

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



На правах рукописи

УДК 004.942: 004.896

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)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Павлыш Владимир Николаевич

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь диссертационного
совета 02.2.006.02
кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

Донецк 2023

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....	13
1.1 Классификация и основные характеристики ветроколес.....	13
1.2 Принципы построения систем регулирования современных ветрогенераторных установок.....	19
1.3 Основные характеристики фотоэлектрических модулей и методы управления для повышения их энергоэффективности.....	23
1.4 Обоснование путей совершенствования систем управления.....	30
1.5 Цель и задачи исследований	35
РАЗДЕЛ 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКОЙ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОКОЛЕСА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ.....	37
2.1 Математическая модель поведения скорости ветра.....	37
2.1.1 Модель Ван дер Ховена.....	37
2.1.2 Модель поведения ветра на основе измеренных параметров ветроустановки.....	41
2.2 Математическая модель ветроколеса.....	44
2.2.1 Методика расчета модели ветроколеса.....	44
2.2.2 Коррекция модели ветра с учетом модели ветроколеса и эффекта затенения башни.....	57
2.3 Структура системы управления ветроустановкой с переменной скоростью вращения ветроколеса и особенности ее функционирования в различных режимах работы.....	66
2.4 Совершенствование работы системы управления ветроустановкой в режиме пуска, моделирование пускового режима.....	72

2.5 Оценка эффективности работы системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки генератора.....	81
2.5.1 Основная задача системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки.....	81
2.5.2 Математическая модель генератора во вращающейся системе координат.....	83
2.5.3 Структура системы векторного регулирования момента генератора.....	89
2.5.4 Моделирование работы системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки.....	93
2.6 Совершенствование работы системы управления ветроустановкой в режиме ограничения мощности генератора.....	101
2.6.1 Основные задачи и особенности работы системы управления ветроустановкой в режиме ограничения мощности, оптимизация контура скорости вращения ветроколеса.....	101
2.6.2 Совершенствование параметров функционирования контура скорости вращения ветроколеса с учетом эффекта затенения башни.....	110
2.7 Выводы по разделу 2.....	125
РАЗДЕЛ 3 ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ РАБОТЫ.....	127
3.1 Разработка метода энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля.....	127
3.1.1 Теоретические основы метода энергоэффективного управления системой ориентирования.....	127
3.1.2 Структура и программная реализация системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля.....	131
3.1.3 Аппаратная реализация системы управления ориентированием	

фотоэлектрического модуля.....	141
3.1.4 Экспериментальная оценка работоспособности метода энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля.....	153
3.2 Теоретическая оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей за счет применения систем ориентирования.....	156
3.3 Выводы по разделу 3.....	169
РАЗДЕЛ 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ЭНЕРГО- УСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....	171
4.1 Рекомендации по практическому применению усовершенствованных систем управления ветрогенераторными установками.....	171
4.2 Рекомендации по практическому применению систем управления ориентированием фотоэлектрических модулей.....	178
4.3 Выводы по разделу 4.....	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	183
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	186
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ А МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА И ВЕТРОКОЛЕСА.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ Б МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ.....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ В СЛОВО УПРАВЛЕНИЯ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ MICROMASTER 440, ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ, ДАННЫЕ РЕГИСТРАЦИИ ПЛОТНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ.....	223

ПРИЛОЖЕНИЕ Г ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ STEP 7.....	241
ПРИЛОЖЕНИЕ Д КОПИИ ДОКУМЕНТОВ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	297

ВВЕДЕНИЕ

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 ветроколёс, 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 натурных 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.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

1.1 Классификация и основные характеристики ветроколес

За долгий период использования человечеством ветровой энергии было разработано достаточно большое количество конструкций ветроколёс [1], основные типы которых представлены на рисунке 1.1. Согласно этому рисунку классификацию ветроколёс можно провести по следующим главным принципам: во-первых, это принцип, по которому ветроколесо приводится в движение, во-вторых, это направление оси вращения ветроколеса. С точки зрения первого принципа ветроколеса подразделяются на те, которые приводятся в движение за счет приводной силы лопасти (далее принцип приводной силы), и те, которые вращаются за счет разного сопротивления частей ветроколеса ветровому потоку (далее принцип сопротивления). С точки зрения второго принципа ветроколеса разделяются на ветроколеса с горизонтальной и вертикальной осью вращения.

Мощность, которую ветровой поток отдает ветроколесу можно определить по формуле [2]

$$P_w = c_{pw} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot v^3, \quad (1.1)$$

где c_{pw} – коэффициент мощности ветроколеса, ρ – плотность воздуха, F – площадь прохождения ветрового потока, v – скорость ветра перед ветроколесом.

Таким образом, коэффициент мощности c_{pw} является важнейшей характеристикой ветроколеса, так как он показывает, какую часть своей кинетической энергии ветер отдает ветроколесу. Коэффициент мощности ветроколеса зависит от быстроходности, которая определяется по формуле

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega_w \cdot R}{v}, \quad (1.2)$$

где u – линейная скорость конца лопасти, ω_w – угловая скорость вращения ветроколеса, R – радиус ветроколеса.

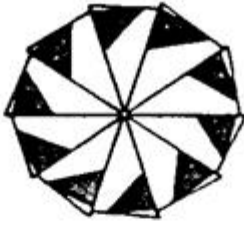
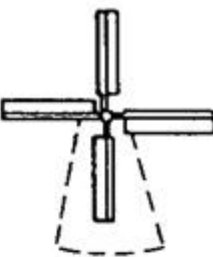
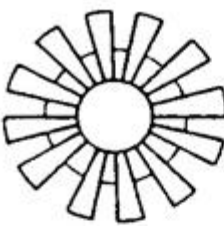
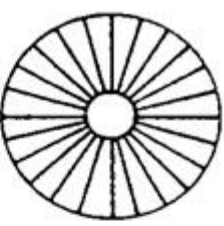
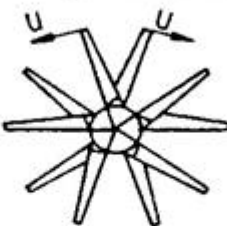
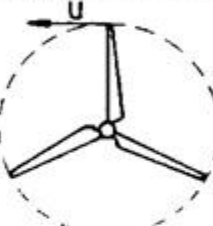
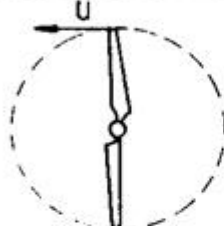
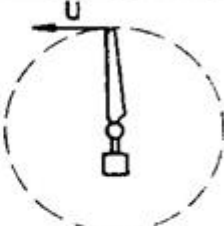
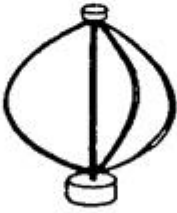

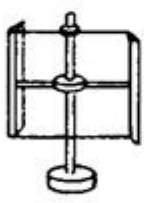
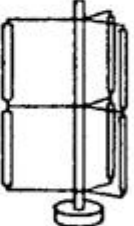
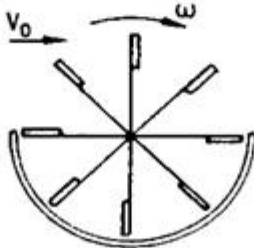
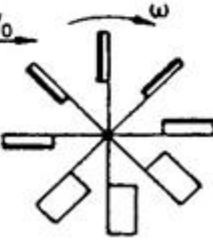
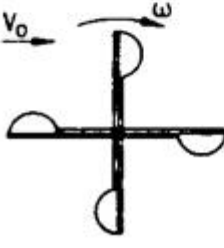
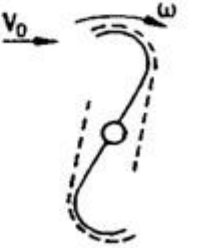
Принцип приводной силы, горизонтальная ось вращения	 Греческое ветроколесо	 Голландское ветроколесо	 Американское ветроколесо	 Бициклическое ветроколесо
	 Два 5-лопастных ветроколеса	 3-лопастное ветроколесо	 2-лопастное ветроколесо	 1-лопастное ветроколесо
Принцип приводной силы, вертикальная ось вращения	 3-лопастной ротор Дарреуса	 Δ -видный ротор Дарреуса	 H-образный ротор Дарреуса	 Гироветроколесо
Принцип сопротивления, горизонтальная или вертикальная ось	 Полузакрытое ветроколесо	 С откидными лопастями	 Чашечный анемометр	 Ротор Савониуса

Рисунок 1.1 – Типы ветроколёс и их классификация

Характер зависимости коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности для нескольких наиболее распространенных типов ветроколёс [3] приведен на рисунке 1.2. Этот рисунок демонстрирует, что существует

быстроходность, при которой коэффициент мощности ветроколеса имеет наибольшее значение. Такую быстроходность обычно называют расчетной или оптимальной быстроходностью. Причем каждый тип ветроколеса имеет свою оптимальную быстроходность.

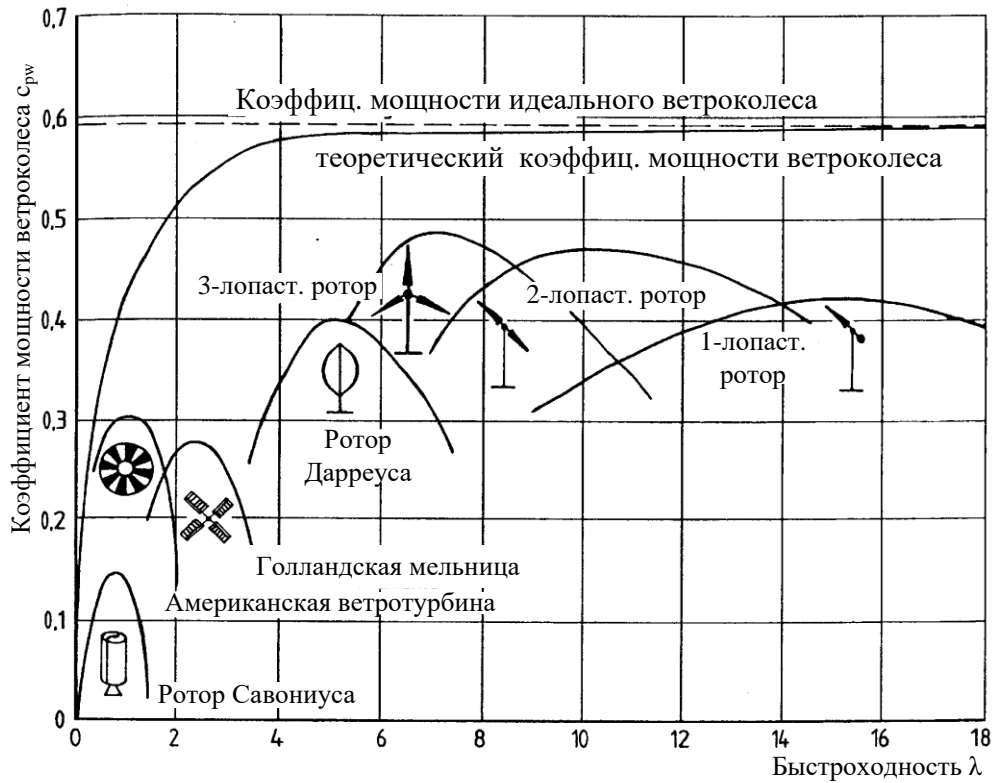


Рисунок 1.2 — Зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности для разных типов ветроколес

В 20-ых годах прошлого века Альбертом Бетцем была разработана теория [3], согласно которой максимально возможный коэффициент мощности идеального ветроколеса, работающего по принципу приводной силы, составляет $C_{pwmax}=16/27$ или 0,59. Обычно реальные ветроколеса имеют несколько меньшие показатели коэффициента мощности, так как сказываются аэродинамические потери, которые не учитываются в идеальном ветроколесе [1]. На рисунке 1.2 можно увидеть, что наиболее приблизилось к идеальному ветроколесу трехлопастное ветроколесо с максимальным коэффициентом мощности $C_{pwmax}=0,47 \div 0,48$. Этот достаточно высокий показатель обусловил широкое распространение трехлопастного ветроколеса.

Пример детализированной зависимости коэффициента мощности трехлопастного ветроколеса от быстроходности [4] приведён на рисунке 1.3.

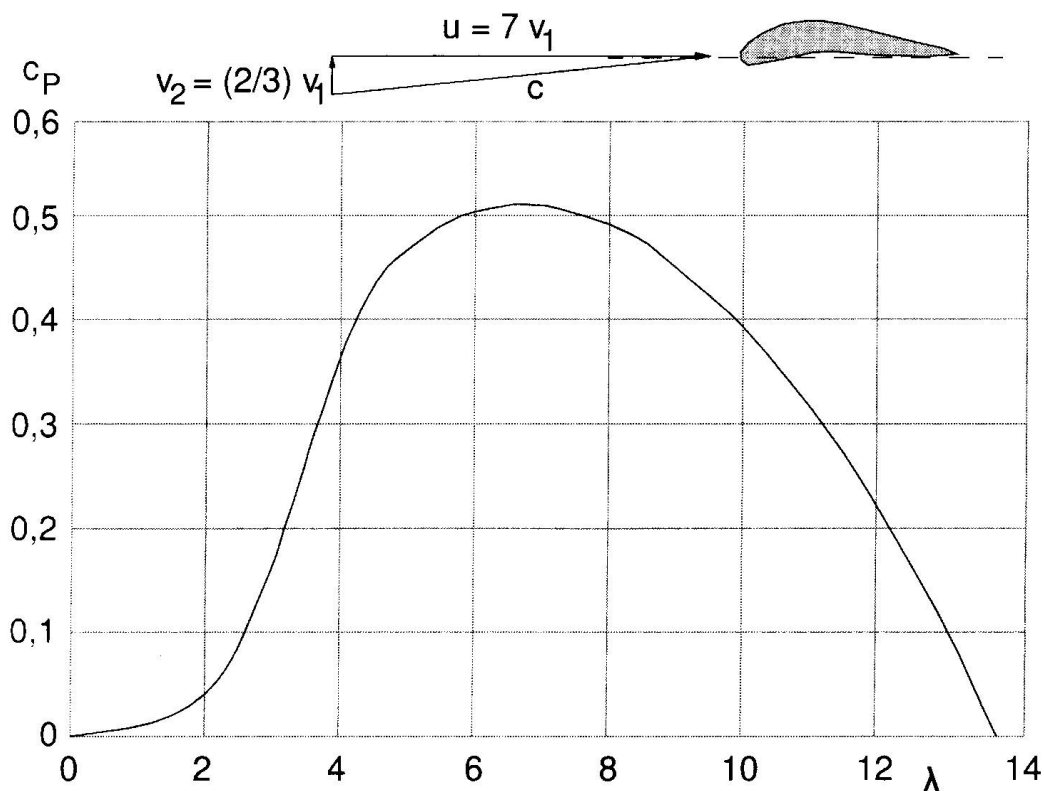


Рисунок 1.3 – Пример зависимости коэффициента мощности трехлопастного ветроколеса от быстроходности (расчетная быстроходность $\lambda_d=7$)

Формула (1.2) и характер зависимости коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности (Рисунок 1.3) позволяют сделать важный вывод о том, что при изменениях скорости ветра поддерживать оптимальную быстроходность, а значит и максимальный коэффициент мощности ветроколеса возможно только за счет изменения частоты вращения ветроколеса.

Если зафиксировать скорость ветра и изменять скорость вращения ветроколеса, то можно построить семейство характеристик, которые будут показывать зависимость мощности ветроколеса от скорости его вращения [4, 5]. Пример такого семейства характеристик приведен на рисунке 1.4. Холмообразный характер приведенных на рисунке 1.4 зависимостей является прямым следствием характеристики $c_{pw}(\lambda)$, изображенной на рисунке 1.3. При

этом точки максимума характеристик мощности соответствуют оптимальной быстроходности ветроколеса.

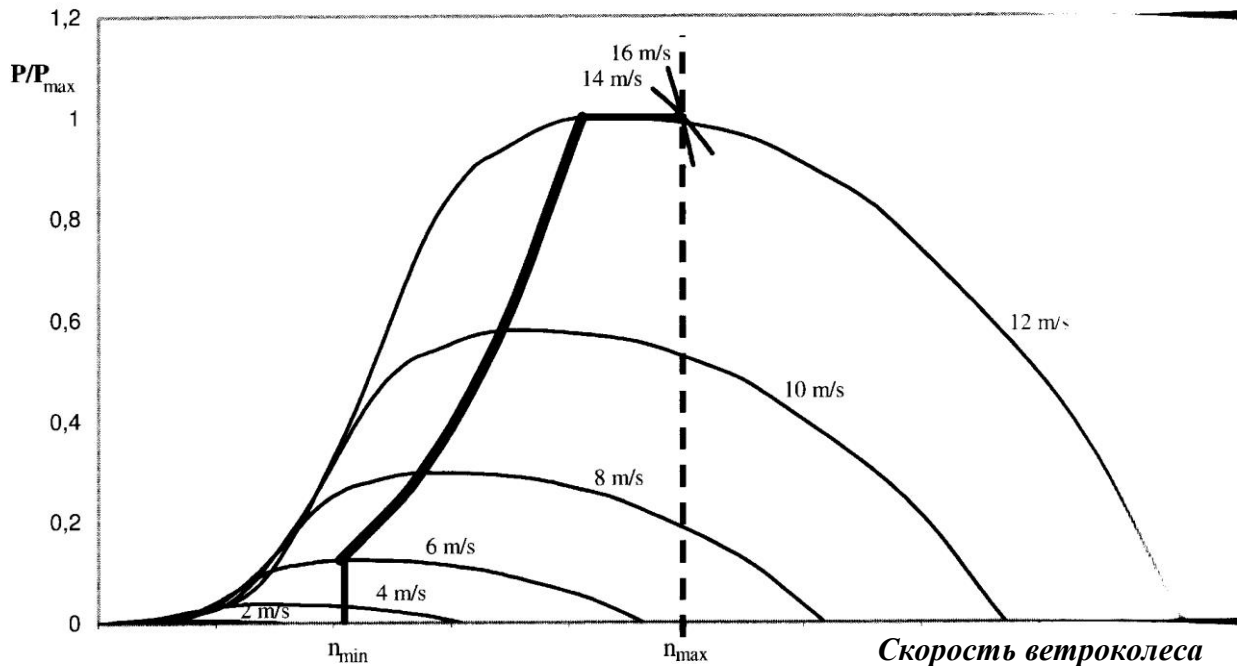


Рисунок 1.4 – Семейство характеристик зависимости мощности трехлопастного ветроколеса от скорости его вращения

Соединив точки максимума, можно получить линию максимальной мощности ветроколеса (Рисунок 1.4). Очевидно, что работа на линии максимальной мощности возможна только для генератора с переменной частотой вращения. Ветрогенераторы с фиксированной частотой вращения могут работать в точке максимальной мощности только при определенной скорости ветра, чаще всего это 8 м/с. При отклонении скорости ветра от этого значения генераторы такого типа будут недополучать мощность от ветрового потока, т.е. работать в неоптимальном режиме. Приведенные аргументы не оставляют сомнения в том, что в концепцию современных ветроустановок должна закладываться возможность изменения частоты вращения ветроколеса, так как именно это позволяет оптимально использовать энергию ветра [6, 7].

Однако в случае слишком больших значений скорости ветра возникает необходимость ограничения приводного момента и мощности ветроколеса для защиты генератора от перегрузок. В современных ветроустановках с

ветроколесами, которые работают по принципу приводной силы, ограничение мощности осуществляют за счет изменения установочного угла лопасти. Увеличение установочного угла приводит к уменьшению угла атаки, под которым воздушный поток набегаает на лопасть ветроколеса. Снижение угла атаки уменьшает величину приводной силы, а это в свою очередь приводит к снижению вращающего момента ветроколеса [8, 9]. Описанный принцип ограничения мощности показан на рисунке 1.5.

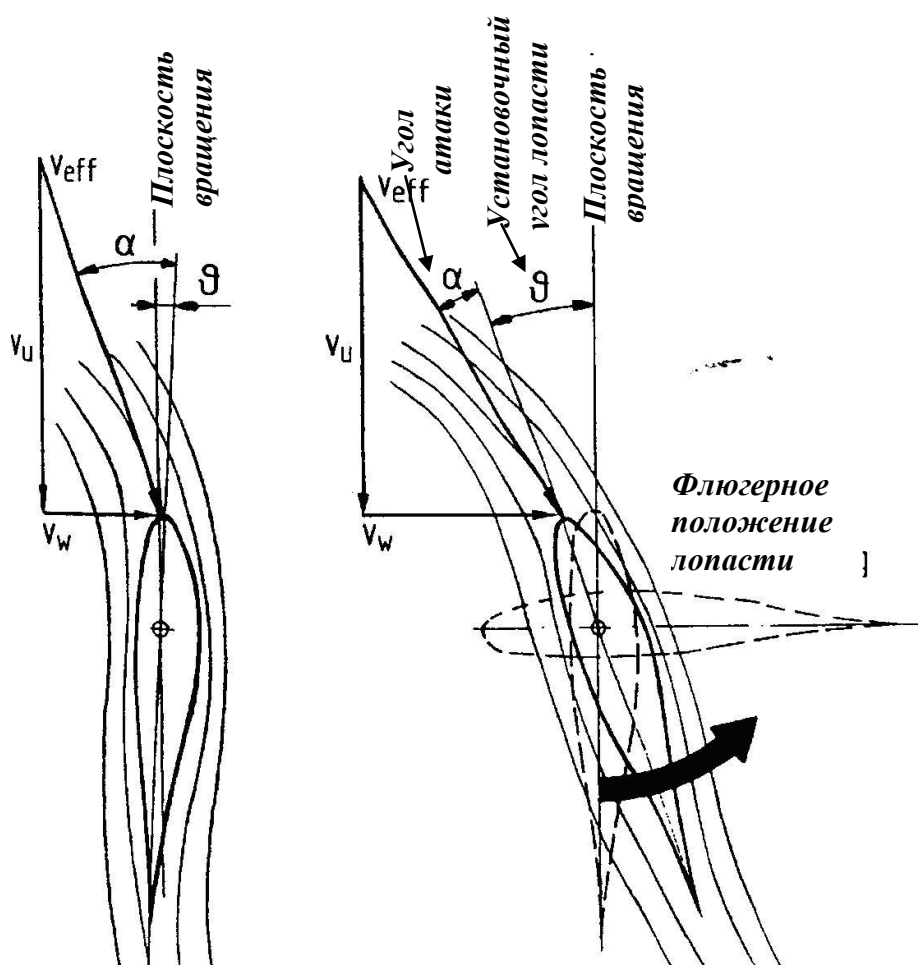


Рисунок 1.5 – Принцип ограничения мощности ветроколеса за счет изменения установочного угла лопасти

Приведенный на рисунке 1.5 способ регулирования мощности получил название pitch-регулирование. При этом под термином pitch понимают отклонение установочного угла лопасти от оптимального положения.

Помимо быстротходности pitch-угол является еще одним фактором, который влияет на коэффициент мощности ветроколеса. Семейство графиков зависимости

коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности, для разных значений pitch-угла [4], показано на рисунке 1.6.

