30. – С. 349–350.

– по материалам конференций:

9. **Черников, В.Г.** Математическое и физическое моделирование систем регулирования мощности ветрогенераторных установок / Черников В.Г. // Материалы 8-ой Международной конференции «Відновлювальна енергетика 21-го століття». – АР Крым, п. Николаевка – 17–21 сентября 2007. – С. 146–149.

10. **Черников, В.Г.** Стабилизация выходной мощности ветрогенераторных установок с асинхронным генератором средствами системы регулирования / Черников В.Г. // Научные труды ДонНТУ, серия «Електротехніка і енергетика». – Донецк, 2013. – №2(15) – С. 265–272.

11. Брухаль, А.А. Математическая модель поведения скорости ветра для компьютерного и физического моделирования работы ветроустановок / Брухаль А.А., **Черников В.Г.** // Сборник материалов 5-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк, 21–23 мая 2019. – Том 2. – С. 37–41.

12. **Черников, В.Г.** Методы увеличения выработки мощности фотоэлектрических модулей / Черников В.Г., Чепига А.А. // Сборник материалов 5-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк, 2019. – Том 2. – С. 23–30.

13. **Черников, В.Г.** Оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей посредством применения системы ориентации / Черников В.Г., Горбунов А.А. // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Молодая мысль: наука, технологии, инновации». – Братск: БГУ, 13–17 апреля 2020. – С. 231–235.

14. **Черников, В.Г.** Применение системы ориентации для увеличения энергоэффективности фотоэлектрического модуля / Черников В.Г., Митин Д.А. // Тезисы докладов 27-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ, 11–12 марта 2021. – С. 1186.

15. **Черников, В.Г.** Тенденции и перспективы развития возобновляемых источников энергии / Черников В.Г., Вояновский В.С. // Тезисы докладов 27-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ, 11–12 марта 2021. – С. 1188.

16. **Черников, В.Г.** Совершенствование программы регулирования дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса с использованием нейросети / Черников В.Г. // Материалы X Международной научно-практической конференции «Информационные технологии, проблемы и решения». – Уфа, УГНТУ, 24–27 мая 2022. №1(18) – С. 54–64.

Личный вклад соискателя в публикациях: [1, 3] – разработка алгоритма и программы управления системой ориентирования; [11] – разработка модели поведения скорости ветра; [12, 13, 14] – анализ эффективности применения различных систем ориентирования; [15] – анализ тенденций развития систем управления ВИЭ.

АННОТАЦИЯ

Черников В.Г. Совершенствование систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии. – На правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки) – ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2023.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача создания модифицированной системы управления ветрогенераторной установкой, в том числе разработана математическая модель системы регулирования и метод определения параметров регуляторов, а так же разработана программа пользователя и аппаратное обеспечение системы ориентирования фотоэлектрического модуля, что позволяет повысить эффективность работы специализированных энергоустановок на базе ВИЭ. Для решения поставленной задачи проанализированы существующие модели и

методы управления ветрогенераторными и фотоэлектрическими установками. Разработана программа управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля, позволяющая провести оценку повышения энергоэффективности ориентируемого модуля по сравнению с зафиксированным модулем на экспериментальной установке.

Разработана математическая модель системы регулирования ветрогенераторной установки, позволяющая выбрать оптимальные параметры регуляторов и оценить поведение рабочих параметров ветроустановки в основных режимах. Разработан расчётный метод определения скорости ветра в различных частях плоскости вращения ветроколеса, реализующий принцип раздельного управления лопастями в условиях эффекта затенения башни.

Ключевые слова: ветроколесо, ветрогенератор, контур регулирования, модель поведения ветра, нейросеть, дискретный регулятор, фотоэлектрический модуль, система ориентирования, программируемый контроллер, метод управления, эксперимент, анализ.

ABSTRACT

Chernikov V.G. **Improvement of control systems for specialized power units based on renewable energy sources.** – On the rights of the manuscript.

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by specialty 2.3.3. "Automation and control of technological processes and production" (technical sciences). – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Donetsk national technical university", Donetsk, 2023.

In the dissertation work, the actual scientific and practical task of creating a modified control system for a wind turbine units was solved, including a mathematical model of the control system and a method for determining the parameters of regulators, as well as a user program and hardware for the orientation system of the photovoltaic module, which allows to increase the efficiency of specialized power units based on renewable energy sources.

To solve this problem, the existing models and methods of control of wind generators and photovoltaic modules are analyzed. A program for controlling the orientation system of the photovoltaic module has been developed, which allows an assessment of the energy efficiency improvement of the oriented module in comparison with the fixed module on the experimental unit. A mathematical model of the wind turbine control system has been developed, which allows choosing the optimal parameters of the regulators and evaluating the behavior of the operating parameters of the wind turbine in the main modes. A computational method for determining wind speed in different parts of the plane of rotation of the wind turbine has been developed, which allows implementing the principle of separate control of the blades in the conditions of the tower shading effect.

Keywords: wind turbine, wind generator, control loop, wind behavior model, neural network, discrete controller, photoelectric module, orientation system, programmable controller, control method, experiment, analysis.

Подписано в печать 26.09.2023. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 09/01.

Цифровая типография ДокументКопиЦентр (ИП Ивченко М.В.)
ДНР, 83015, г. Донецк, ул. Артёма, 131а
ОГРНИП 323930100210451, ИНН 614011228494