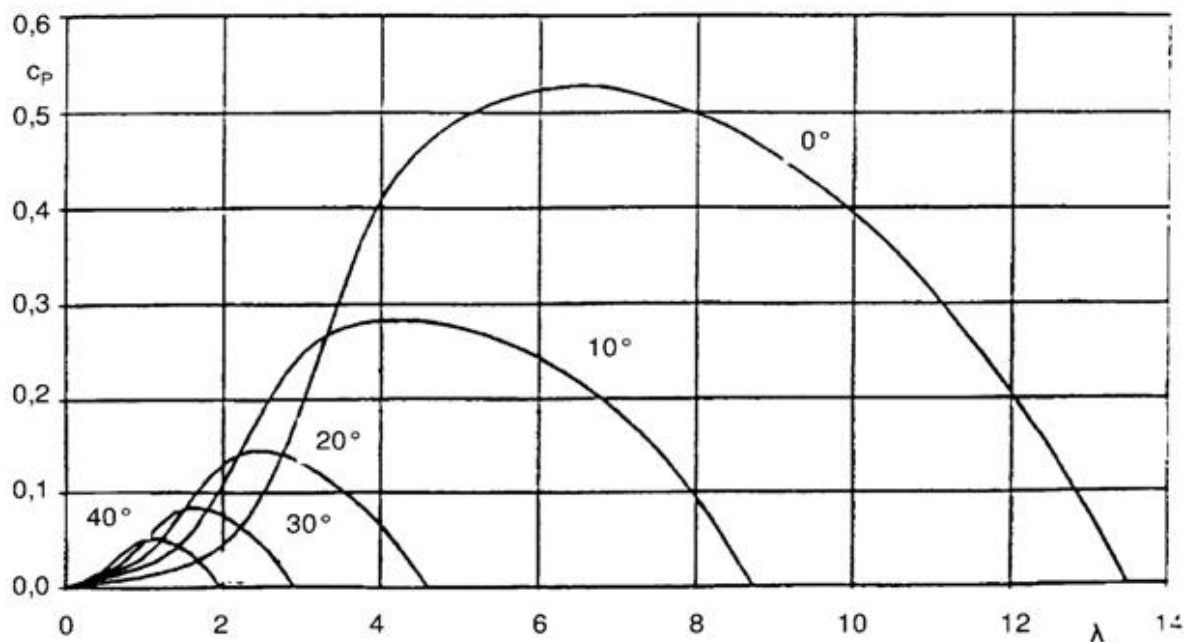


Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности для разных значений pitch-угла

Приведенный рисунок демонстрирует, что при отклонении установочного угла лопасти от оптимального положения на 40° максимальный коэффициент мощности ветроколеса уменьшается практически в 10 раз. Для реализации принципа pitch-регулирования трехлопастные ветроколеса современных ветроустановок оснащены тремя позиционными электроприводами, которые способны поворачивать лопасти на заданный угол по отношению к плоскости вращения ветроколеса [3, 10].

1.2 Принципы построения систем регулирования современных ветрогенераторных установок

В современных ветроустановках был реализован принцип разделения частоты сети от частоты вращения генератора за счет использования преобразователей частоты [11, 12]. Ветроустановки, которые работают по этому

принципу, получили название – ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса. Это дало целый ряд преимуществ:

- ветроколесо могло плавно изменять скорость вращения, что позволяло поддерживать максимальный коэффициент мощности ветроколеса в диапазоне от стартовой скорости ветра до номинальной, т.е. большую часть времени работать на линии максимальной мощности [13, 14];

- применение преобразователей дало возможность регулировать электромагнитный момент генератора, а это в свою очередь означало, что регулирование мощности может выполнять быстродействующая электрическая система, способная своевременно реагировать на любые изменения скорости ветра, и обеспечивать при этом точность стабилизации мощности на уровне 7–8 % отклонения от заданного значения [11, 15];

- система pitch-регулирования решала задачу контроля скорости вращения ветроколеса, так как с этой задачей этой механической системе намного легче справиться, чем с регулированием мощности, по причине большого момента инерции ветроколеса [3, 16];

- проблемы возникновения пусковых токов автоматически исчезали за счет того, что преобразователи позволяли осуществлять плавный пуск генератора [5, 17];

- транзисторные преобразователи позволили регулировать смещение по фазе между током установки и напряжением сети, т.е. осуществлять регулирование реактивной мощности.

Структурная схема концепции ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса, приведена на рисунке 1.7 [18]. На схеме можно четко выделить три контура регулирования: во-первых, это контур регулирования скорости вращения ветроколеса, в котором скорость вращения регулируется за счет pitch-механизма поворота лопасти, во-вторых, это контур регулирования активной мощности генератора, где активная мощность регулируется за счет влияния на электромагнитный момент генератора и в-третьих, это контур регулирования реактивной мощности установки за счет свободной ориентации

вектора выходного напряжения сетевого инвертора по отношению к вектору напряжения сети. Работа ветроустановки обеспечивается одновременным функционированием перечисленных контуров регулирования. Для контроля основных параметров используются датчики скорости ветра, скорости вращения ветроколеса и угла поворота лопасти.

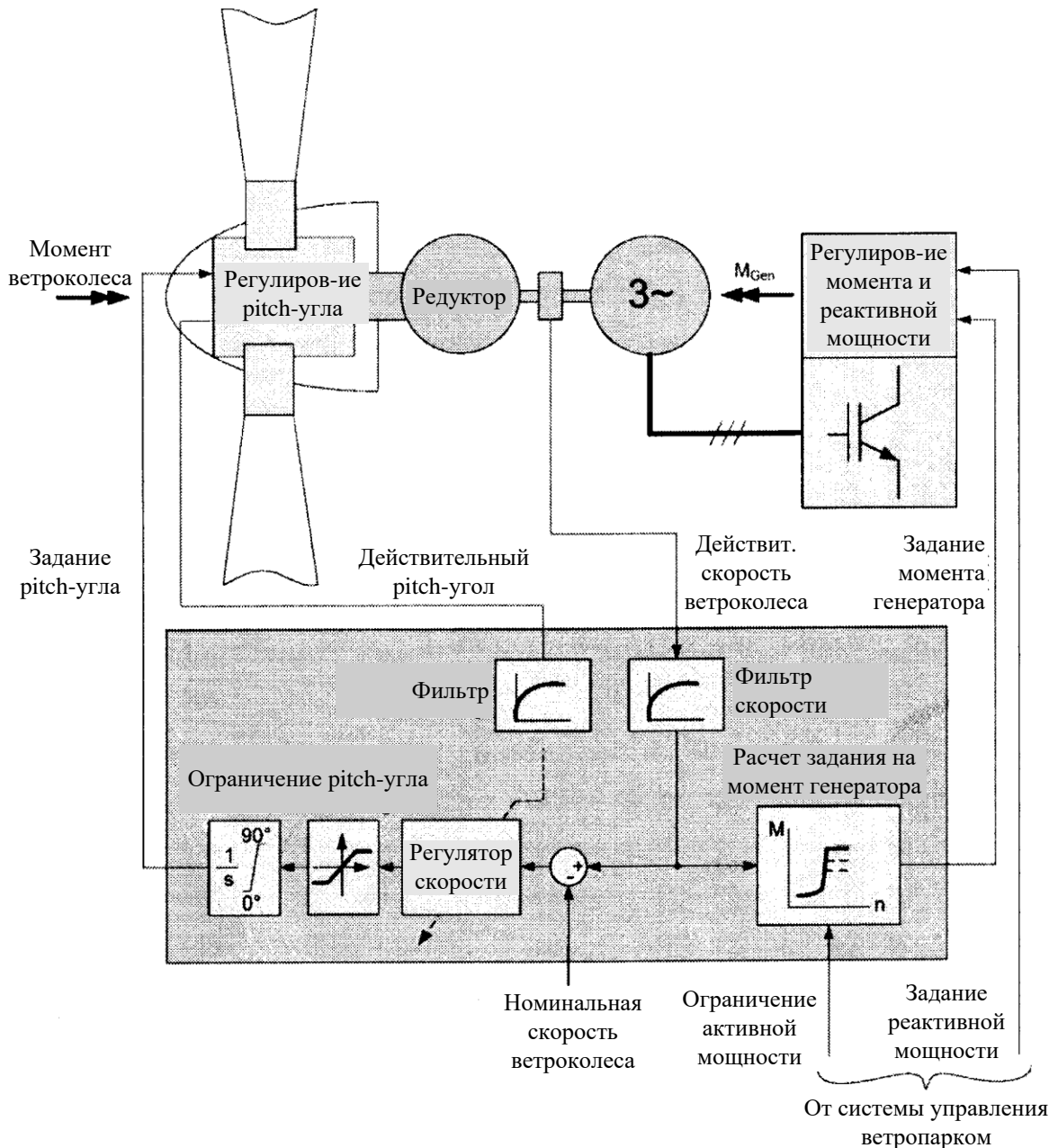


Рисунок 1.7 – Обобщенная структурная схема системы регулирования ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса

Обобщенная структурная схема системы регулирования, на которой выделены контур регулирования скорости вращения ветроколеса и контур

регулирования активной мощности [3], изображена на рисунке 1.8. Как показывает рисунок, выходной управляющий сигнал регулятора скорости является заданием на установочный угол лопасти – $\delta_{зад}$, а выходной управляющий сигнал регулятора мощности является заданием на электромагнитный момент генератора – $M_{ген}$.

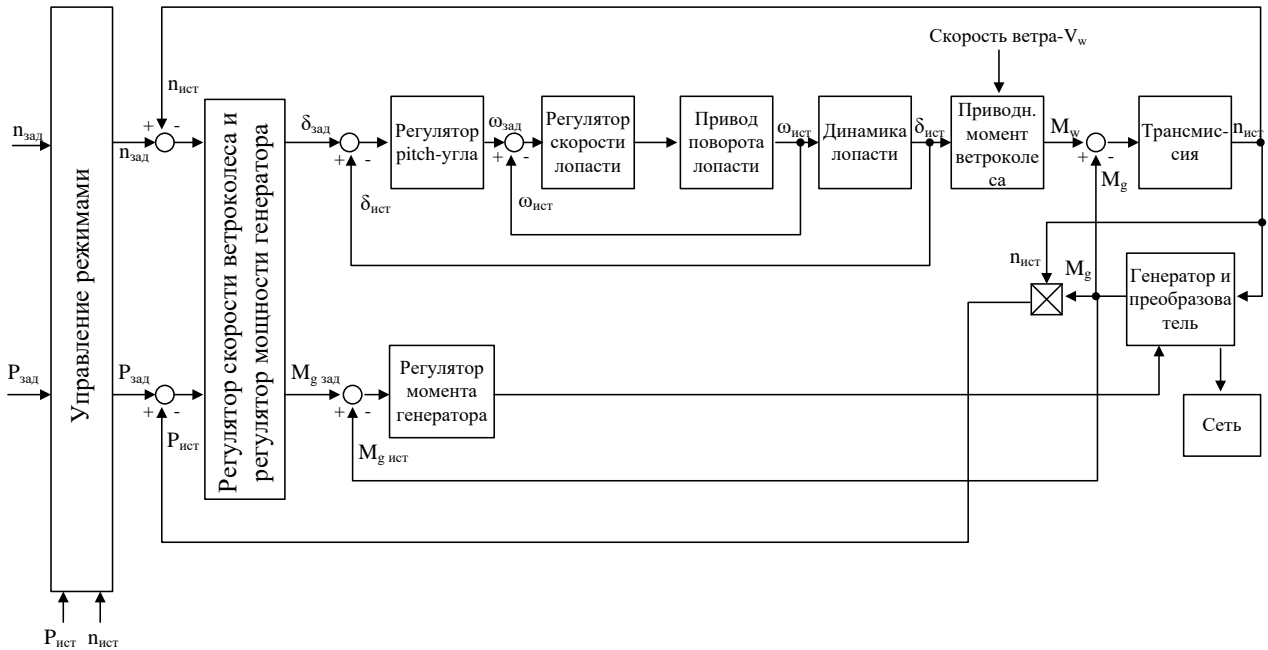


Рисунок 1.8 – Структурная схема контуров регулирования мощности генератора и скорости вращения ветроколеса для ветроустановки с переменной частотой вращения

В настоящее время принцип работы установки с переменной частотой вращения реализуется на базе двух основных концепций [19], а именно: с преобразователем частоты в статоре синхронного или асинхронного генератора с к. з. ротором на полную мощность генератора и с преобразователем частоты в роторе машины двойного питания (Рисунок 1.9). Каждая из приведенных концепций не является идеальной и имеет свои преимущества и недостатки. В качестве преимуществ концепции ветроустановки с использованием синхронного генератора или асинхронного генератора с к. з. ротором можно назвать отсутствие токосъемных колец, возможность безредукторного исполнения (для синхронного генератора) и большая глубина регулирования скорости вращения (1:4) [20].

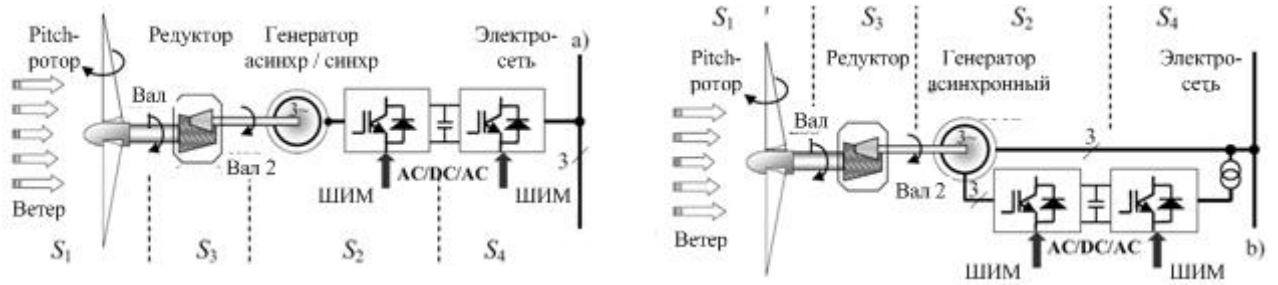


Рисунок 1.9 – Структура концепций ветрогенераторных установок с переменной скоростью вращения ветроколеса: а – с преобразователем частоты в статоре на полную мощность генератора, б – на основе машины двойного питания. S1 – аэродинамическая система, S2 – преобразователь частоты со стороны генератора, S3 – механическая трансмиссия, S4 – сетевой инвертор

Недостатками упомянутой концепции является высокая стоимость синхронного генератора и использование преобразователя частоты на полную мощность генератора. Преимуществом концепции на основе машины двойного питания является использование преобразователя частоты с меньшей мощностью, равной 30-40% мощности генератора, недостатки этой концепции – невозможность безредукторного исполнения, наличие токосъемных колец и меньшая глубина регулирования скорости вращения (1:2) [20].

1.3 Основные характеристики фотоэлектрических модулей и методы управления для повышения их энергоэффективности

Основу фотоэлектрических модулей составляют фотоэлектрические ячейки. В [21, 22] показано, что фотоэлектрическая ячейка представляет собой плоскую полупроводниковую пластину с р-п переходом и металлическими контактами с обеих сторон (Рисунок 1.10). При проникновении света вглубь полупроводника в нем при воздействии фотонов образуются электронно-дырочные пары, которые разделяются диффузионным электрическим полем р-п перехода. Таким образом, в полупроводниковом слое с n-проводимостью скапливается отрицательный заряд, а в слое с р-проводимостью положительный заряд, и между металлическими контактами возникает напряжение.

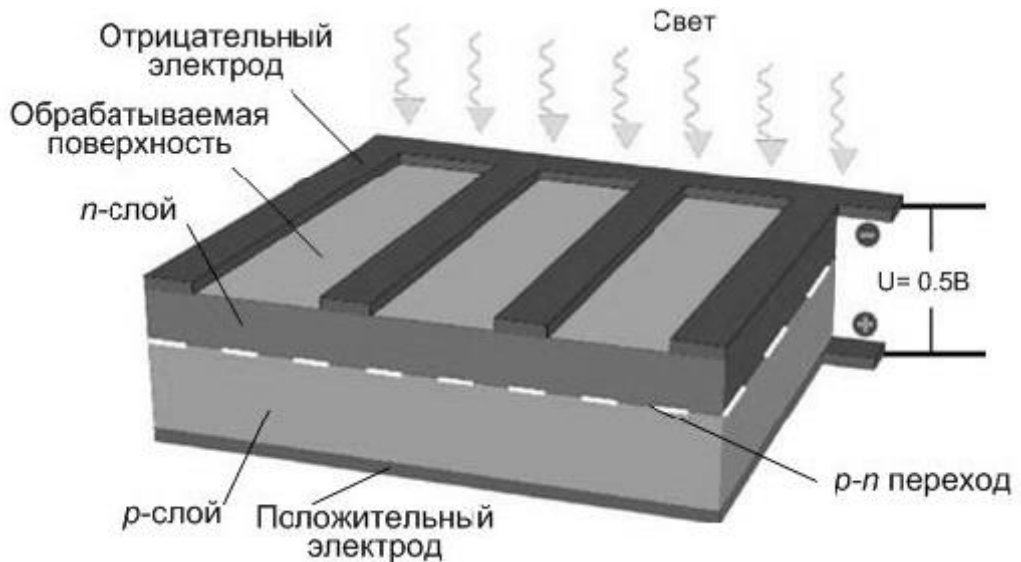


Рисунок 1.10 – Структура фотоэлектрической ячейки

В [23] показано, что для описания электрических параметров фотоэлектрической ячейки часто используют схему замещения (Рисунок 1.11).

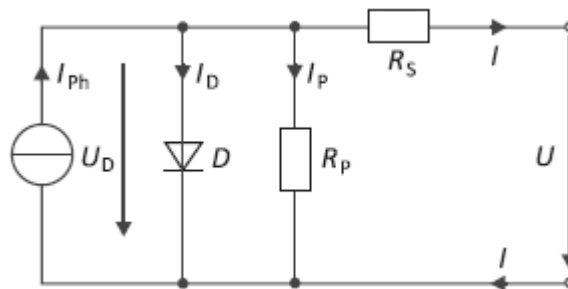


Рисунок 1.11 – Схема замещения фотоэлектрической ячейки

Показанные на схеме последовательное сопротивление R_s и параллельное сопротивление R_p означают наличие в ячейке внутренних потерь при движении зарядов внутри полупроводниковых слоев. В идеальном случае R_s должно стремиться к нулю, а R_p должно стремиться к бесконечности.

Взаимосвязь между выходным током – I и выходным напряжением – U фотоэлектрической ячейки описывается следующим выражением

$$I_{ph} = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) + \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} + I, \quad (1.3)$$

где I_{ph} – фототок ячейки, образуемый фотонами света, I_s – ток насыщения полупроводника, m – коэффициент диода (выбирают от 1 до 5), U_T – температур-

ное напряжение ($U_T = 25,7$ мВ при $t = 25^\circ\text{C}$).

Графическим отображением зависимости между током и напряжением фотоэлектрической ячейки, описанной формулой (1.3), является ее вольтамперная характеристика (Рисунок 1.12) [23]. Зависимость мощности ячейки, полученной в результате умножения выходного тока на напряжение в каждой точке вольтамперной характеристики, от выходного напряжения называют её мощностной характеристикой. Холмообразный вид мощностной характеристики так же приведен на рисунке 1.12.

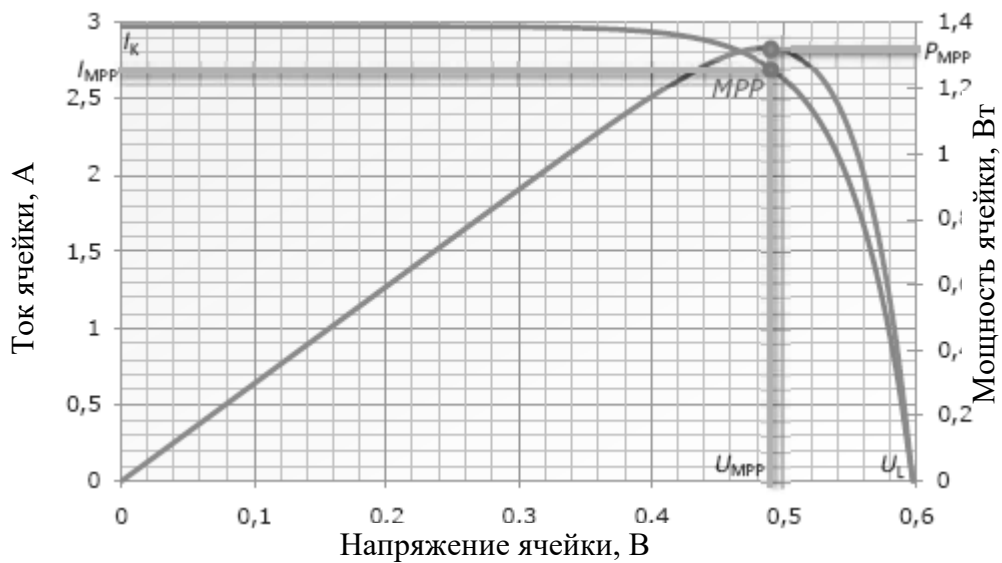


Рисунок 1.12 – Вольтамперная и мощностная характеристики фотоэлектрической ячейки с точкой максимальной мощности (MPP)

Вольтамперная характеристика имеет три ключевые точки: точку короткого замыкания ($I = I_k$, $U=0$), точку холостого хода ($I = 0$, $U=U_L$) и точку максимальной мощности ($I=I_{MPP}$, $U=U_{MPP}$), в которой мощность достигает максимального значения ($P= P_{MPP}$).

Как правило вольтамперная характеристика приводится для стандартных условий, а именно: температура $t=25^\circ\text{C}$, плотность солнечного излучения $E= 1000$ Вт/м². При изменении температуры и плотности излучения следует учитывать влияние этих факторов на ток короткого замыкания и напряжение холостого хода фотоэлектрической ячейки. Ток короткого замыкания пропорционален плотности излучения и почти не зависит от температуры

$$I_k \approx I_{ph} = c_0 \cdot E \quad (1.4)$$

Напряжение холостого хода пропорционально температурному напряжению $-U_T$ и в менее значительной степени зависит от тока короткого замыкания $-I_k$

$$U_L = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_k}{I_s} + 1\right) \quad (1.5)$$

При изменении указанных внешних факторов происходит изменение вида вольтамперной и мощностной характеристик фотоэлектрической ячейки [24]. Влияние плотности солнечного излучения на вольтамперную и мощностную характеристики ячейки показано на рисунке 1.13. Влияние температуры на вольтамперную и мощностную характеристики ячейки показано на рисунке 1.14.

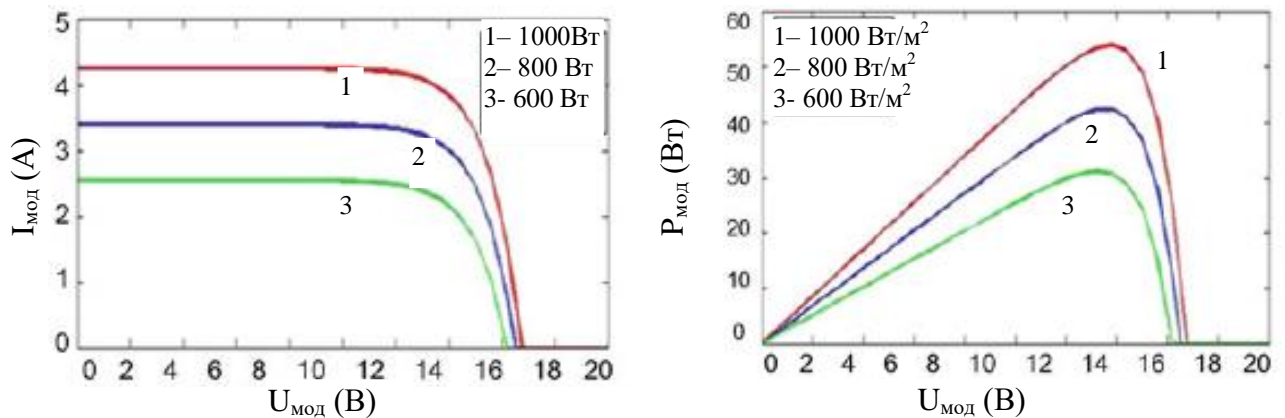


Рисунок 1.13 – Поведение вольтамперной и мощностной характеристик фотоэлектрического модуля при изменении плотности солнечной энергии

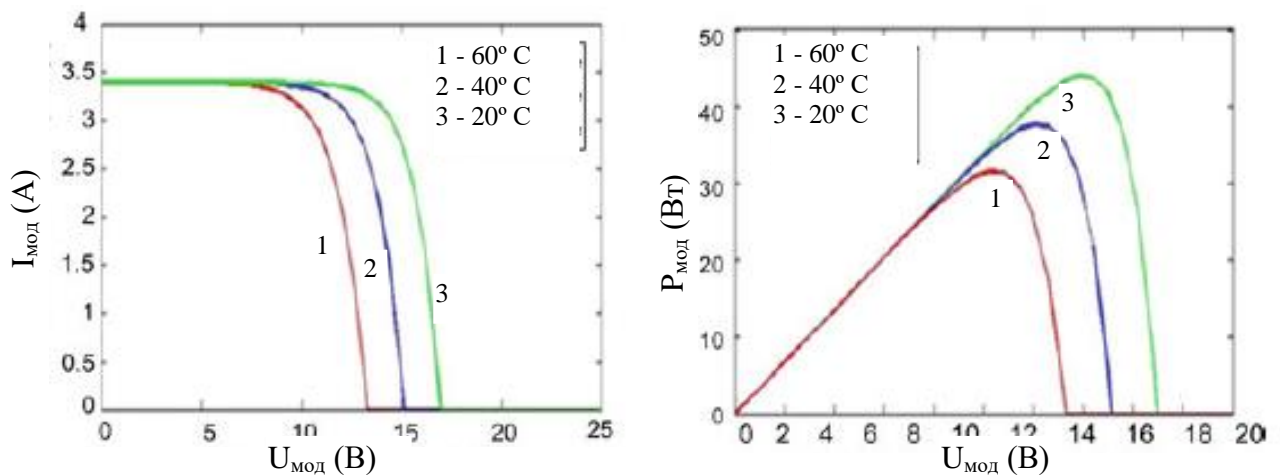


Рисунок 1.14 – Поведение вольтамперной и мощностной характеристик фотоэлектрического модуля при изменении температуры

КПД фотоэлектрической ячейки, как показатель ее энергоэффективности, рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{E \cdot A}, \quad (1.6)$$

где A – площадь поверхности фотоэлектрической ячейки, m^2 .

Современные фотоэлектрические модули представляют собой комбинацию последовательно-параллельных цепочек с большим количеством ячеек. Последовательное соединение ячеек в одной ветви увеличивает напряжение модуля пропорционально их количеству, а параллельное соединение ветвей пропорционально увеличивает ток модуля [25].

С учетом влияния внешних факторов на вольтамперную и мощностную характеристики фотоэлектрической ячейки, можно выделить две основные стратегии управления для повышения ее энергоэффективности. Первая стратегия подразумевает постоянный контроль положения рабочей точки на вольтамперной характеристике для совмещения рабочей точки с точкой максимальной мощности (ТММ). Эта задача решается, как правило, за счет применения импульсных преобразователей постоянного напряжения повышающего или понижающего типа [26]. Структурная схема системы управления с использованием понижающего импульсного преобразователя приведена на рисунке 1.15.

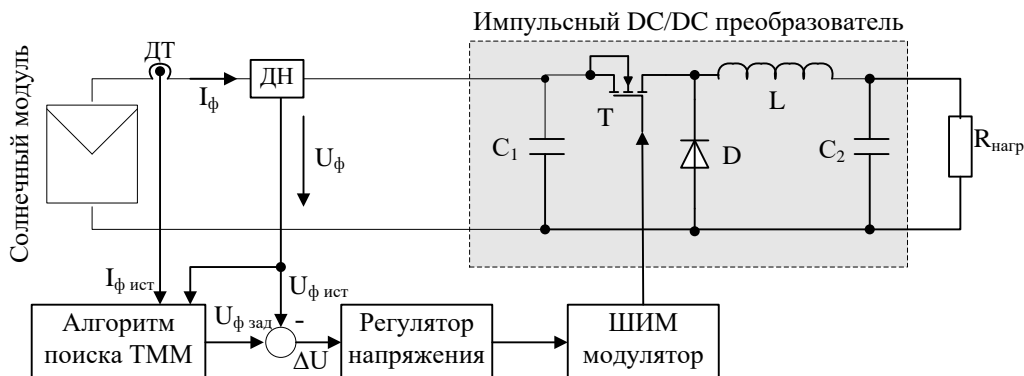


Рисунок 1.15 – Структурная схема системы управления для поиска точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля

Как показывает рисунок, алгоритм поиска ТММ, заложенный в управляющем контроллере, посредством регулятора напряжения и широтно-импульсного модулятора изменяет скважность импульсов управления, поступающих на полевой транзистор Т, изменяя тем самым выходной ток и напряжение фотоэлектрического модуля. При помощи имеющихся датчиков тока и напряжения система управления оценивает фактическую (истинную) мощность модуля и принимает решение об увеличении или уменьшении тока нагрузки модуля для того, чтобы обеспечить приближение рабочей точки к точке максимальной мощности.

Среди приведенных в литературе разновидностей алгоритма поиска ТММ можно выделить следующие наиболее распространенные: метод на основе напряжения холостого хода, метод на основе тока короткого замыкания, метод возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости [23]. Все названные методы достаточно отработаны и применяются в серийно выпускаемых системах управления фотоэлектрическими установками.

Вторая стратегия управления стремится к обеспечению максимальной плотности солнечного излучения, поступающего на поверхность модуля [27]. Это достигается за счет применения различных систем ориентирования фотоэлектрических модулей (Рисунок 1.16) [28].

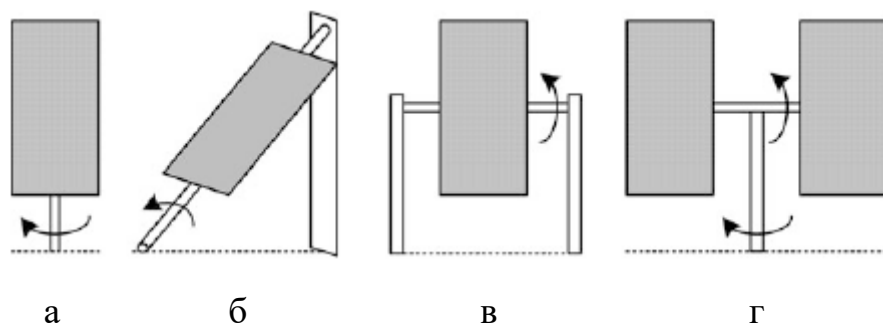


Рисунок 1.16. – Разновидности систем ориентирования фотоэлектрических модулей: а – одноосная с вертикальной осью, б – одноосная с наклонной осью, в – одноосная с горизонтальной осью, г – двухосная

Структурная схема современной системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля (ФЭМ) приведена на рисунке 1.17.

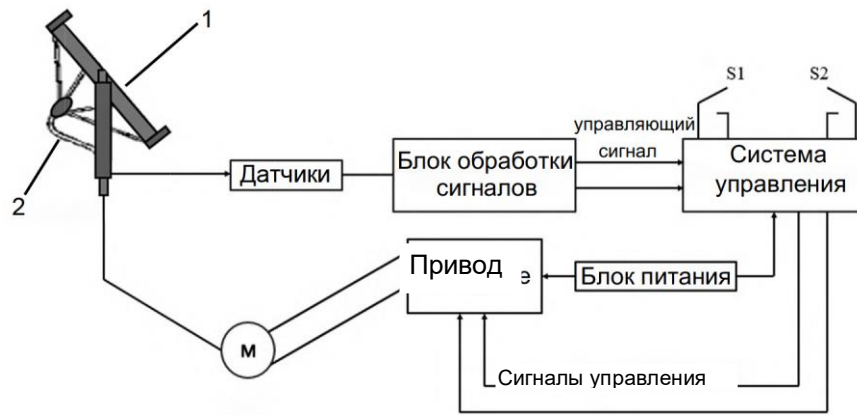


Рисунок 1.17 - Структурная схема системы управления ориентированием ФЭМ

В современных активных системах ориентирования используются, как правило, микропроцессорные системы управления, которые на основе даты и времени или сигналов фотодатчиков реализуют записанные в программе математические алгоритмы для определения положения солнца и создания сигналов управления для привода поворота фотоэлектрического модуля, что обеспечивает слежение за солнцем и увеличивает плотность солнечного излучения на поверхности модуля. Такие системы ориентирования способны обеспечить существенный прирост энергоэффективности фотоэлектрического модуля [28]. В технической литературе они получили название - активные системы слежения за Солнцем (Active Solar Tracking System – ASTS) Структурные схемы таких систем [29, 30] показаны на рисунках 1.18 и 1.19.



Рисунок 1.18 – Структурная схема активной системы слежения за солнцем без фотодатчика обратной связи на базе алгоритма определения положения Солнца

Как показано в вышеуказанных источниках, активные системы слежения за Солнцем без фотодатчика обратной связи (Рисунок 1.18) применяются, как правило, для обычных фотоэлектрических модулей, не содержащих оптического элемента и не требующих высокой точности.

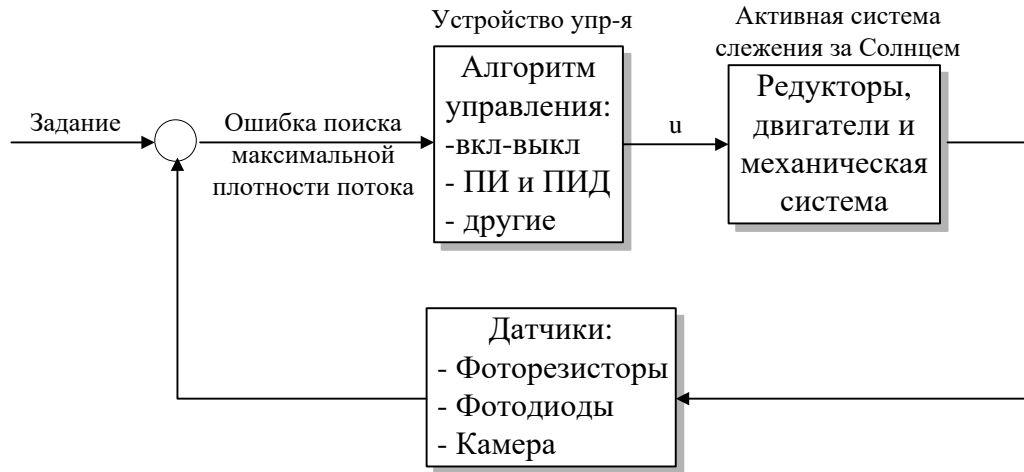


Рисунок 1.19 – Структурная схема активной системы слежения за Солнцем с фотодатчиком обратной связи

Активные системы слежения за Солнцем с фотодатчиком обратной связи (Рисунок 1.19) применяются для концентрирующих фотогальванических систем, в которых используется оптический элемент, обычно линза или зеркало с точечной фокусировкой. Такие системы требуют, как правило, повышенной точности при поиске максимальной плотности потока солнечной энергии на уровне $\pm 0,4^\circ$.

1.4 Обоснование путей совершенствования систем управления

Как показывает формула (1.1), вычисление мощности ветроколеса, усложняется определением коэффициента мощности ветроколеса - c_{pw} , который представляет собой сложную нелинейную зависимость от двух параметров: быстроходности и pitch-угла лопасти (Рисунок 1.6).

В [5, с. 43] показано, что зависимость этого коэффициента от быстроходности и установочного угла δ может быть получена посредством сложных итерационных расчетов, и для дальнейшего использования может быть описана с помощью нелинейной аппроксимирующей функции с установленными значениями коэффициентов

$$c_{pw}(\lambda, \delta) = c_1 \cdot (c_2 - c_3 \cdot \delta - c_4 \cdot \delta^x - c_5) \cdot e^{-c_6(\lambda, \delta)}, \quad (1.7)$$

где $c_1=0,5$, $c_2=116/\lambda_i$, $c_3=0,4$, $c_4=0$, $c_5=5$, $c_6=21/\lambda_i$, $x=1,5$.

При этом значение величины λ_i рассчитывается по следующей формуле

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \delta} - \frac{0,035}{\delta^3 + 1} \quad (1.8)$$

Как показывают приведенные формулы, для описания нелинейных свойств ветроколеса нужно определить семь коэффициентов, подобрать которые под индивидуальные параметры ветроколеса довольно сложно. Таким образом, с помощью аппроксимирующей функции можно воссоздать характер нелинейной зависимости $c_{pw}(\lambda, \delta)$, но точность такого воспроизведения может быть недостаточной для дальнейшего использования. Поэтому, для достаточно точного воспроизведения зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и установочного угла δ , целесообразно опробовать использование нейросети, в качестве элемента математической модели.

Следующей проблемой, которая пока что не была окончательно решена, является проблема определения скорости ветра перед ветроколесом. Как показывает формула (1.2), скорость ветра перед ветроколесом используется для расчета быстроходности, которая в свою очередь как аргумент входит в состав нелинейной аппроксимирующей функции в формуле (1.7). Таким образом, от точности определения скорости ветра перед ветроколесом зависит точность расчета коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} и его приводного момента, который определяется по следующей формуле

$$M_w = \frac{c_{pw}(\lambda, \delta)}{\lambda} \cdot \frac{\pi \cdot \rho}{2} \cdot R^3 \cdot v^2 \quad (1.9)$$

Датчик скорости ветра находится на гондоле за ветроколесом (Рисунок 1.20). При вращении ветроколеса датчика ветра достигают турбулентные ветровые потоки, которые уже отдали часть своей кинетической энергии и потеряли скорость [3, с. 85]. Таким образом, ветер, который достигает датчика, имеет совсем другую скорость, чем ветер перед ветроколесом. Согласно теории

идеального ветроколеса Альберта Бетца, коэффициент торможения ветрового потока имеет определенную связь с коэффициентом мощности ветроколеса.

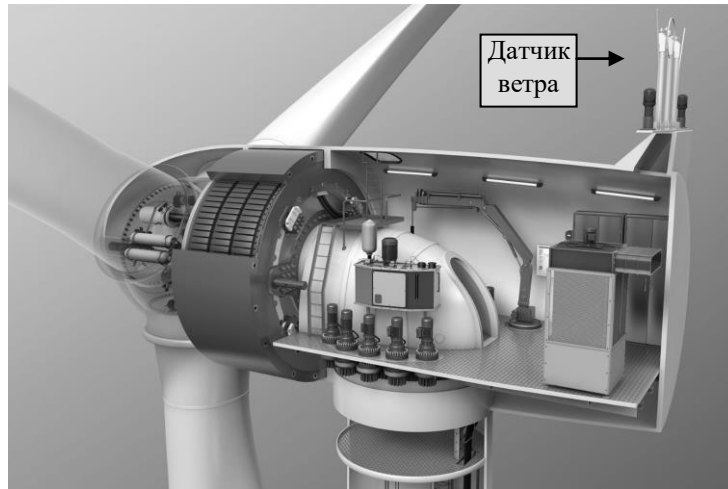


Рисунок 1.20 – Расположение датчика скорости ветра на гондоле ветроустановки

Поскольку при работе ветроколеса датчика ветра достигают турбулентные ветровые потоки, которые уже отдали часть своей кинетической энергии и потеряли скорость, датчик будет фиксировать совсем другую скорость ветра, чем скорость ветра перед ветроколесом. Теория идеального ветроколеса позволяет установить взаимосвязь коэффициента торможения ветрового потока с коэффициентом мощности ветроколеса в соответствии формулой [3, с. 84]

$$c_{pw} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right), \quad (1.10)$$

где v_1 и v_2 – скорость ветра перед ветроколесом и за ветроколесом соответственно.

Выражение (1.10) дает возможность перерасчета скорости ветра перед ветроколесом по результатам замера скорости ветра за ветроколесом только при условии известного коэффициента мощности, который не является постоянной величиной, кроме того, теория идеального ветроколеса пренебрегает влиянием турбулентных потоков, что снижает точность расчета. В работе Козина [31] рассматривается возможность перерасчета скорости ветра перед ветроколесом с учетом турбулентных потоков, но полученные уравнения оказались достаточно

сложными и зависимыми от уровня скорости ветра, что усложняет их практическое использование. Все вышесказанное показывает необходимость поиска новых эффективных методов расчета скорости ветра перед ветроколесом с использованием математических моделей.

Необходимо так же отметить, что вариант использования асинхронного генератора с КЗ ротором для реализации концепции переменной скорости вращения ветроколеса недостаточно рассмотрен в литературе отчасти по причине сложности реализации системы векторного регулирования момента генератора [32], хотя этот генератор является наиболее неприхотливой и дешевой машиной. Таким образом, возникает необходимость показать эффективность реализации концепции переменной скорости вращения ветроколеса на базе асинхронного генератора с КЗ ротором с помощью методов математического моделирования. Перспективность математического моделирования обусловлена сложностью проведения экспериментов на действующих ветроустановках и невозможностью воспроизведения всех факторов влияния на ветроколесо в лабораторных условиях. Корректность работы основных контуров системы регулирования для этой концепции может быть подтверждена результатами численных исследований.

Следует учитывать, что при проведении математического моделирования работы ветроустановки важную роль играет метод моделирования поведения скорости ветра, так как именно она является основным возмущающим фактором для системы регулирования. В [19, с. 31] показано, что промоделировать поведение скорости ветра можно согласно спектральной модели Ван дер Ховена, но эта модель не отображает такого важного явления, как эффект затенения башни [3]. Этот эффект отображается на усталостной прочности лопастей ветроколеса, колебаниях конструкции ветроустановки, а также на уровне шума, который возникает при вращении ветроколеса. При этом не объясняется, как минимизировать влияние этого эффекта на работу ветроустановки, и как этот эффект должен учитываться при построении системы регулирования. Таким

образом, необходима коррекция работы системы регулирования ветроустановки с учетом эффекта затенения башни.

В последнее время так же ведутся активные исследования в области совершенствования систем управления ориентированием фотоэлектрических модулей на базе микропроцессорных контроллеров. Например, в работе Китаевой М.В. рассматриваются вопросы оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения [33], однако недостаточно полно описаны законы управления для привода поворота фотоэлектрического модуля применительно к разным системам ориентирования (Рисунок 1.16). Поэтому возникает необходимость более детальной проработки законов управления системами ориентирования, особенно применительно к одноосной системе с наклонной осью (Рисунок 1.16 б), поскольку она позволяет при помощи одного двигателя поворачивать плоскость модуля относительно вертикальной и горизонтальной осей. Кроме того, в работах Китаевой М.В. и Охорзиной А.В. приводится упрощенная методика оценки повышения энергоэффективности модуля за счет применения системы ориентирования, что может привести к погрешностям в расчетах [33, 34].

Таким образом, при оценке повышения энергоэффективности модуля с учетом применения системы ориентирования следует использовать более совершенную методику расчета плотности солнечного излучения на поверхности модуля, которая заключается в определении трех составляющих солнечного излучения: прямой, диффузионной и отраженной от земли [23, с. 65].

Поскольку в технической литературе [28, с. 70, 29, с. 210] встречаются разные показатели повышения энергоэффективности модуля с учетом применения активной системы слежения за Солнцем, от 18 % до 45 %, целесообразно провести уточняющую оценку увеличения эффективности для местности с конкретным географическим положением для того, чтобы можно было рассчитать период окупаемости затрат на применение дополнительного оборудования.

В работах Аржанова К. В. рассмотрена возможность применения шагового двигателя для построения активной системы слежения за Солнцем, однако

отмечается высокая стоимость электропривода на базе шагового двигателя и его большое энергопотребление [35, 36]. Так же в этой работе недостаточно полно рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности модуля за счет применения активной системы слежения за солнцем.

Поэтому, не менее важным является вопрос возможности применения стандартного промышленного асинхронного двигателя с КЗ ротором при реализации позиционного привода в системе ориентирования фотоэлектрического модуля, поскольку этот двигатель является наиболее дешевым и неприхотливым [37], т. е. наиболее приспособленным к работе в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Следуя рекомендациям в [29, с. 207], при создании активной системы слежения за Солнцем для обычных фотоэлектрических модулей без концентрирующего оптического элемента целесообразно использовать структуру с применением алгоритма определения положения солнца (Рисунок 1.18), поскольку она обладает достаточной точностью, и не предполагает использование датчика солнечного излучения.

В [38, 39, 40] показано, что комбинированное использование ветрогенераторных и фотоэлектрических установок повышает их энергоэффективность и надежность снабжения потребителей. Возможность совместного функционирования таких установок с накопителями энергии так же является необходимым условием надежности автономных энергосистем на базе ВИЭ. Эта концепция должна учитываться при проектировании систем управления энергоустановками [41].

Рост доли возобновляемой энергетики, несомненно, способствует повышению экологичности процесса энергопроизводства в стране [42, 43, 44].

1.5 Выводы по разделу 1

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.

В связи с этим актуальной является научно-практическая задача создания модифицированной системы управления ветрогенераторной установкой, которая может быть решена путём создания новых математических моделей поведения скорости ветра, ветроколеса и генератора, усовершенствования методики определения параметров регуляторов и методов формирования управляющих сигналов для основных контуров регулирования ветроустановки, а так же тестирования предложенных моделей и методов средствами численного моделирования.

Для решения актуальной задачи повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля необходима разработка метода энергоэффективного управления, путём создания программы реализации алгоритма управления системой ориентирования на базе предложенных компонентов аппаратного обеспечения, а так же анализ эффективности предложенного метода управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля на экспериментальной установке и средствами численного исследования.

РАЗДЕЛ 2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКОЙ С
 ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОКОЛЕСА И
 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ

2.1 Математическая модель поведения скорости ветра

2.1.1 Модель Ван дер Ховена

В качестве модели поведения скорости ветра можно использовать спектральную модель Ван дер Ховена, которая базируется на том принципе, что скорость ветра может быть смоделирована как нестационарный случайный процесс, созданный наложением двух компонент: низкочастотной компоненты – $v_s(t)$ и турбулентной компоненты – $v_t(t)$ [19, с. 31]

$$v(t) = v_s(t) + v_t(t) . \quad (2.1)$$

Поведение этих компонент продемонстрировано на рисунке 2.1

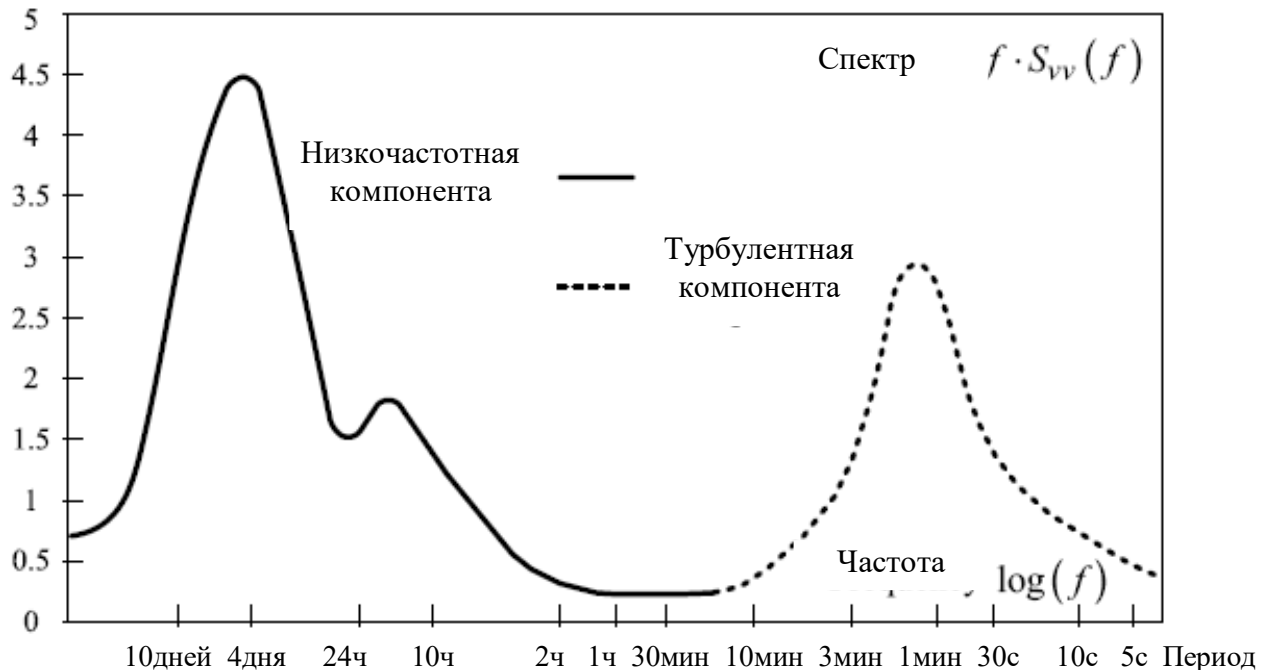


Рисунок 2.1 – Поведение низкочастотной и турбулентной компонент спектральной модели скорости ветра Ван Дер Ховена

Низкочастотная компонента описывается распределением Вайбула [45]. Согласно рисунку 2.1 наименьшая спектральная плотность мощности колебаний скорости ветра для низкочастотной компоненты приходится на диапазон от 2-ух часов до 10-и минут. Это означает, что интервал времени, в течение которого низкочастотная компонента может оставаться неизменной на уровне среднего значения, равняется приблизительно 10 минутам.

Математическое описание динамических свойств турбулентной компоненты $v_t(t)$ осуществляется с помощью двух видов спектра: Кармана и Каимала. Эти спектры дают математическое описание зависимости спектральной плотности мощности колебаний от их частоты [19, с. 32]. Спектру Кармана соответствует формула (2.2), а спектру Каимала – формула (2.3).

$$S_{vv}(f) = \frac{4 \cdot \sigma^2 \cdot L_t / v_s}{(1 + 70,8 \cdot (f \cdot L_t / v_s)^2)^{5/6}} \quad (2.2)$$

$$S_{vv}^*(f) = \frac{4 \cdot \sigma^2 \cdot L_t / v_s}{(1 + 6 \cdot f \cdot L_t / v_s)^{5/3}}, \quad (2.3)$$

где, S_{vv} – спектральная плотность мощности колебаний; σ – среднеквадратичное отклонение скорости ветра, L_t – длина турбулентности, м; v_s – среднее значение низкочастотной компоненты, м/с, которое сохраняется неизменным в течение 10 минут, f – частота колебаний, Гц.

Среднеквадратичное отклонение σ может быть рассчитано через параметр интенсивности турбулентности – I_t по следующей формуле

$$\sigma = I_t \cdot v_s; \quad I_t = \frac{1}{\ln(h/z_0)}, \quad (2.4)$$

где h – высота над землей, м; z_0 – коэффициент неровности земной поверхности.

Длина турбулентности рассчитывается согласно следующему выражению

$$L_t = \begin{cases} 150 \text{ м, если } h \geq 30 \text{ м} \\ 5 \cdot h, \text{ если } h \leq 30 \text{ м} \end{cases} \quad (2.5)$$

На рисунке 2.2 проводится сравнение спектральных функций, которые представлены формулами (2.2) и (2.3). Опираясь на спектральные функции, можно создать модель, которая будет воссоздавать поведение турбулентной компоненты скорости ветра в течение 10- минутного интервала времени, пока низкочастотная компонента скорости ветра будет оставаться постоянной величиной. Такая модель изображена на рисунке 2.3. Модель основана на смешивании косинусоид с разными значениями амплитуды, частоты и фазы, которые определяются на основе выбранной спектральной функции [46, 19, с. 33].

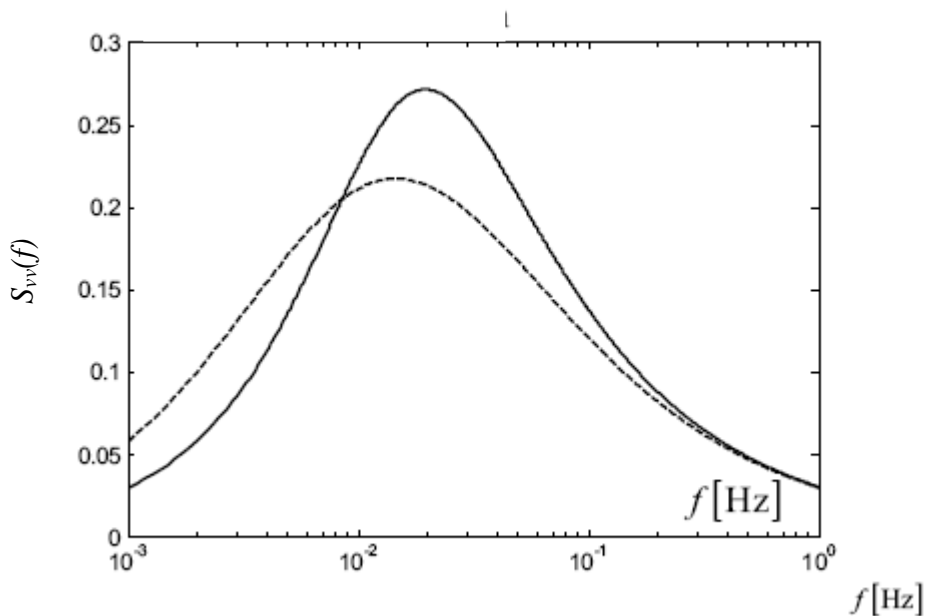


Рисунок 2.2 – Сравнение спектральных функций Кармана (непрерывная линия) и Каимала (прерывистая линия) при $h=30$ м, $z_0=0,01$, $v_s=10$ м/с

Смешанный сигнал проходит сквозь формирующий фильтр и корректируется согласно величине среднеквадратичного отклонения, превращаясь, таким образом, в значение турбулентной компоненты. Турбулентная компонента, в свою очередь, прибавляется к постоянному значению низкочастотной компоненты v_s . Таким образом, на выходе модели получаем величину скорости ветра в течение 10-минутного интервала времени [47]. Смешивание косинусоид происходит согласно выражению 2.6

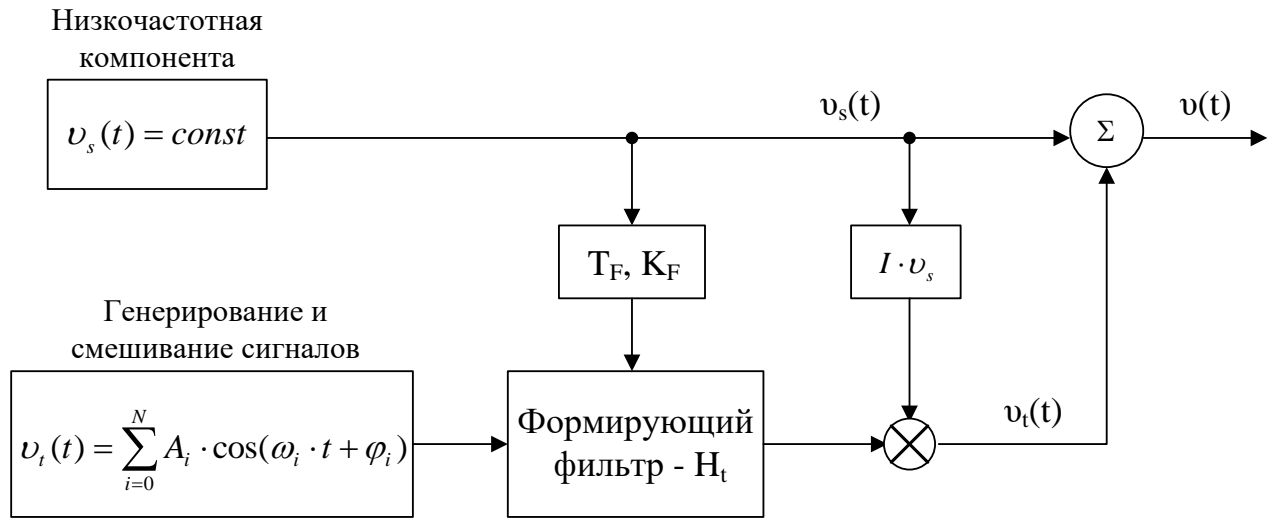


Рисунок 2.3 – Модель скорости ветра при постоянном значении низкочастотной компоненты

$$v_t(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_i), \quad (2.6)$$

где ω_i – значение частоты, которая соответствует диапазону $f=10^{-3} \div 10^0$ Гц (Рисунок 2.2), φ_i – значение фазы, которое находится в диапазоне $[-\pi, \pi]$ и генерируется случайным образом, A_i – значение амплитуды, которое рассчитывается по следующей формуле

$$A_i = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} ((S_{vv}(\omega_i) + S_{vv}(\omega_{i+1})) \cdot (\omega_{i+1} - \omega_i))}. \quad (2.7)$$

Постоянная времени – T_F , и коэффициент усиления – K_F формирующего фильтра рассчитываются согласно формуле

$$T_F = \frac{L_t}{v_s}, \quad K_F = \sqrt{\frac{2\pi}{B(1/2, 1/3)} \cdot \frac{T_F}{T_s}}, \quad (2.8)$$

где B – бета функция, T_s – период дискретности для турбулентной функции, с.

T_s принимается равным приблизительно 10-минутам (600 секунд), согласно спектральной модели Ван дер Ховена на рисунке 2.1.

Передаточная функция формирующего фильтра $H_t(p)$ соответствует формуле

$$H_t(p) = K_F \cdot \frac{m_1 \cdot T_F \cdot p + 1}{(T_F \cdot p + 1) \cdot (m_2 \cdot T_F \cdot p + 1)}, \quad m_1 = 0,4; \quad m_2 = 0,25. \quad (2.9)$$

Поведение скорости ветра, согласно приведенным выше принципам, было промоделировано в программном пакете Matlab (приложение А, Рисунок А.1) в течение 10-минутного интервала времени. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.4.

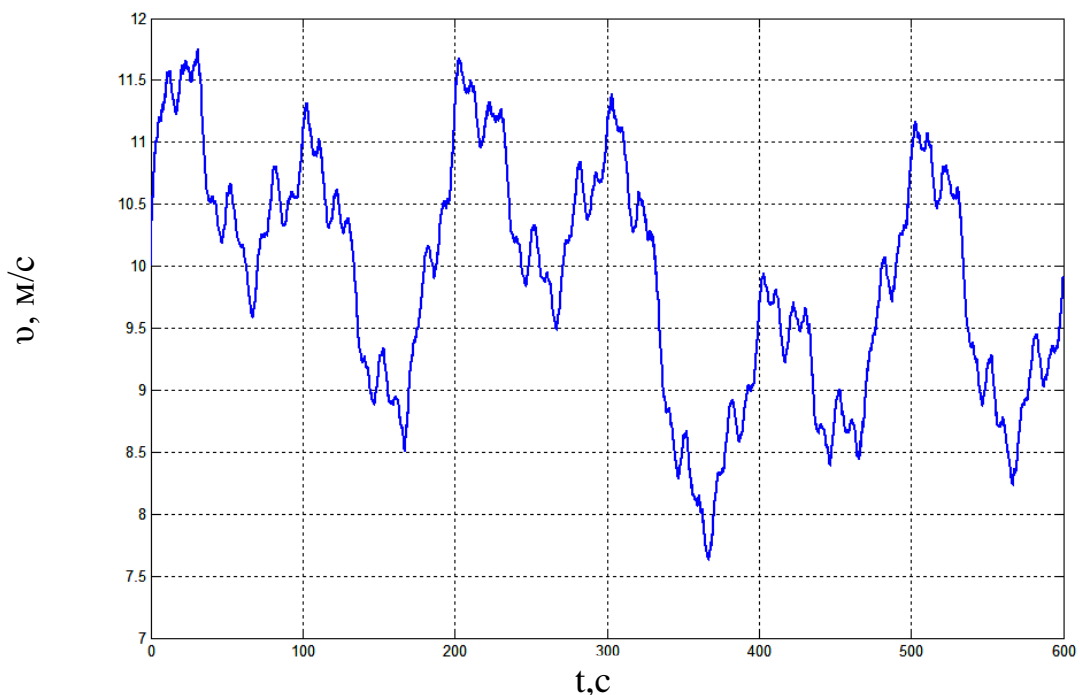


Рисунок 2.4 – Поведение скорости ветра согласно модели Ван дер Ховена ($h=30$ м, $v_s=10$ м/с, $z_0=0,01$ м) в течение 10-минутного интервала времени

2.1.2 Модель поведения ветра на основе измеренных параметров ветроустановки

Для реальной оценки поведения скорости ветра и получения модели ветра на основе измеренных параметров следует проводить замеры выходной мощности работающей ветроустановки. Такие замеры были проведены на ветроустановке TURBOWIND T600-48 Новоазовской ВЭС. Замеры проводились следующим

образом, в фазы генератора был включен измерительный прибор-регистратор «РЕКОН-08МС», который с периодом регистрации 1 мс записывал в память мгновенные значения токов и напряжений генератора. На основании записанных мгновенных значений фазных токов и напряжений с помощью программного обеспечения, которым оснащался этот прибор, была рассчитана активная мощность каждой фазы (P_{ag} , P_{bg} , P_{cg}). Используя полученные значения активной мощности, можно рассчитать результирующие значения скорости ветра исходя из предположения, что скорость ветра является равномерной по всей плоскости вращения ветроколеса. Такое предположение, безусловно, является упрощением, но оно может быть принятым для статистической оценки свойств ветрового потока. Расчет скорости ветра проводился с использованием программного пакета MATLAB по структурной схеме, которая изображена на рисунке 2.5 [48].

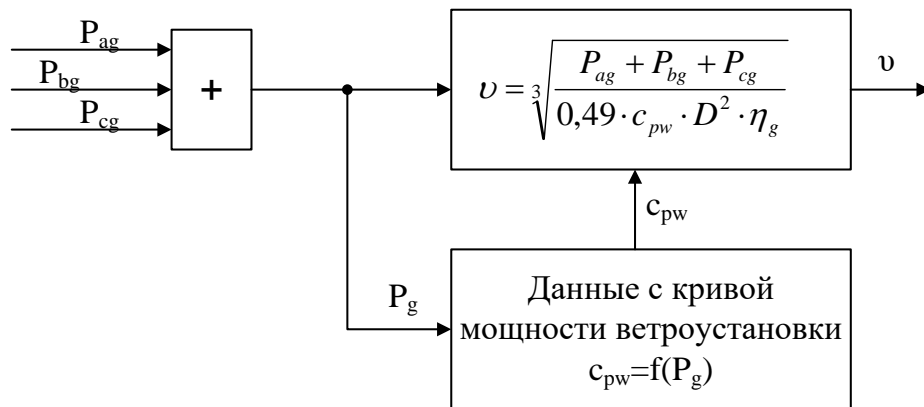


Рисунок 2.5 – Структурная схема для расчета скорости ветра на базе данных об активной мощности генератора

В основу блока расчета положена формула, которая кроме значений активной мощности генератора требует значений коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} .

$$v = \sqrt[3]{\frac{P_{ag} + P_{bg} + P_{cg}}{0,49 \cdot c_{pw} \cdot D^2 \cdot \eta_g}}, \quad (2.10)$$

где P_{ag} , P_{bg} , P_{cg} – активные мощности фаз генератора, Вт; η_g – КПД генератора, D – диаметр ветроколеса, м; c_{pw} – коэффициент мощности ветроколеса.

Необходимые для расчета значения c_{pw} взяты из информационной таблицы кривой мощности, которая приводится производителем ветроустановки в документации.

Таким образом, приведенная выше методика расчета позволяет определить ряд мгновенных значений скорости ветра, полученных с интервалом времени 1мс в течение периода регистрации активной мощности генератора, который составлял несколько десятков секунд. Благодаря использованию этой методики были получены результаты, которые приведены на рисунке 2.6.

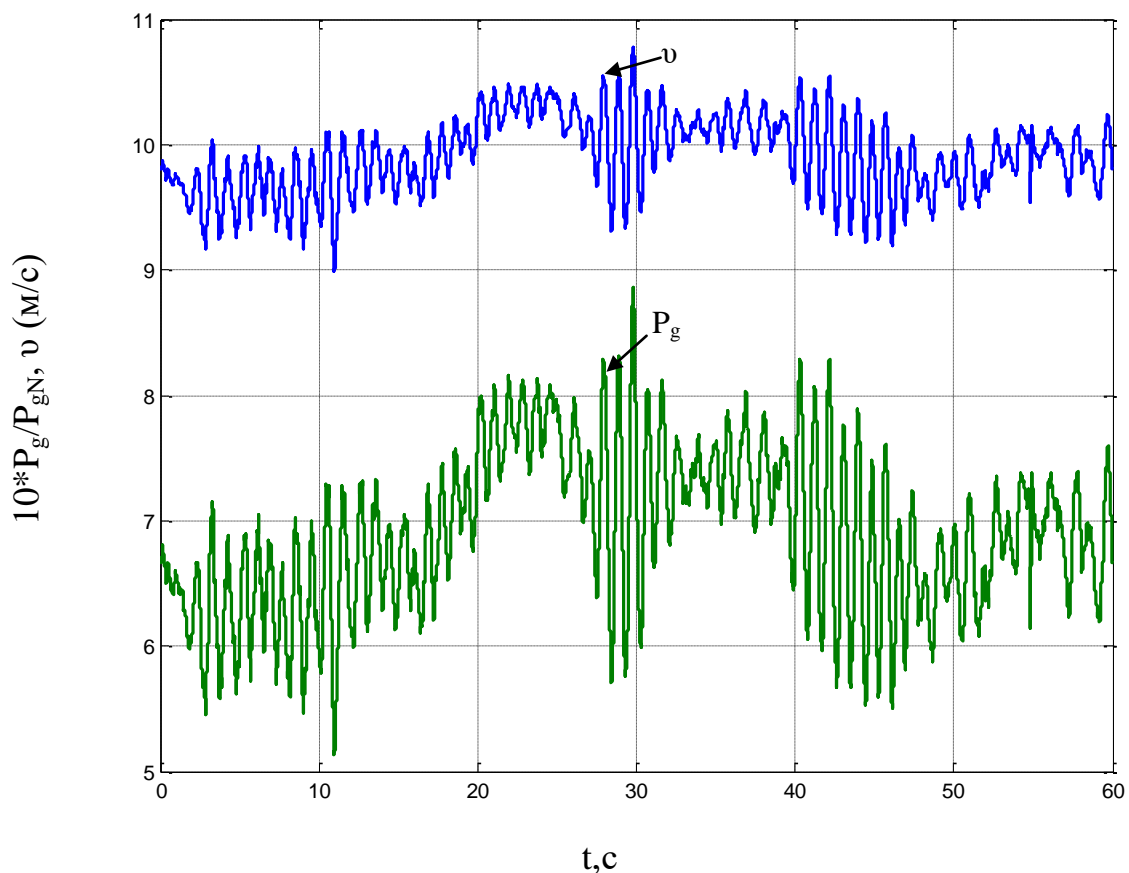


Рисунок 2.6 – Поведение измеренной активной мощности генератора – P_g и расчетного значения скорости ветра – v за минутный интервал времени

На рисунке представлен случай поведения скорости ветра со средним значением приблизительно $9,8$ м/с. Можно увидеть, что в расчетном графике скорости ветра присутствуют колебания с разными частотами, но наиболее выраженной является частота около 1 Гц. Колебания скорости ветра на этой частоте, согласно спектральной модели Ван дер Ховена, не должны так сильно

проявляться по причине малого значения плотности мощности колебаний, (Рисунок 2.2). Отсюда можно сделать заключение, что доминирующий характер этой частоты можно объяснить не колебаниями скорости ветрового потока, а так называемым эффектом затенения башни. Этот эффект проявляется по той причине, что лопасти ветроколеса, проходя вертикаль башни поочередно попадают в зону затенения, где скорость ветра снижается вследствие соприкосновения с препятствием, которое представляет собой трубчатая башня [49, 3]. Поэтому в моменты такого прохождения приводной момент ветроколеса существенно снижается. Рассчитать частоту этих колебаний можно по следующей формуле.

$$f_w = \frac{n_w}{60} \cdot z, \quad (2.11)$$

где n_w – скорость вращения ветроколеса, об/мин; z – число его лопастей.

Поскольку для большинства современных установок мощностью около 2 MW частота вращения составляет около 20 об/мин, то для трехлопастного ветроколеса частота колебаний момента, обусловленная эффектом затенения башни, будет также составлять приблизительно 1 Гц.

Таким образом, модель ветра на основе измеренных параметров ветроустановки дает более точную картину поведения ветра, которая учитывает не только свойства ветрового потока, как такового, но и конструктивные особенности ветроустановки. Поэтому ее целесообразно использовать для более точной оценки динамических свойств системы регулирования.

2.2 Математическая модель ветроколеса

2.2.1 Методика расчета модели ветроколеса

Для электромеханической системы, которой является ветрогенераторная установка, ветроколесо является источником приводного момента генератора.

Поэтому математическая модель ветроколеса должна описывать в первую очередь зависимость приводного момента от различных факторов.

Таковыми факторами являются: скорость ветра – v , установочный угол лопасти – $\delta_{уст.}$ и угловая скорость вращения генератора – ω_g .

Значение приводного момента ветроколеса, приведенного к валу генератора можно рассчитать, как отношение мощности ветроколеса к скорости вращения генератора по формуле [2, с. 62- 63]

$$M_w^* = \frac{c_{pw}(\lambda, \delta)}{\omega_g} \cdot \frac{\pi \cdot \rho}{8} \cdot D^2 \cdot v^3 = \frac{0,49 \cdot c_{pw}(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot v^3}{\omega_g}, \quad (2.12)$$

где λ – быстроходность ветроколеса, δ – установочный угол лопасти, °; ρ – плотность воздуха (для стандартных условий $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$).

Быстроходность ветроколеса рассчитывается по следующей формуле

$$\lambda = \frac{\omega_g \cdot R}{u_r \cdot v}, \quad (2.13)$$

где u_r – передаточный коэффициент повышающего редуктора, который устанавливается между ветроколесом и генератором для согласования оборотов, R – радиус ветроколеса, м.

Для наглядности формирования приводной силы необходимо воспользоваться векторной диаграммой, демонстрирующей набегание воздушного потока на фрагмент лопасти ветроколеса (Рисунок 2.7) [1, с 82]. Рисунок показывает, какие силы действуют на фрагмент лопасти ветроколеса во время набегания на него воздушного потока, и как формируются аэродинамические углы. А именно, β – угол притекания, это угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением воздушного потока, α – угол атаки, угол между направлением воздушного потока и хордой лопасти, δ – установочный угол, это угол между плоскостью вращения ветроколеса и хордой лопасти, a – коэффициент торможения воздушного потока в направлении ветра, b – коэффициент торможения воздушного потока в направлении вращения

ветроколеса, ΔA – приводная сила элемента лопасти, ΔW – сила сопротивления элемента лопасти, u' – векторная компонента воздушного потока, которая возникает вследствие вращения ветроколеса, v' – векторная компонента воздушного потока, в направлении ветра, c – результирующий вектор воздушного потока.

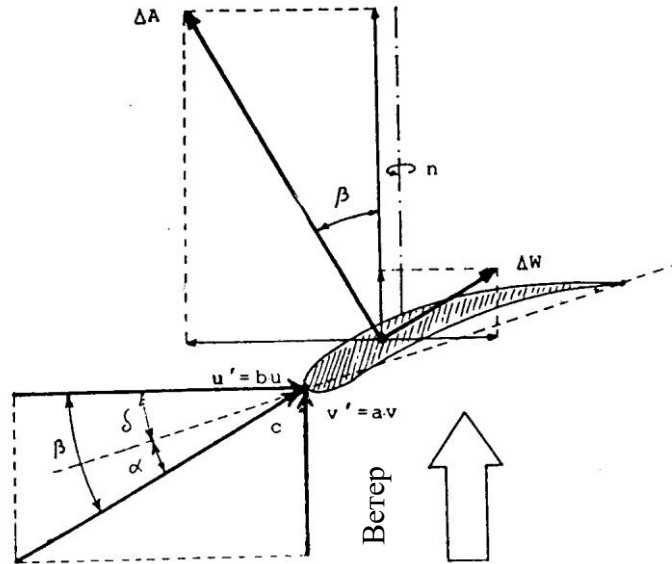


Рисунок 2.7 – Формирование аэродинамических углов и сил, которые действуют на фрагмент лопасти при набегании ветрового потока

При расчете приводного момента, который ветер создает на ветроколесе, по формуле (2.12) основную сложность представляет определение коэффициента мощности ветроколеса $c_{pw}(\lambda, \delta)$. Этот коэффициент представляет собой сложную нелинейную зависимость от быстроходности ветроколеса λ и установочного угла лопасти δ . Для определения зависимости коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности целесообразно пользоваться приведенной ниже методикой [1, с. 91-107].

Для проведения расчета нужно иметь следующие исходные данные ветроколеса: оптимальная расчетная быстроходность – λ_d , число лопастей – z , диаметр ветроколеса – D , а также полярю для избранного профиля лопасти.

В идеальном случае для расчета коэффициента мощности ветроколеса лопасть вдоль всей длины нужно поделить, например на десять частей, и считать коэффициент мощности для каждой части отдельно и дальше с помощью

приведенной формулы определить общий коэффициент мощности всего ветроколеса

$$c_{pw} = \sum_{j=1}^{10} (0,21 - 0,02j) \cdot c_{pwj}, \quad (2.14)$$

где j – номер фрагмента лопасти ветроколеса.

Однако для этого нужно выполнить немало расчетов. В [1, с. 96] показано, что для лопасти с оптимальной формой, коэффициент мощности c_{pw} можно рассчитать для фрагмента лопасти, который находится на расстоянии $0,72R$ от центра вращения, и принять это значение равным коэффициенту мощности всего ветроколеса без существенной потери точности. Это расстояние называют действующим радиусом – r^* , таким образом $r^* = 0,72R$. Поэтому все дальнейшие расчеты выполняются для этого действующего радиуса. Методика расчета зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности приводится ниже в виде последовательности этапов.

Этап 1 – расчет оптимального угла притекания для фрагмента лопасти

$$\beta_{opt} = \frac{2}{3} \cdot \arctan \left(\frac{1}{\lambda_d \cdot \frac{r^*}{R}} \right). \quad (2.15)$$

Далее выбирается оптимальный угол атаки по поляре профиля, при котором выполняется условие: максимальное значение соотношения между коэффициентами приводной силы и силы сопротивления лопасти, т.е. $\varepsilon = c_d/c_w = \varepsilon_{max}$ ($\alpha_{opt} = 6^\circ$). Пример поляры профиля лопасти NACA 4412, которая показывает зависимость коэффициентов приводной силы и силы сопротивления от угла атаки приведена на рисунке 2.8.

Этап 2 – расчет оптимального установочного угла лопасти по формуле

$$\delta_{opt} = \beta_{opt} - \alpha_{opt}. \quad (2.16)$$

Этап 3 – пошаговое изменение угла атаки α с шагом один градус в диапазоне от -4° до 18° и расчет для каждого избранного угла α угла притекания по формуле

$$\beta = \delta_{opt} + \alpha. \quad (2.17)$$

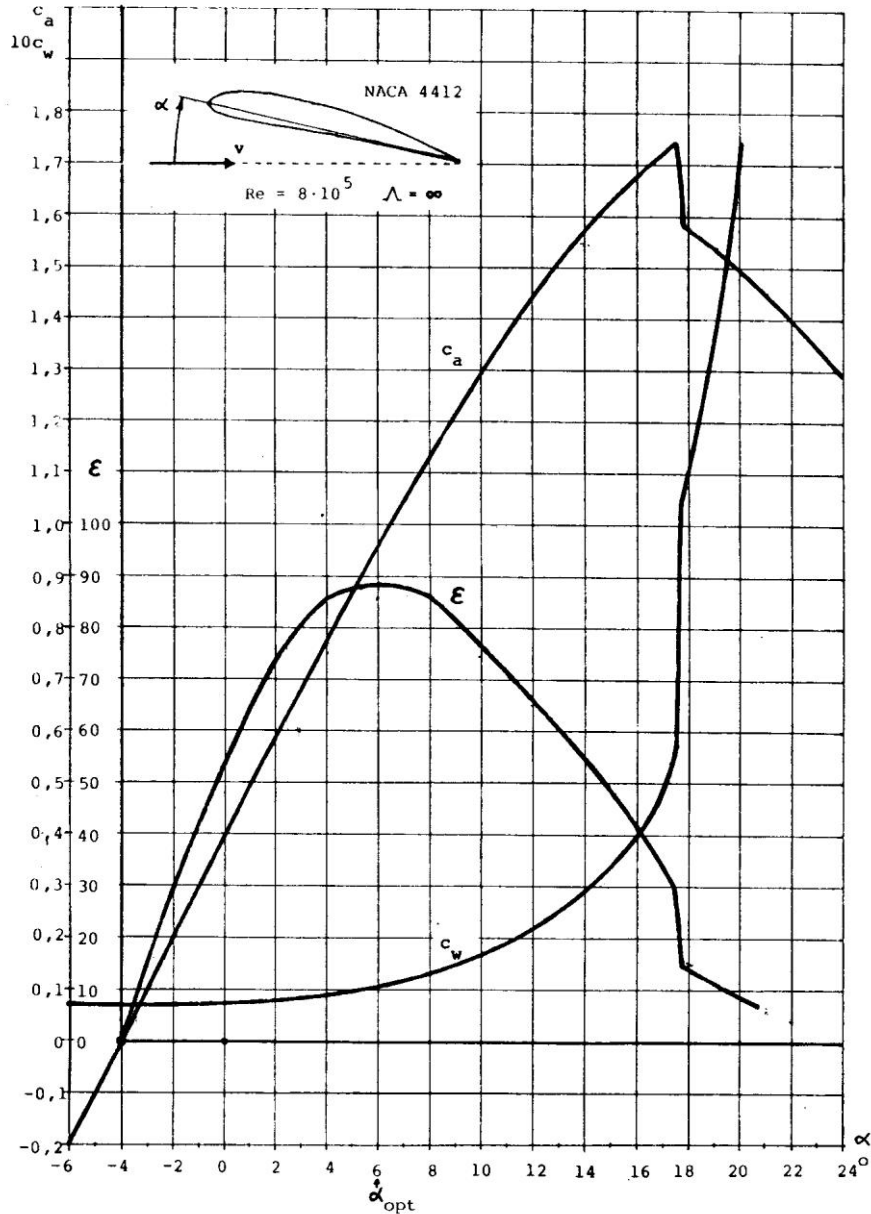


Рисунок 2.8 – Поляра профиля NASA 4412 со значением коэффициентов подъемной силы – c_a , силы сопротивления – c_w и их соотношения $\epsilon = c_a/c_w$

Этап 4 – расчёт оптимальной ширины лопасти для действующего радиуса

$$t_{opt} = \frac{8 \cdot \pi \cdot r^*}{z \cdot c_{aopt}} (1 - \cos \beta_{opt}). \quad (2.18)$$

Этап 5 – определение показателя геометрической формы лопасти для каждого угла атаки

$$g = \frac{t \cdot z \cdot c_a}{r^*}. \quad (2.19)$$

Этап 6 – определение коэффициента торможения ветрового потока в направлении ветра для каждого угла атаки и угла притекания

$$a = \frac{1}{1 + \frac{g \cdot \cos \beta}{8 \cdot \pi \cdot \sin^2 \beta}}. \quad (2.20)$$

Этап 7 – определение коэффициента торможения воздушного потока в плоскости вращения ветроколеса для каждого угла атаки и угла притекания

$$b = \frac{1}{1 - \frac{g}{8 \cdot \pi \cdot \cos \beta}}. \quad (2.21)$$

Этап 8 – определение значения быстроходности для каждого угла атаки и угла притекания, которая является первым элементом искомой зависимости

$$\lambda = \frac{R}{r^*} \cdot \frac{a}{b \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (2.22)$$

Этап 9 – расчет значения коэффициента мощности ветроколеса с учетом вихревых потерь для каждого угла атаки и угла притекания

$$c_p^* = 4 \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{r^*}{R} \right)^2 \cdot a \cdot (b - 1). \quad (2.23)$$

Этап 10 – расчет составляющей аэродинамического КПД элемента лопасти, которая обусловлена конечным значением соотношения ε между подъемной силой и силой сопротивления, для каждого угла атаки и угла притекания

$$\eta_F = \frac{1 - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \operatorname{ctg} \beta}{1 + \frac{1}{\varepsilon} \operatorname{tg} \beta}. \quad (2.24)$$

Этап 11 – расчет составляющей аэродинамического КПД ветроколеса, которая обусловлена конечным числом лопастей ветроколеса, для каждого угла атаки и угла притекания

$$\eta_z = \left(1 - \frac{1,39}{z} \cdot \sin \left(\frac{2}{3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{1}{\lambda} \right) \right)^2. \quad (2.25)$$

Этап 12 – расчет результирующего значения коэффициента мощности для действующего радиуса лопасти с учетом всех основных потерь. Это значение является вторым элементом искомой зависимости $c_{pw}(\lambda)$, и как упоминалось выше, его можно принять для всего ветроколеса без существенной потери точности

$$c_{pw} = c_p^* \cdot \eta_F \cdot \eta_z. \quad (2.26)$$

Приведенная методика в виде последовательности этапов расчета изображена на рисунке 2.9. Как показывает расчет, нет прямой аналитической зависимости между быстроходностью λ и коэффициентом мощности ветроколеса c_{pw} . Оба эти значения изменяются по причине изменения угла атаки α . Таким образом можно поставить в соответствие значению быстроходности λ определенное значение коэффициента мощности c_{pw} и построить зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности – $c_{pw}(\lambda)$.

Для проведения расчетов согласно методике, приведенной выше, были выбраны параметры конкретного ветроколеса, а именно:

- диаметр ветроколеса $D=17$ метров;
- число лопастей ветроколеса $z=3$;
- расчетная быстроходность ветроколеса λ_d может быть выбрана в диапазоне $5 \div 8$ с шагом 1;
- профиль лопасти NACA 4412, поляра которого приведена на рисунке 2.8.

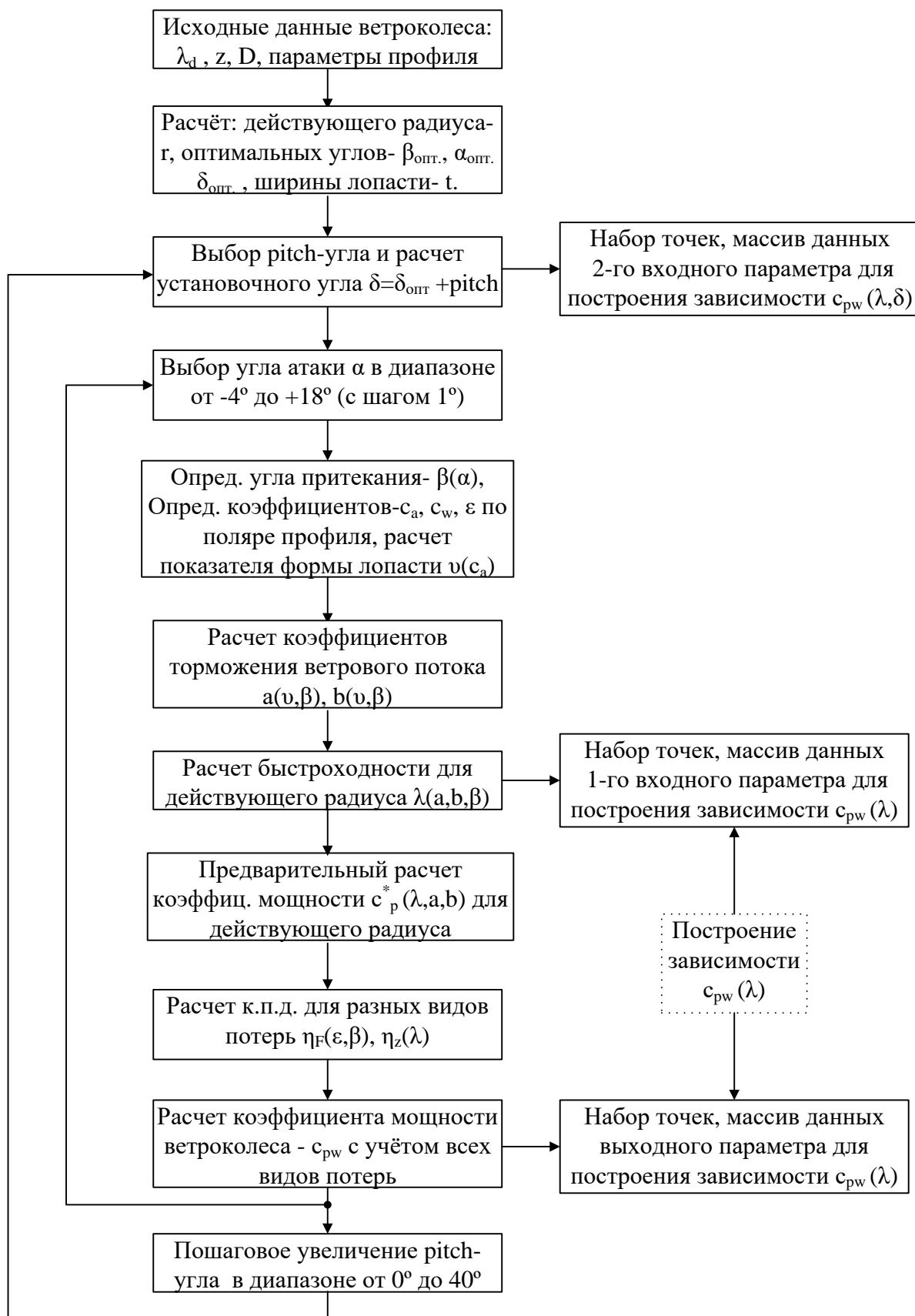


Рисунок 2.9 – Последовательность расчета взаимозависимости $c_{pw}(\lambda)$ при изменении угла атаки в диапазоне от -4° до 18° с шагом 1°

Результаты расчета зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ , выполненные для ветроколеса с выше обозначенными параметрами и значениями расчетной быстроходности от 5 до 8, приведены на рисунке 2.10. Значение установочного угла при этом принималось равным оптимальному $\delta = \delta_{opt}$, см. формулу (2.17), угол атаки изменялся в диапазоне от -4° до 18° с шагом 1° . Программа расчета в програмном пакете MATLAB приведена в приложении А (Программа А.2).

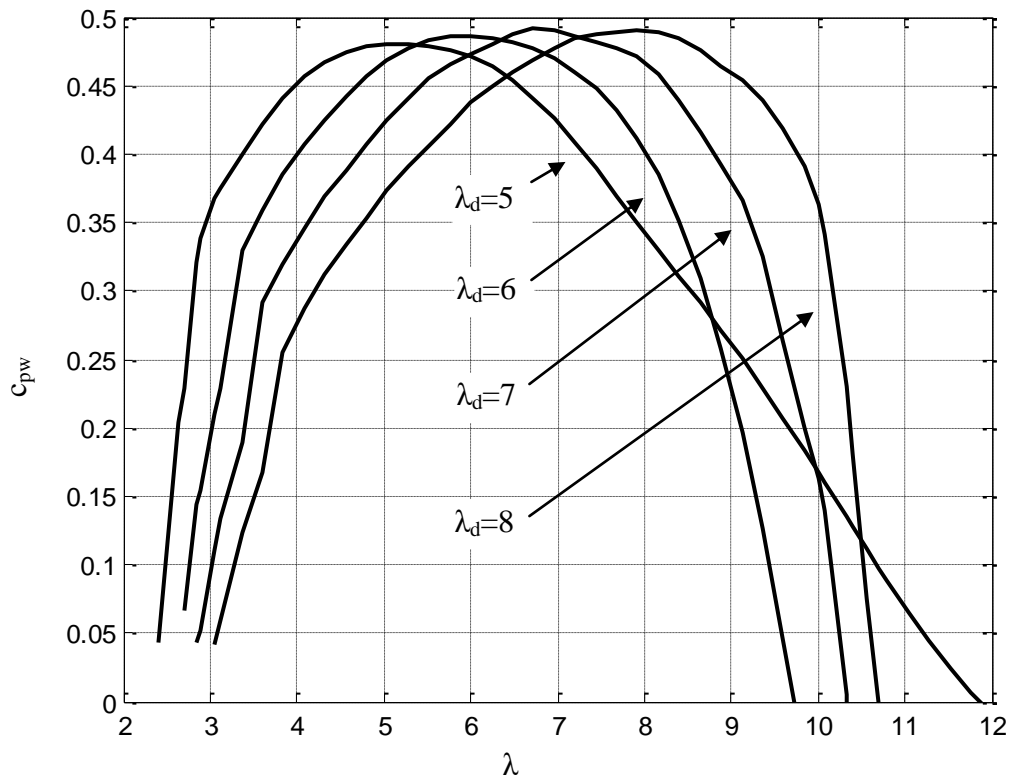


Рисунок 2.10 – Зависимость $c_{pw}(\lambda)$ для разных расчетных быстроходностей ветроколеса на основе параметров профиля NACA 4412 (рассчитано при $\delta = \delta_{opt}$)

Как показывают графики, изменение расчетной быстроходности практически не влияет на максимальный коэффициент мощности ветроколеса, который находится для выбранного профиля в пределах $0,48 \div 0,49$, но влияет на форму кривой.

Для определения зависимости коэффициента мощности ветроколеса от установочного угла лопасти в алгоритме расчета приведённом на рисунке 2.9 нужно отклонять установочный угол от оптимального значения – δ_{opt} . на

величину $\Delta\delta$ для того, чтобы получить семейство характеристик зависимости $c_{pw}(\lambda)$ при разных значениях установочного угла $\delta = \delta_{opt} + \Delta\delta$. Отклонение установочного угла $\Delta\delta$ от оптимального значения называют pitch-углом. Такое семейство характеристик может быть изображено в виде объемной фигуры, которая наглядно демонстрирует упомянутую выше нелинейную зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла (Рисунок 2.11). Расчет и построение объемной фигуры проводилось в программном пакете MATLAB при значении $\lambda_d=5$, (приложение А, Программа А.3).

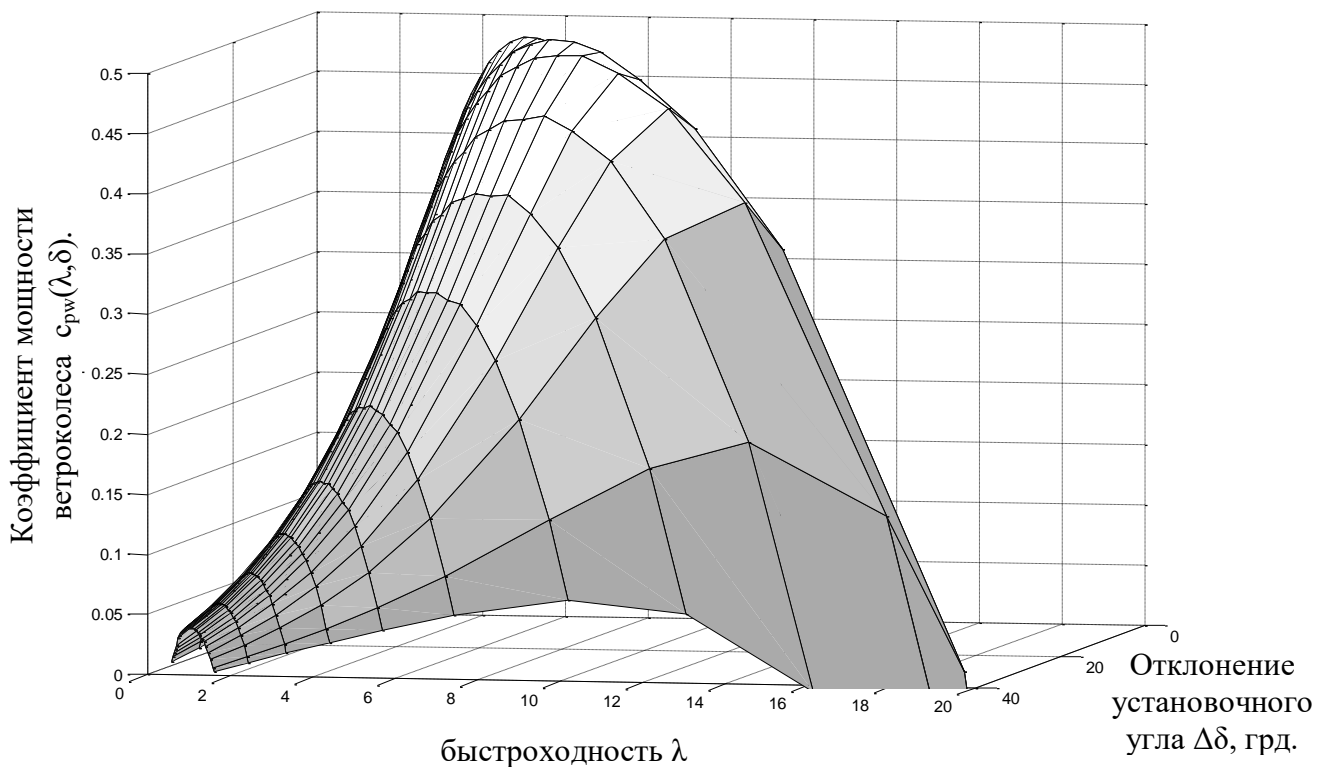


Рисунок 2.11 – Расчетная зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и отклонения установочного угла $\Delta\delta$ (pitch-угла)

В дальнейшем, для реализации системы регулирования, представляет интерес определение характера зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от приращения установочного угла $\Delta\delta$ для разных фиксированных значений быстроходности. Такие зависимости можно получить, если разрезать объемную поверхность, изображенную на рисунке 2.11, вертикальными плоскостями, которые соответствуют разным фиксированным значениям

быстроходности λ . Кривые, полученные после такого разреза, представлены на рисунке 2.12. Рисунок демонстрирует нелинейность приведенных зависимостей. Это означает, что производная коэффициента мощности ветроколеса по pitch-углу лопасти изменяется в широких пределах вдоль приведенных кривых.

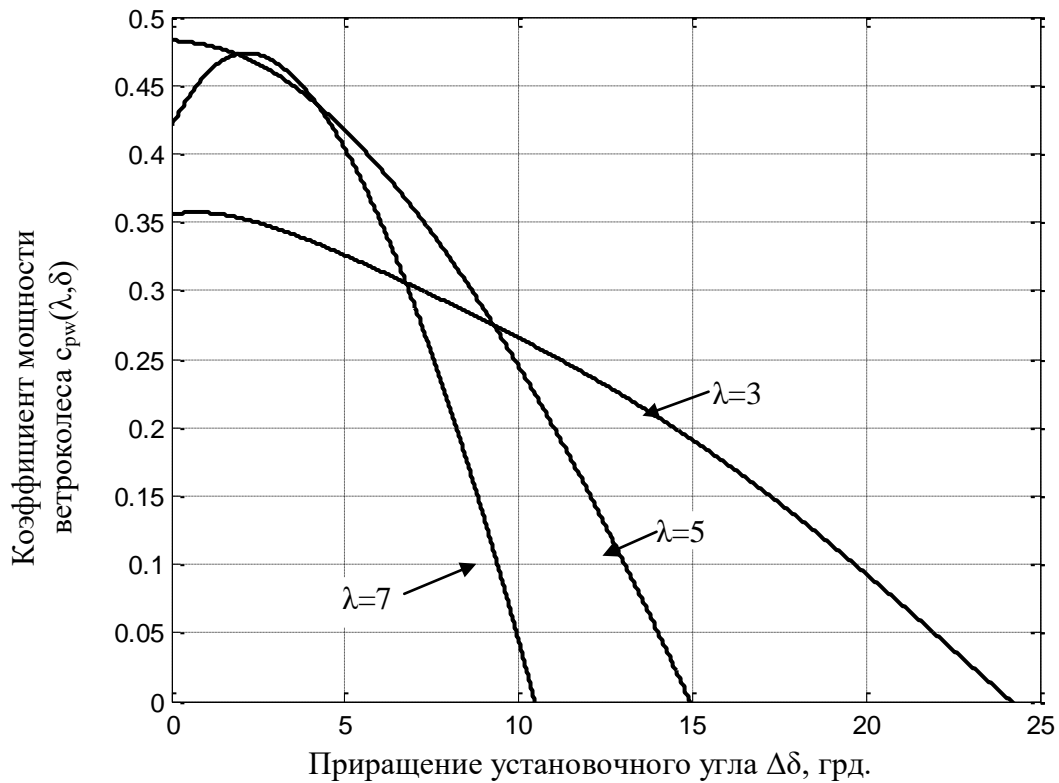


Рисунок 2.12 – Зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от pitch-угла $\Delta\delta$ для разных фиксированных значений быстроходности ветроколеса λ

Кроме того, характер изменения производной и диапазон изменения установочного угла лопасти зависит от быстроходности ветроколеса. Таким образом, при реализации системы регулирования мощности нужно учитывать производную $dc_{pw}/d\delta$ и воспринимать ее как присутствие пропорционального звена с переменным коэффициентом усиления, который находится между контуром регулирования установочного угла лопасти и блоком формирования момента генератора.

Ранее упоминалось, что затруднительно получить аналитическую зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и установочного угла лопасти, поэтому зависимость, приведенная на рисунке 2.11,

представляет собой набор точек. Таким образом, для определения коэффициента мощности ветроколеса – $c_{pw}(\lambda, \delta)$, а так же для оценки производной $dc_{pw}/d\delta$ целесообразно использовать нейросеть, с помощью которой можно воссоздать показанную на рисунке 2.11 нелинейную зависимость.

Составной частью нейросети является нейрон [50, 51]. Структура нейрона изображена на рисунке 2.13.

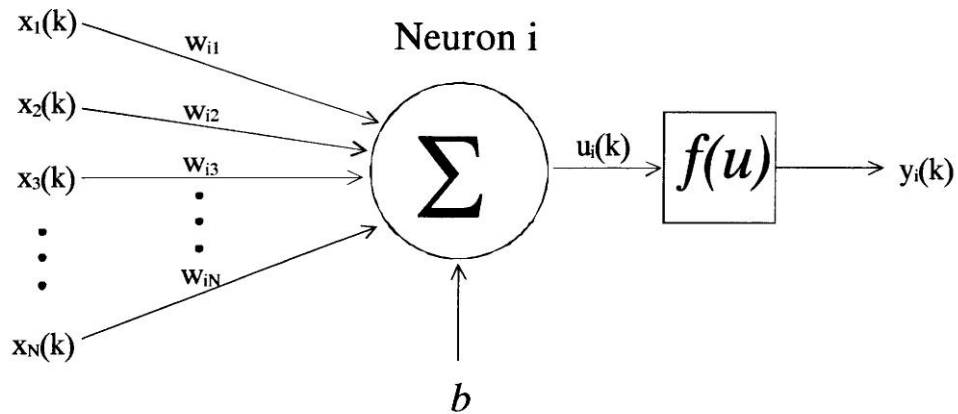


Рисунок 2.13 – Структура нейрона

Математические зависимости, заложенные в нейрон, приведены в следующих формулах

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b \quad (2.27)$$

$$y_i(k) = f\left(\sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b_i\right), \quad (2.28)$$

где $x_j(k)$ – входные сигналы, $w_{ij}(k)$ – весовые коэффициенты нейрона, b – биас (коэффициент сдвига), $y_i(k)$ – выходной сигнал нейрона, i – номер нейрона, j – номер весового коэффициента.

Для воспроизведения нелинейной зависимости коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла лопасти (Рисунок 2.11), нейроны объединяются в нейросеть, структура которой приведена на рисунке 2.14. Указанная нейросеть состоит из трех слоев [52]. Первый слой содержит пять нейронов с функцией тангенс гиперболический, второй слой – три нейрона с

такой же функцией, третий слой содержит один линейный нейрон. Таким образом, выходные значения нейронов первого и второго слоёв рассчитываются согласно формуле [53, 54]

$$y = f(u) = th(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}}. \quad (2.29)$$

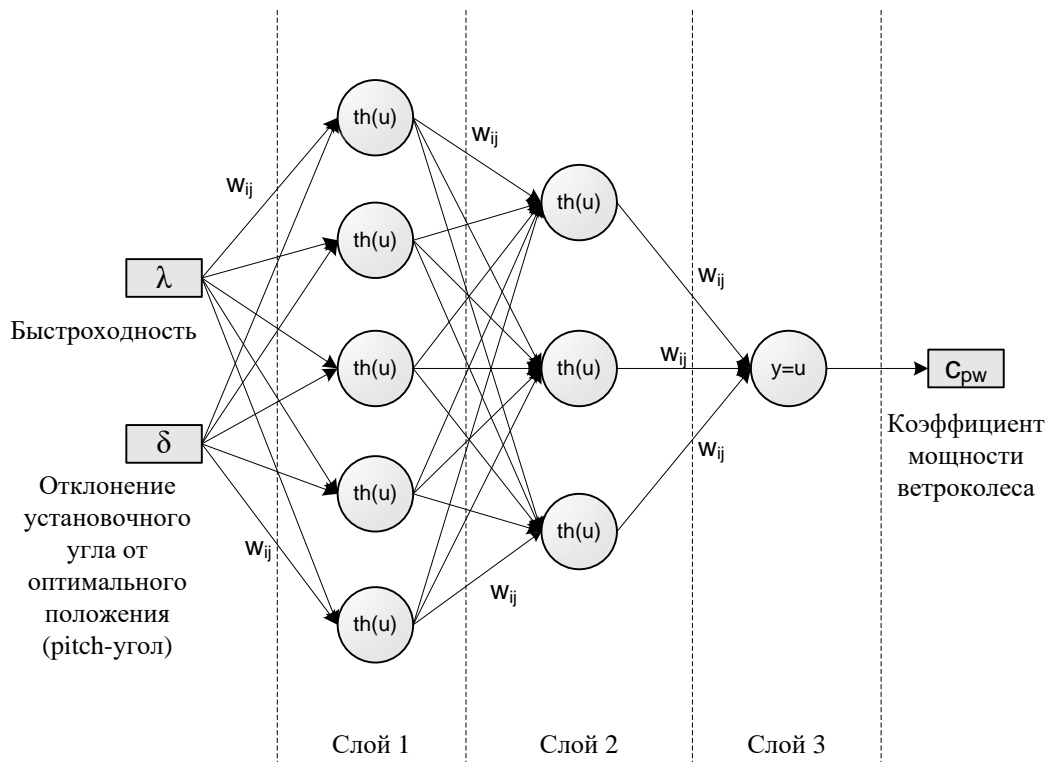


Рисунок 2.14 – Структура нейросети, воспроизводящей зависимость $c_{pw}(\lambda, \delta)$

Приведенная структура была создана и минимизирована экспериментальным путем в пакете Matlab, (приложение А, Программа А. 4).

Для получения значений весовых коэффициентов проводился процесс тренировки нейросети [55], при котором в программном пакете MATLAB методом Левенберга-Маркварта находились такие значения весовых коэффициентов w_{ij} , которые позволяют воспроизвести нелинейную зависимость $c_{pw}(\lambda, \delta)$ со значением ошибки, не превышающим $3,0 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, приведенная нейросеть позволяет при любых значениях быстроходности λ и установочного угла δ получить необходимое значение коэффициента мощности ветроколеса и его производной, которую

приблизительно, без существенной потери точности можно оценить по следующей формуле

$$\frac{dc_{pw}}{d\delta} \approx \frac{\Delta c_{pw}}{\Delta\delta} = k_{wl}, \quad (2.30)$$

где $\Delta\delta$ – малое приращение pitch-угла, °; Δc_{pw} – соответствующее ему приращение коэффициента мощности ветроколеса, k_{wl} – нелинейный коэффициент.

С учетом вышесказанного, структурная схема формирования момента ветроколеса будет иметь вид, изображенный на рисунке 2.15. Модель момента ветроколеса в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунок Б.16).

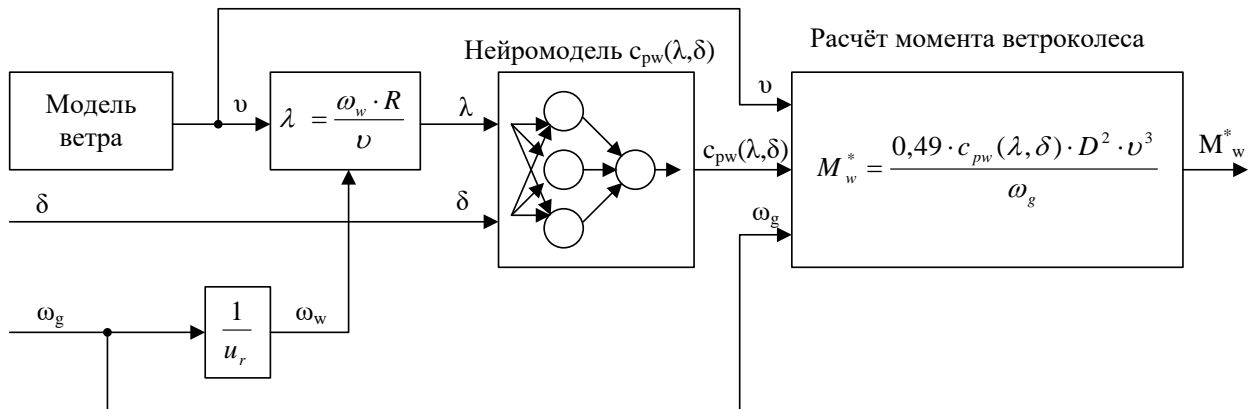


Рисунок 2.15 – Структурная схема формирования момента ветроколеса, приведенного к валу генератора

Рисунок 2.15 показывает, что входными параметрами приведенной структурной схемы являются: скорость ветра, pitch-угол лопасти и скорость вращения генератора, а выходным значением является момент ветроколеса, приведенный к валу генератора.

2.2.2 Коррекция модели ветра с учетом модели ветроколеса и эффекта затенения башни.

Нужно отметить, что поведение скорости ветра, приведенное на рисунке 2.6, было получено с предположением равного мгновенного значения скорости ветра для всех трех лопастей во время вращения ветроколеса. Но такое утверждение

становится некорректным, если учитывать тот факт, что существенные колебания мощности ветроколеса на частоте ≈ 1 Гц возникают за счет прохождения лопастями зоны затенения башни, в которой скорость ветра существенно снижается, так как башня представляет собой препятствие для воздушного потока [3, с. 186]. Ведь во время вращения лопасти поочередно проходят зону с пониженной скоростью ветра. То, что указанные колебания мощности обусловлены не природой ветра, а эффектом затенения башни, подтверждает спектральная модель Ван Дер Ховена (Рисунок 2.1), из которой видно, что плотность мощности колебаний ветрового потока на частоте 1 Гц должна быть значительно меньше, чем плотность мощности колебаний с периодом равным приблизительно 1-ой минуте [19, с. 33]. Приведенные соображения подтверждают факт неравномерности скорости ветра в разных секторах плоскости вращения ветроколеса. Разделение плоскости вращения на секторы демонстрирует рисунок 2.16. Положение лопастей на этом рисунке соответствует максимальному значению мощности ветроколеса.

Опираясь на спектральную модель Ван дер Ховена и эффект затенения башни можно утверждать, что при дальнейшем повороте ветроколеса, которое вращается со скоростью ≈ 20 об/мин., на 120 градусов, скорость ветра в первом и втором секторах в течение промежутка времени ≈ 1 сек. изменяется незначительно, а в третьем секторе существенно снижается при повороте на 60 градусов и восстанавливается в конце третьего сектора.

Однако реальное поведение скорости ветра в указанных секторах невозможно точно зафиксировать с помощью датчика скорости ветра по нескольким причинам. Во-первых, значение быстроходности, которая лежит в основе определения коэффициента мощности ветроколеса (Рисунок 2.11), определяется с учетом скорости ветра перед ветроколесом, а датчик находится в хвосте гондолы. Таким образом, его показания нуждаются в постоянном перерасчете с учетом коэффициента торможения ветрового потока, который согласно закону Бетца не является постоянной величиной [3, с. 84]. Во-вторых, информацию о скорости ветра для сектора 3 вообще невозможно получить с

помощью датчика, так как он находится на уровне первого и второго секторов и совсем не ощущает изменений скорости ветра в третьем секторе затенения.

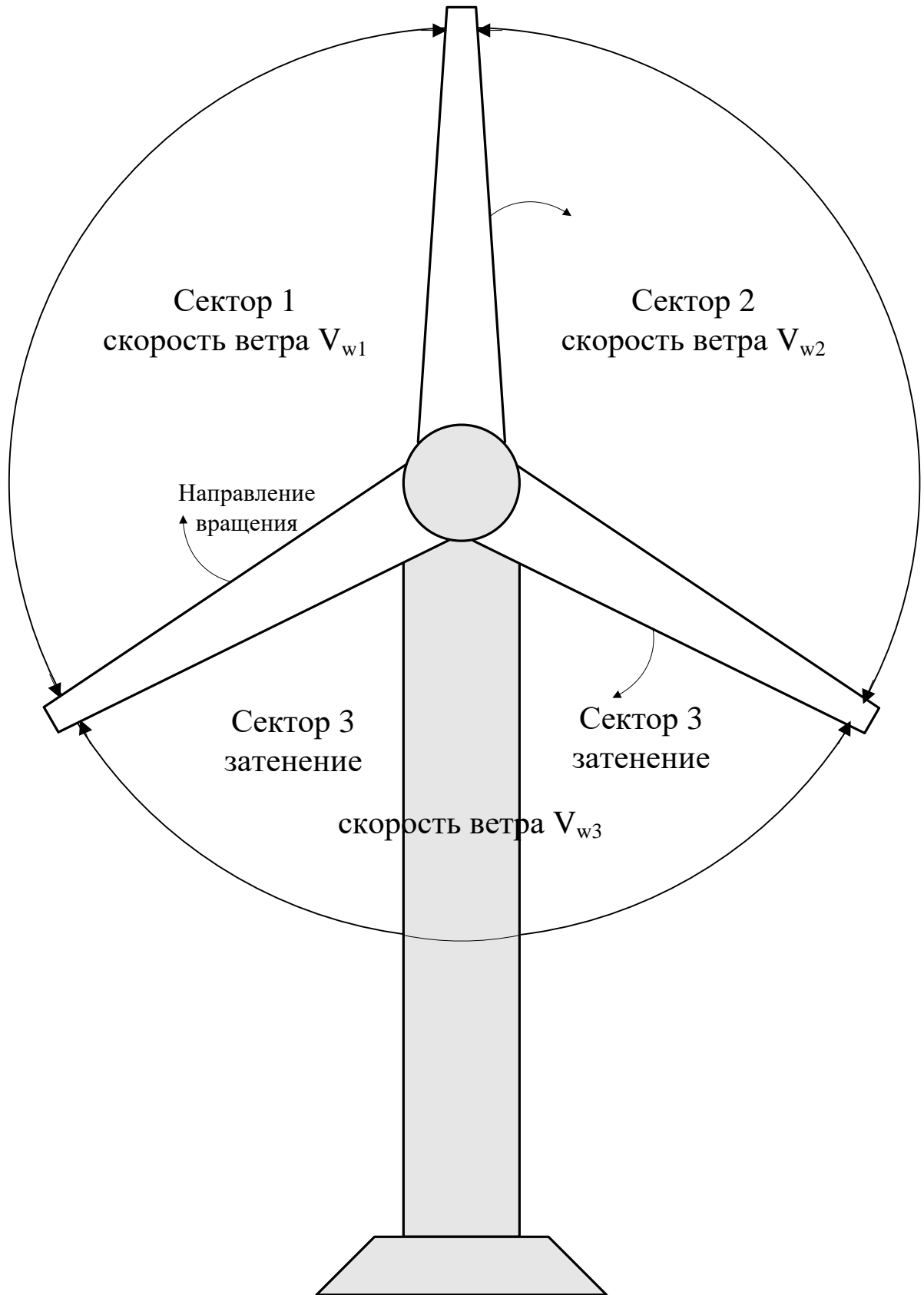


Рисунок 2.16 – Разделение плоскости вращения ветроколеса на секторы

Вышесказанное дает возможность утверждать, что реальное значение скорости ветра перед ветроколесом в трех разных секторах можно получить только путем косвенного определения расчетными методами.

В основу такого метода можно положить логичное предположение о том, что если в ходе создания математической модели ветроколеса была установлена нелинейная взаимосвязь между быстроходностью и pitch-углом в качестве входных параметров и коэффициентом мощности ветроколеса в качестве выходного параметра (Рисунок 2.14), то можно установить взаимосвязь между этими тремя параметрами в другом сочетании. При этом, в качестве входных параметров можно использовать коэффициент мощности – c_{pw} и pitch-угол лопасти, а в качестве выходного параметра – быстроходность λ .

Воспроизвести такую нелинейную взаимосвязь можно также при помощи новой нейросети. Поскольку коэффициент мощности – c_{pw} связан с моментом ветроколеса, а быстроходность связана со скоростью ветра, то при тренировке такой нейросети целесообразно в качестве входных параметров выбирать момент ветроколеса и pitch-угол лопасти, а в качестве выходного параметра – скорость ветра перед ветроколесом. Расчетное значение скорости ветра в дальнейшем может понадобиться для обеспечения эффективной работы системы регулирования. При этом информацию о pitch-угле предоставляют датчики положения, имеющиеся на каждой лопасти, а для определения суммарного момента ветроколеса – $M_{w\Sigma}$, приведенного к валу генератора, можно воспользоваться расчетной формулой, которая учитывает электромагнитный момент – M_g и угловое ускорение генератора, а также суммарный момент инерции системы – J_Σ

$$M_{w\Sigma} = M_g + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_g}{dt} . \quad (2.31)$$

Для обеспечения процесса тренировки указанной нейросети была использована методика, изображенная на рисунке 2.17, которая позволяет получать значение быстроходности λ и коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} в

зависимости от угла атаки α и $pitch$ -угла. Если дополнить указанную методику формулами расчета скорости ветра и момента ветроколеса, приведенного к валу генератора, то можно получить все необходимые данные для процесса тренировки нейросети, которая использует момент ветроколеса и $pitch$ -угол как входные данные, а скорость ветра, как выходной параметр. Структура процесса сбора данных для тренировки предложенной нейросети приведена на рисунке 2.17.

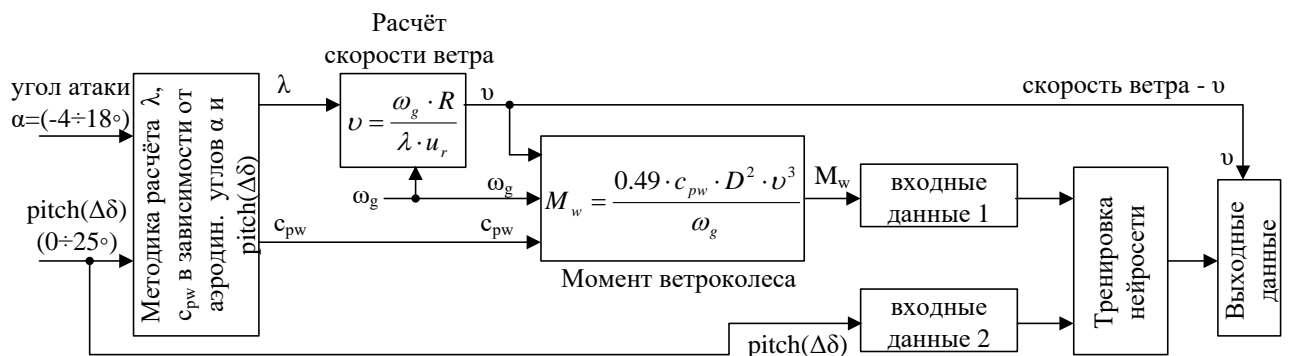


Рисунок 2.17 – Структура процесса сбора данных для тренировки нейросети, которая воспроизводит зависимость скорости ветра от момента ветроколеса и $pitch$ -угла – $v(M_w, pitch)$

Тренировку нейросети следует проводить при фиксированной скорости вращения генератора, поскольку в случае изменения скорости генератора сеть должна иметь в качестве третьего входа скорость генератора, при этом дополнительный входной сигнал безусловно усложнит ее структуру.

Характер зависимости $v(M_w, pitch)$, полученной на базе структурной схемы изображенной на рисунке 2.17, показан в виде объемной фигуры на рисунке 2.18. В горизонтальной плоскости отложены приведенный момент ветроколеса и $pitch$ -угол, а по вертикальной оси скорость ветра.

Воспроизвести приведенную на рисунке 2.18 зависимость удалось с помощью двухслойной нейросети. Первый слой сети состоит из двадцати пяти нейронов с функцией тангенс гиперболический, второй слой содержит один нейрон с линейной функцией. Тренировка проводилась в программном пакете Matlab с использованием метода Левенберга-Маркварта, в ходе которого значение

ошибки не превышало $2,8 \cdot 10^{-4}$. Программы получения тренировочных данных и тренировки указанной нейросети приводятся в приложении А (Программы А.5, А.6, А.7). Структура полученной нейросети приводится на рисунке 2.19.

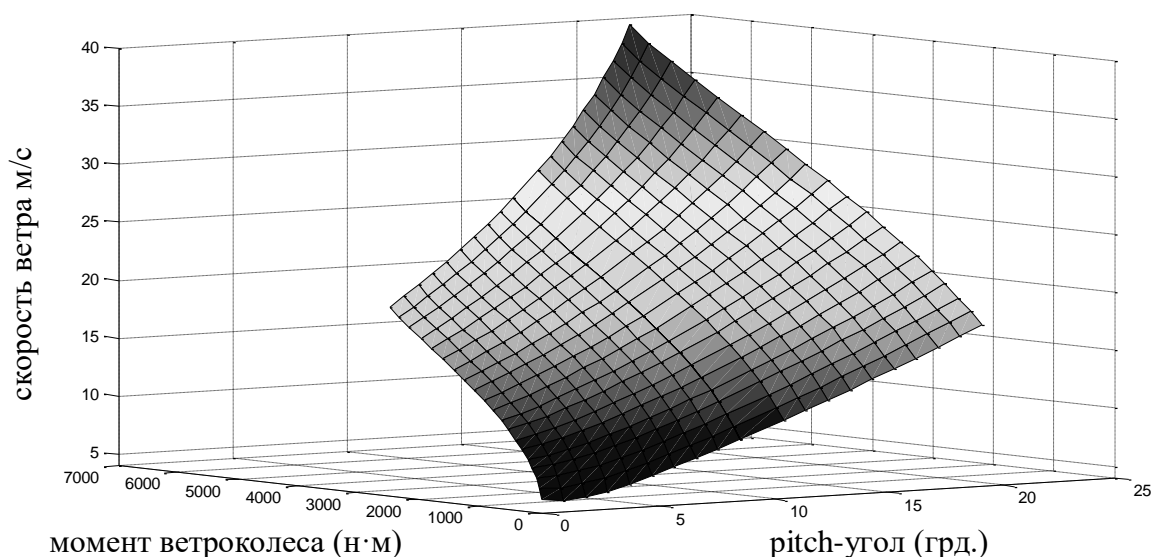


Рисунок 2.18 – Объемная фигура, которая демонстрирует зависимость скорости ветра от момента ветроколеса и pitch-угла лопасти

Для получения расчетных значений скорости ветра в разных секторах плоскости вращения ветроколеса (Рисунок 2.16) можно использовать описанную выше методику, при которой в качестве входного параметра нейросети следует использовать не суммарный момент ветроколеса, а моменты каждой из трех лопастей по отдельности – M_{bl1} , M_{bl2} , M_{bl3} . Принцип такого расчета демонстрирует рисунок 2.20. В качестве входных данных блока расчета скорости ветра по секторам была использована осциллограмма мощности ветроустановки TURBOWIND T600–48 Новоазовской ВЭС. Пример такой осциллограммы приведен на рисунке 2.6. При расчете учитывался тот факт, что ветроустановка во время снятия осциллограммы работала с мощностью меньшей номинальной, т.е. pitch-угол для всех трех лопастей равнялся 0° . Кроме того, в процессе расчета проводилось согласование момента ветроколеса с его параметрами, которые были заложены при создании модели ветроколеса, а именно диаметр – 17м, профиль лопасти – NASA–4412 (Рисунок 2.8).

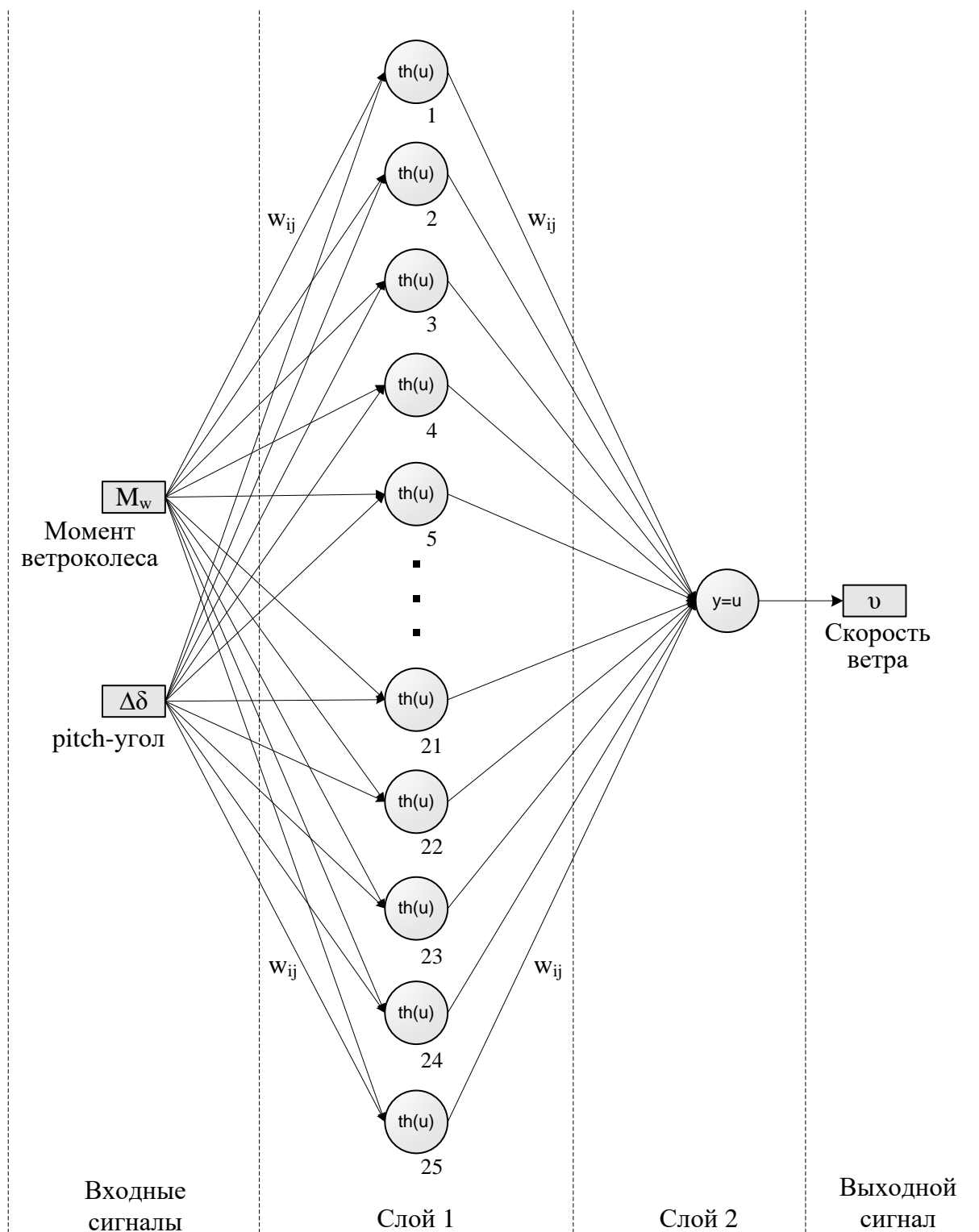


Рисунок 2.19 – Структура полученной двухслойной нейросети для воспроизведения зависимости скорости ветра от момента ветроколеса и pitch-угла лопасти $v(M_w, pitch)$ ветрогенераторной установки

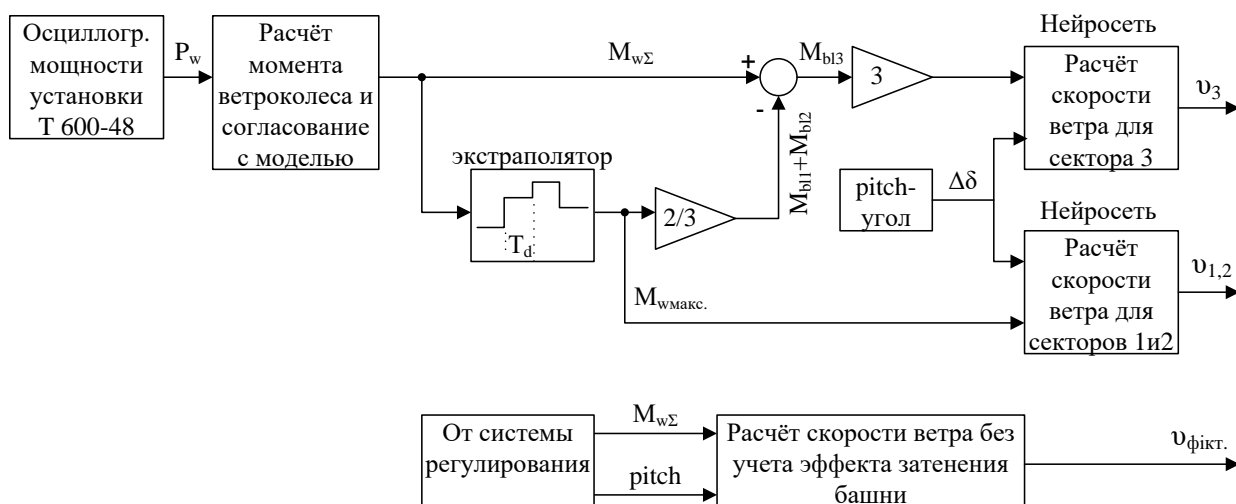


Рисунок 2.20 – Принцип расчета скорости ветра по секторам на основе мгновенного значения мощности ветроколеса

В ходе расчета экстраполятор, который работает с периодом T_d равным трети периода вращения ветроколеса, выхватывает максимальные значения момента ветроколеса, которые соответствуют положениям лопастей, изображенным на рисунке 2.16. При дальнейшем повороте на 120 градусов считается, что лопасти, которые перемещаются в секторах 1 и 2, создают в течение периода дискретности T_d практически неизменный момент, равный $2/3$ от зафиксированного экстраполятором максимального момента. Утверждение о неизменном моменте в секторах 1 и 2 базируется на незначительных изменениях скорости ветра в этих секторах в течение периода T_d в соответствии с моделью Ван дер Ховена. Таким образом, считается, что все изменения мощности ветроколеса с момента фиксации экстраполятором максимума происходят за счёт перемещения лопасти в секторе затенения. Такое допущение позволяет получить расчетные значения моментов, которые создаёт каждая из лопастей ветроколеса при прохождении соответствующего сектора M_{bl1} , M_{bl2} , M_{bl3} . Далее индивидуальные моменты и значения $pitch$ -угла каждой из лопастей могут быть использованы как входные данные натренированной нейросети (Рисунок 2.19), которая воспроизводит нелинейную зависимость между моментом ветроколеса, $pitch$ -углом и скоростью ветра. Данная методика была реализована в пакете Matlab (приложение Б, Рисунок Б.9).

Пример функционирования указанной методики расчета демонстрируется на рисунках 2.21 и 2.22. На рисунке 2.21 приводится фрагмент графика изменений мгновенной мощности ветроколеса с диаметром $D=17$ м. На рисунке 2.22 приводятся расчетные скорости ветра по секторам $v_{1,2}$ и v_3 , а также фиктивная скорость ветра $v_{\text{фикт}}$, которую можно было бы считать за истинную в случае равномерного распределения моментов между лопастями во время прохождения трех секторов. Рисунок показывает существенные просадки скорости ветра в третьем секторе. При скорости ветра в 1-ом и 2-ом секторах на уровне $9 \div 9,5$ м/с, ее значение в 3-ем секторе может снижаться до $4,5 \div 5$ м/с, т.е. практически в два раза.

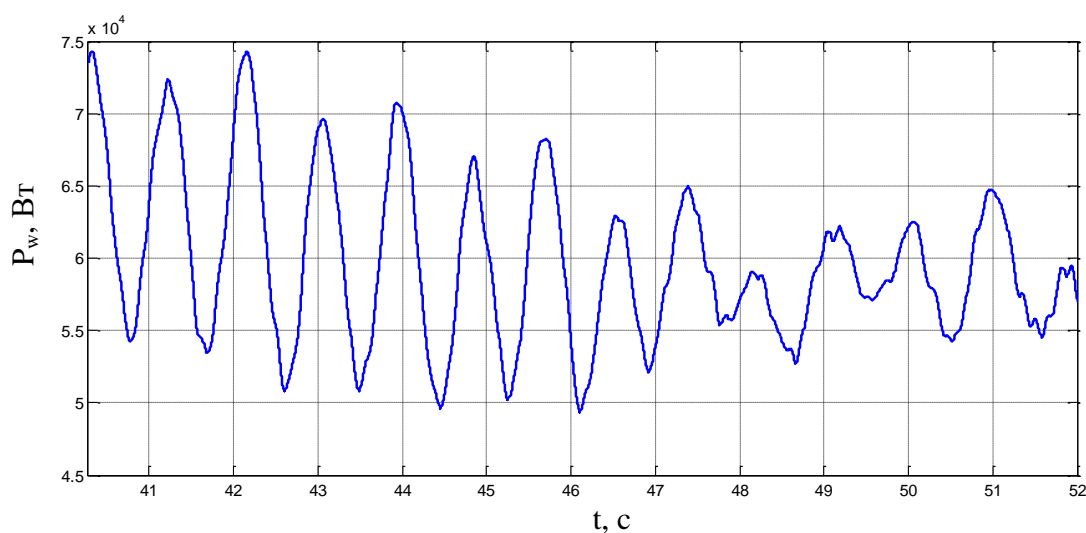


Рисунок 2.21 – Поведение мгновенной мощности ветроколеса

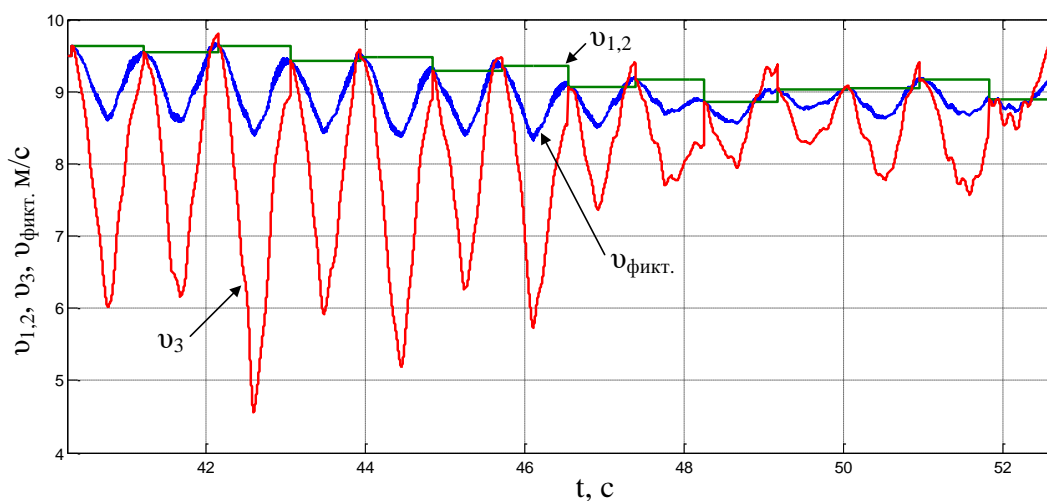


Рисунок 2.22 – Рассчитанные скорости ветра по секторам $v_{1,2}$ и v_3 , а также фиктивная скорость ветра $v_{\text{фикт}}$

Таким образом, можно утверждать, что методика расчета скорости ветра в секторах ветроколеса, приведенная на рисунке 2.20, может быть положена в основу имитатора ветра, который учитывает неравномерность скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса и в дальнейшем будет использован при моделировании. Так же, эта методика может использоваться для косвенного определения скорости ветра в секторах с целью улучшения динамических свойств системы регулирования мощности ветроустановки.

2.3 Структура системы управления ветроустановкой с переменной скоростью вращения ветроколеса и особенности ее функционирования в различных режимах работы

Как было показано в разделе 1, в современных ветрогенераторных установках с переменной скоростью вращения ветроколеса одновременно функционируют несколько контуров регулирования (Рисунки 1.7 и 1.8). Для реализации концепции переменной скорости вращения ветроколеса наиболее часто используется преобразователь частоты, который обеспечивает необходимые режимы работы, как для синхронного, так и для асинхронного генераторов [5, с. 253]. Силовая часть преобразователя состоит из активного выпрямителя, промежуточного контура и сетевого инвертора (Рисунок 2.23).

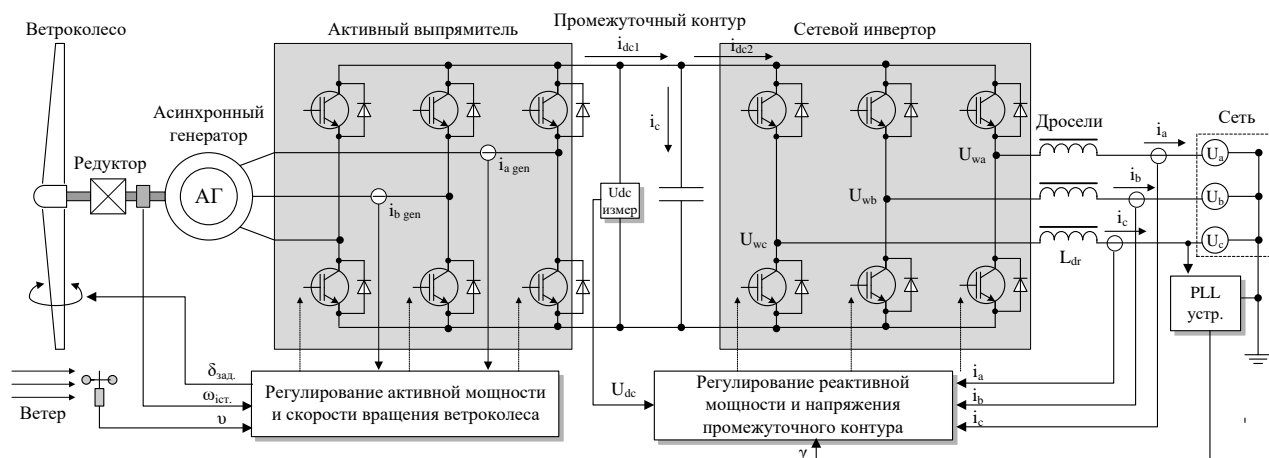


Рисунок 2.23 – Структурная схема преобразователя и основные блоки системы регулирования для ветроустановки с асинхронным генератором с к.з. ротором

Система регулирования позволяет контролировать четыре важнейших параметра ветроустановки, а именно: скорость вращения ветроколеса за счет изменения pitch-угла, активную мощность за счет регулирования момента генератора посредством активного выпрямителя, реактивную мощность установки и напряжение промежуточного контура за счет регулирования вектора выходного напряжения сетевого инвертора.

Основным преимуществом такой структуры ветроустановки является полное отделение генератора от сети. Это означает, что скорость вращения генератора больше не связана с фиксированной частотой сети 50 Гц и может изменяться в зависимости от скорости вращения вектора напряжения на выходе активного выпрямителя. Именно такая концепция обеспечивает так называемое мягкое подключение генератора к сети, т.е. благодаря возможности изменять скорость вращения ветроколеса, оно может использоваться в роли буфера-накопителя кинетической энергии, а именно забирать лишнюю энергию порывов ветра увеличивая скорость вращения и отдавать накопленную энергию в случае уменьшения скорости ветрового потока.

Поскольку в данной работе не рассматриваются вопросы регулирования реактивной мощности ветроустановки, все дальнейшие исследования будут посвящены двум основным контурам регулирования, непосредственно связанным с активным выпрямителем со стороны генератора, т.е. контурам активной мощности и скорости вращения ветроколеса.

Система регулирования ветроустановки с непрямым подключением генератора к сети через преобразователь частоты приобретает новые возможности по сравнению с генератором, который напрямую соединен с сетью.

Во-первых, появляется возможность изменять частоту вращения ветроколеса при изменении скорости ветра и поддерживать, таким образом, оптимальный угол притекания β_{opt} , согласно формуле (2.15). Благодаря этому ветроколесо может работать в точках максимальной мощности с максимальным значением коэффициента мощности ветроколеса. c_{pw} (Рисунок 1.4).

Во-вторых, появляется возможность регулирования электромагнитного момента генератора и стабилизации, благодаря этому, выходной мощности ветроустановки в условиях колебаний скорости ветра [56].

В-третьих, возникает возможность мягкого пуска генератора, т.е. выход на заданную частоту вращения ветроколеса с ограничением пусковых токов генератора.

Для обеспечения указанных выше возможностей система регулирования ветроустановки, в которой используется, например асинхронный генератор с КЗ ротором, должна иметь структуру, приведенную на рисунке 2.24 [57, 58, 59]

Приведенная структурная схема демонстрирует, что система стабилизации мощности имеет два контура: контур регулирования скорости вращения ветроколеса, который обеспечивает контроль скорости ветроколеса посредством изменения pitch-угла лопасти, и контур регулирования электромагнитного момента генератора, функционирование которого базируется на принципах векторного регулирования во взаимодействии с активным выпрямителем.

Приведенная на рисунке 2.24 двухконтурная система регулирования является универсальной и может быть успешно применена с небольшими изменениями так же и для синхронного генератора. В этом случае модель генератора, конечно же, должна соответствовать уравнениям синхронной машины [60] и в контуре регулирования момента генератора будет отсутствовать регулятор потока.

Регулирование скорости вращения ветроколеса в приведенной двухконтурной системе регулирования, независимо от типа генератора, осуществляется согласно уравнению вращательного движения, в котором участвуют момент ветроколеса и момент генератора

$$M_w - M_g \cdot u_r = \frac{0,49 \cdot c_{pw}(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot v^3}{\omega_w} - M_g \cdot u_r = J_\Sigma \frac{d\omega_w}{dt}. \quad (2.32)$$

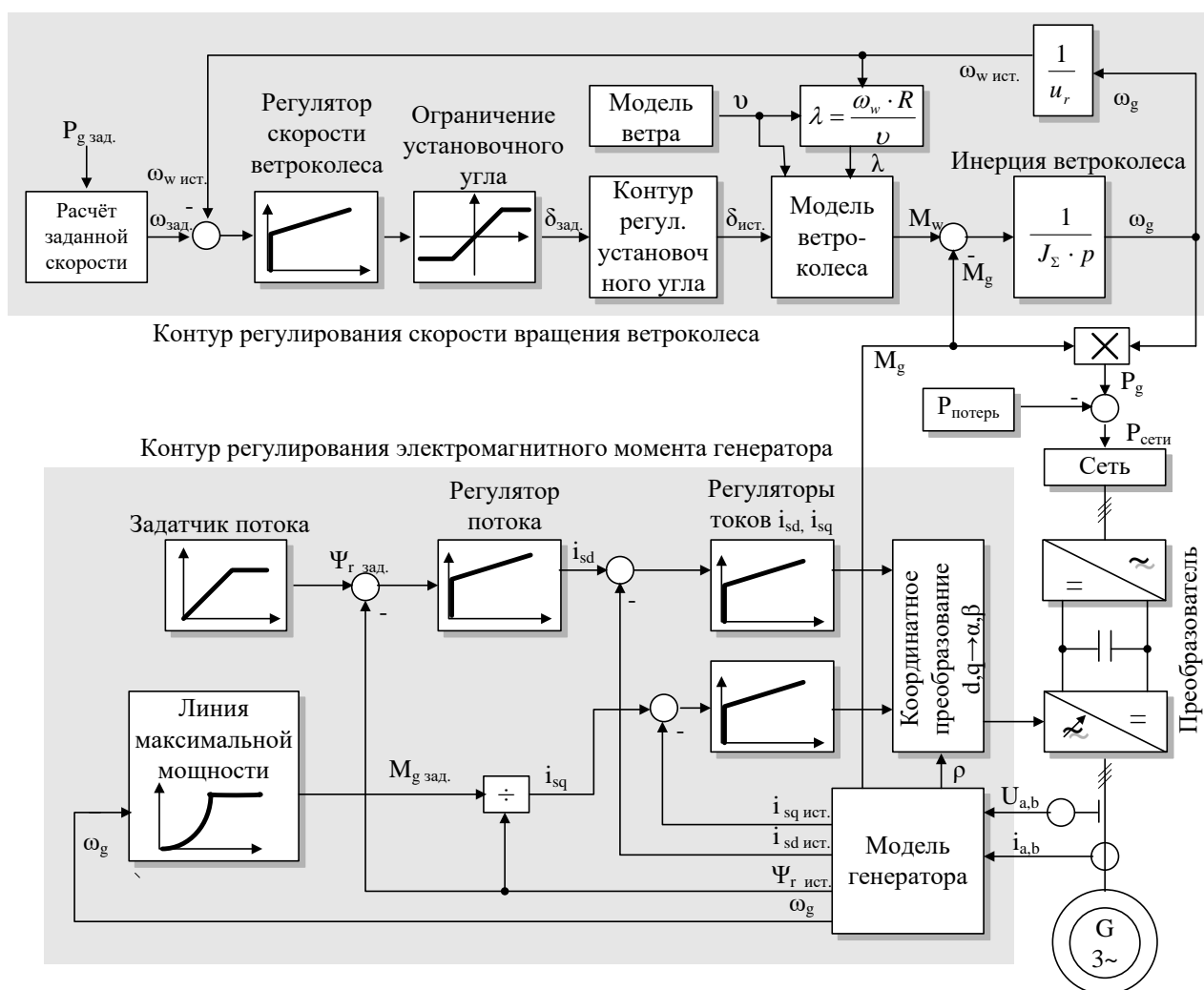


Рисунок 2.24 – Структурная схема двухконтурной системы регулирования ветрогенераторной установки

Это уравнение показывает, что при условии удержания момента генератора M_g на заданном уровне средствами векторного регулирования, контроль скорости вращения ветроколеса можно осуществлять за счет влияния на момент ветроколеса посредством изменения pitch-угла лопасти, который в свою очередь определяет значение коэффициента мощности ветроколеса (Рисунок 2.12). Таким образом, pitch-угол является физическим средством влияния на скорость вращения ветроколеса.

Контур регулирования установочного угла лопасти, входящий в состав контура регулирования скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.24), должен успешно справляться с задачей регулирования [61] благодаря применению быстродействующих позиционных электроприводов, а также наличию большой

инерционности в контуре скорости, обусловленной большим моментом инерции ветроколеса. Концепция ветроустановки с переменной частотой вращения, приведенная на рисунке 2.23 должна обеспечить описанные ниже режимы работы (Рисунок 2.25) [4, с. 409].

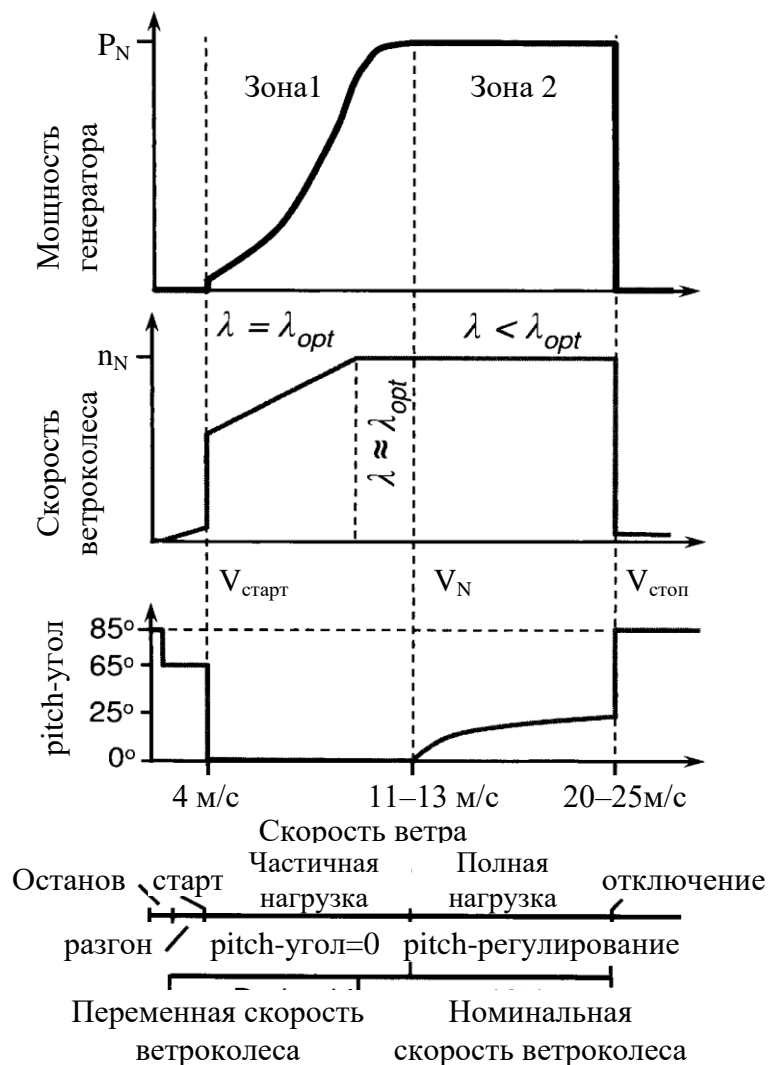


Рисунок 2.25 – Поведение основных параметров ветроустановки в различных режимах работы в зависимости от скорости ветра

- Режим пуска генератора со ступенчатым изменением pitch-угла лопасти для увеличения приводного момента ветроколеса во время пуска;
- режим работы с неполной нагрузкой генератора (частичная нагрузка), при котором осуществляется отбор максимальной мощности за счет поддержания оптимальной быстроходности ветроколеса – λ_d [62] (Рисунок 2.10). Значение pitch-угла в этом режиме неизменно и равняется 0 градусам;

– режим работы с полной нагрузкой и удержанием мощности генератора и скорости вращения ветроколеса на уровне заданных (номинальных) значений. Значение pitch-угла в этом режиме изменяется системой регулирования.

В [19] показано, что особенностью двухконтурной системы регулирования является связь между скоростью вращения и заданием момента генератора (Рисунок 2.24). Эта связь устанавливается из соображений получения максимальной мощности от ветрового потока в режиме частичной нагрузки генератора и выражается следующей формулой

$$M_{g \max} = \frac{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot D^2 \cdot v_{расч.}^3}{\omega_g}, \quad (2.33)$$

где $v_{расч.}$ – расчетная текущая скорость ветра, м/с, которая соответствует максимальному моменту генератора, $c_{pw \max}$ – максимальный коэффициент мощности ветроколеса.

Получить расчетное значение скорости ветра для формулы (2.33) – $v_{расч.}$ можно, исходя из того принципа, что при работе на линии максимальной мощности расчетная быстроходность ветроколеса – λ_d должна поддерживаться для скоростей ветра в диапазоне от стартовой до номинальной, т.е. должны выполняться условия формулы

$$\lambda_d = \frac{\omega_{gN} \cdot R}{v_N \cdot u_r} = \frac{\omega_g \cdot R}{v_{расч.} \cdot u_r}, \quad (2.34)$$

где ω_{gN} – номинальная скорость генератора, рад/с; v_N – номинальная скорость ветра, м/с.

Тогда расчетную скорость ветра можно определить на основе номинальных данных ветроустановки и текущей скорости генератора – ω_g по формуле

$$v_{расч.} = \frac{v_N}{\omega_{gN}} \cdot \omega_g. \quad (2.35)$$

При подстановке формулы (2.35) в формулу (2.33) получим окончательную формулу, которая определяет связь между заданием момента генератора и его текущей скоростью вращения

$$M_{g \max} = \frac{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot D^2 \cdot v_N^3}{\omega_{gN}^3} \cdot \omega_g^2. \quad (2.36)$$

2.4 Совершенствование работы системы управления ветроустановкой в режиме пуска, математическое моделирование пускового режима

Из анализа рисунка 2.25 следует вывод о том, что задачей системы управления в режиме пуска является ступенчатое изменение pitch-угла лопасти для увеличения приводного момента ветроколеса и скорейшего выхода ветроколеса на рабочую скорость вращения. Необходимость ступенчатого уменьшения pitch-угла от флюгерного значения – 85° до нуля в процессе разгона продиктована тем, что при еще малой угловой скорости ветроколеса тангенциальная составляющая вектора воздушного потока так же будет мала, а значит угол притекания β будет принимать слишком большие значения, что в свою очередь может привести к набеганию воздушного потока на лопасть с углами атаки, далекими от оптимальных значений (Рисунки 2.26 и 2.7). Для обеспечения в процессе разгона углов атаки близких к оптимальным значениям привода поворота лопасти должны периодически менять значение установочного угла – δ в соответствии с формулой (2.16), что приведет к росту тангенциальной составляющей приводной силы лопасти и ускорению разгона. Как правило, ведущие производители в установках мощностью выше 500 кВт для обеспечения изменения установочного угла используют позиционный электропривод [63], который получает от центральной системы управления ветроустановки задание на установочный угол и благодаря зубчатой передаче осуществляет вращение лопасти вокруг своей оси. Пример привода поворота лопасти с датчиком конечного положения и датчиком фактического положения, который используется на ветроустановке Fuhrlander, показан на рисунке 2.27.

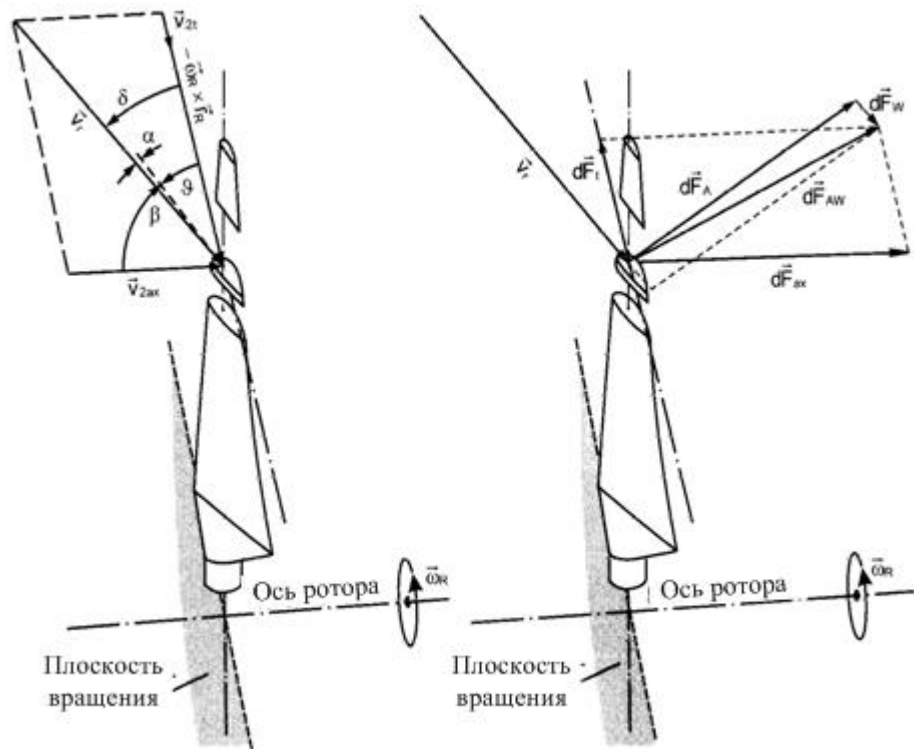


Рисунок 2.26 – Аэродинамические углы и силы, которые действуют на лопасть ветроколеса при набегании ветрового потока

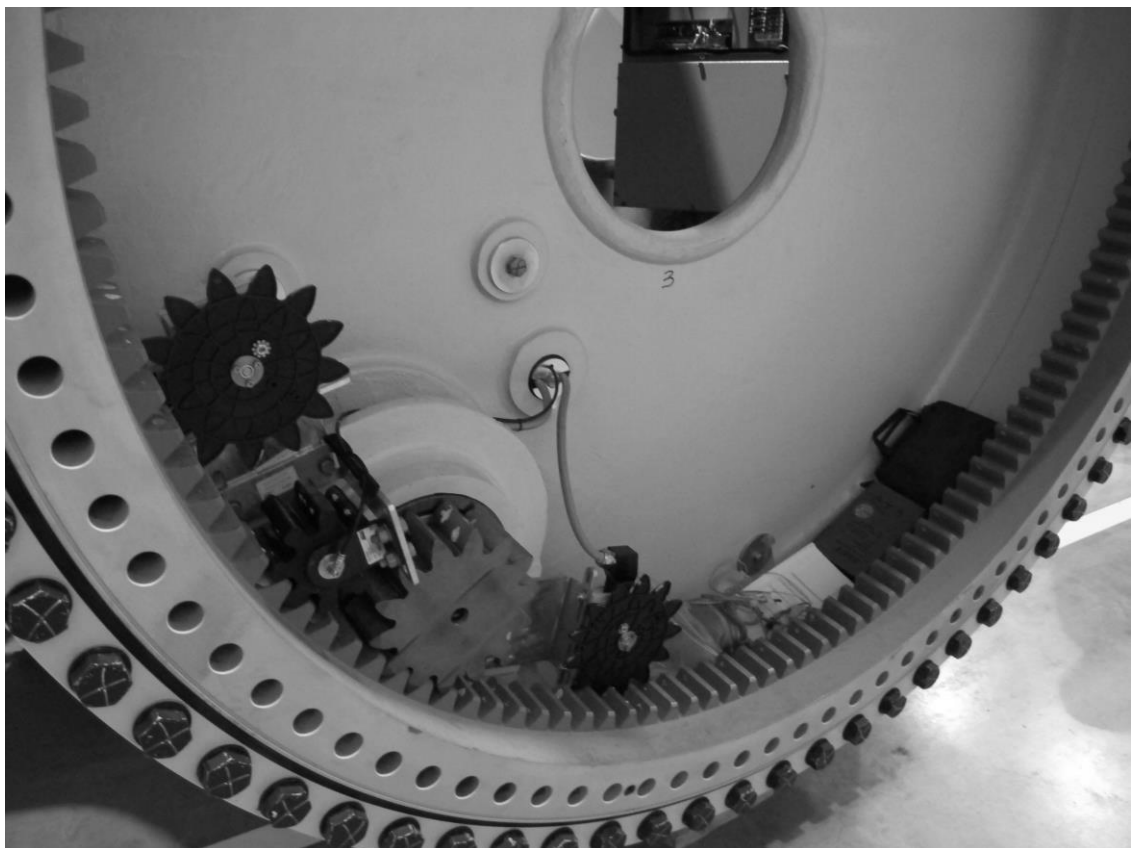


Рисунок 2.27 – Вид зубчатой передачи и датчиков положения привода поворота лопасти ветроустановки Fuhrlander

Для обеспечения оптимального процесса пуска система управления должна правильно определять условия, при которых необходимо изменять pitch-угол лопасти в процессе раскручивания ветроколеса. При этом целесообразно воспользоваться семейством характеристик, которые показывают зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности при разных фиксированных значениях pitch-угла (Рисунок 2.28).

Рисунок показывает, что, когда в процессе раскручивания ветроколеса будет увеличиваться его быстроходность, значение pitch-угла должно изменяться таким образом, чтобы ветроколесо все время находилось на той характеристике, на которой значение коэффициента мощности является наибольшим при текущей быстроходности.

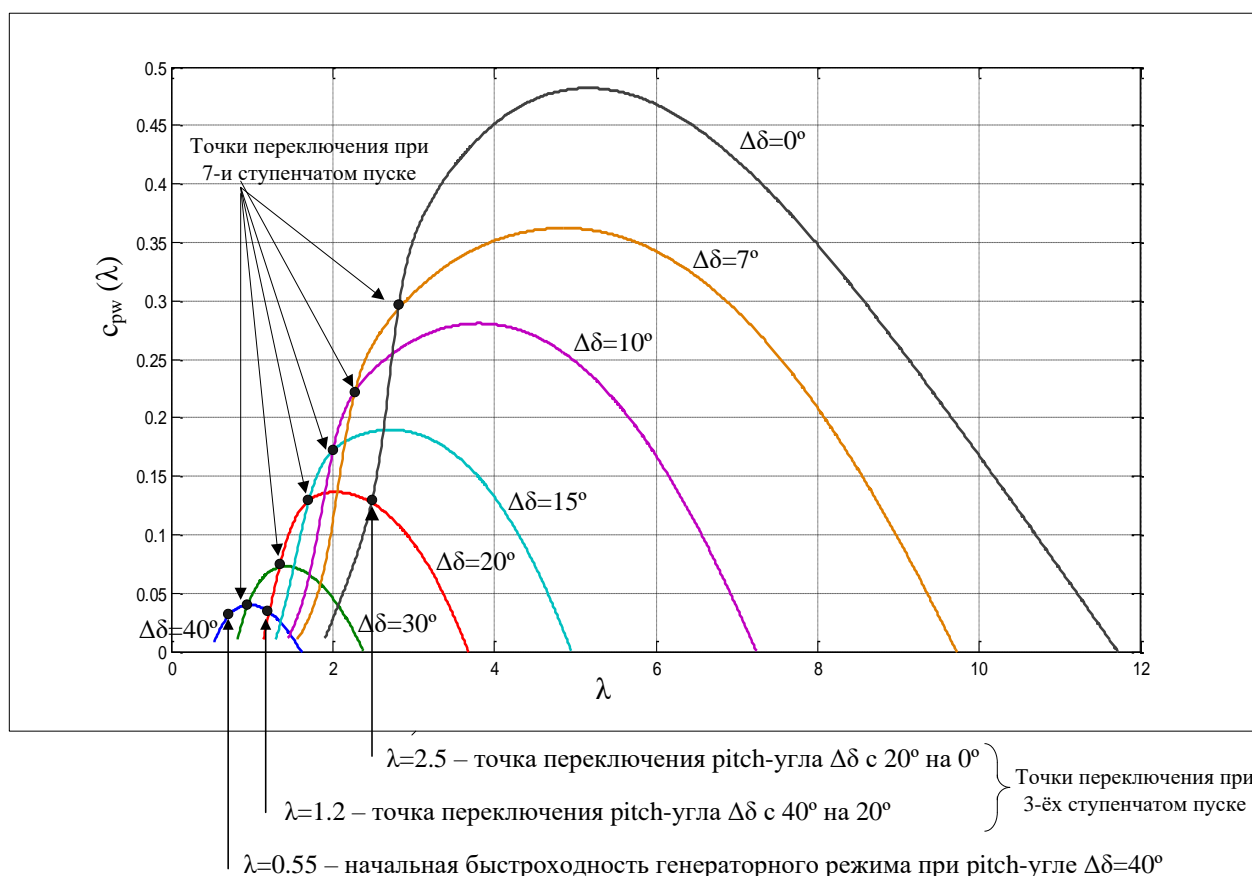


Рисунок 2.28 – Семейство характеристик зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности при разных фиксированных значениях pitch-угла

Это означает, что управление pitch-углом в процессе разгона может происходить или непрерывно по определенному закону, или ступенчато с разным количеством ступеней. Точки, в которых нужно изменять pitch-угол при 3-х ступенчатом и 7-и ступенчатом управлении обозначены на рисунке 2.28. Из вышесказанного следует, что для обеспечения оптимального пуска задание на установочный угол лопасти – $\delta_{\text{зад.}}$ должно формироваться не регулятором скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.24), а специальным блоком управления, который должен реализовывать показанные на рисунке 2.28 принципы.

Таким образом, для обеспечения пуска ветроколеса силами ветра нужно установить оптимальную временную 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, который является ключевым звеном в блок-схеме управления пусковым режимом генератора, изображенной на рисунке 2.29.

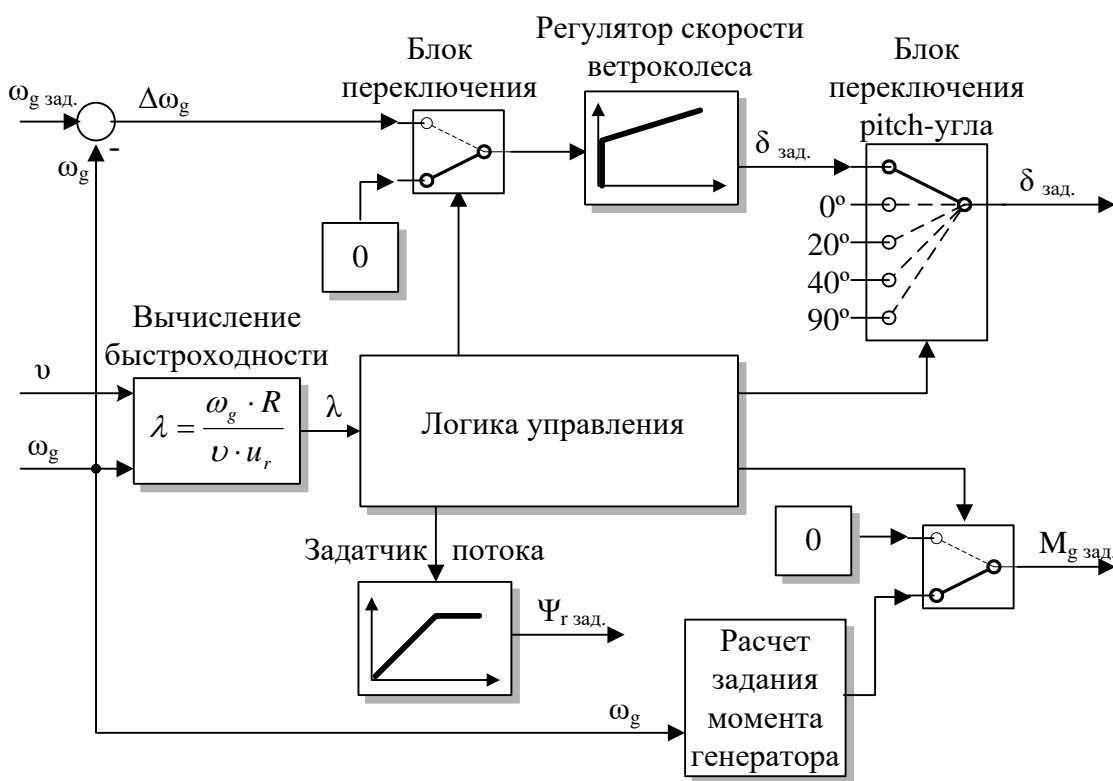


Рисунок 2.29 – Блок-схема управления режимом пуска ветрогенератора.

Формирование управляющих сигналов блоком логики осуществляется в зависимости от значения текущей быстроходности ветроколеса. Диаграмма формирования управляющих сигналов приведена на рисунке 2.30.

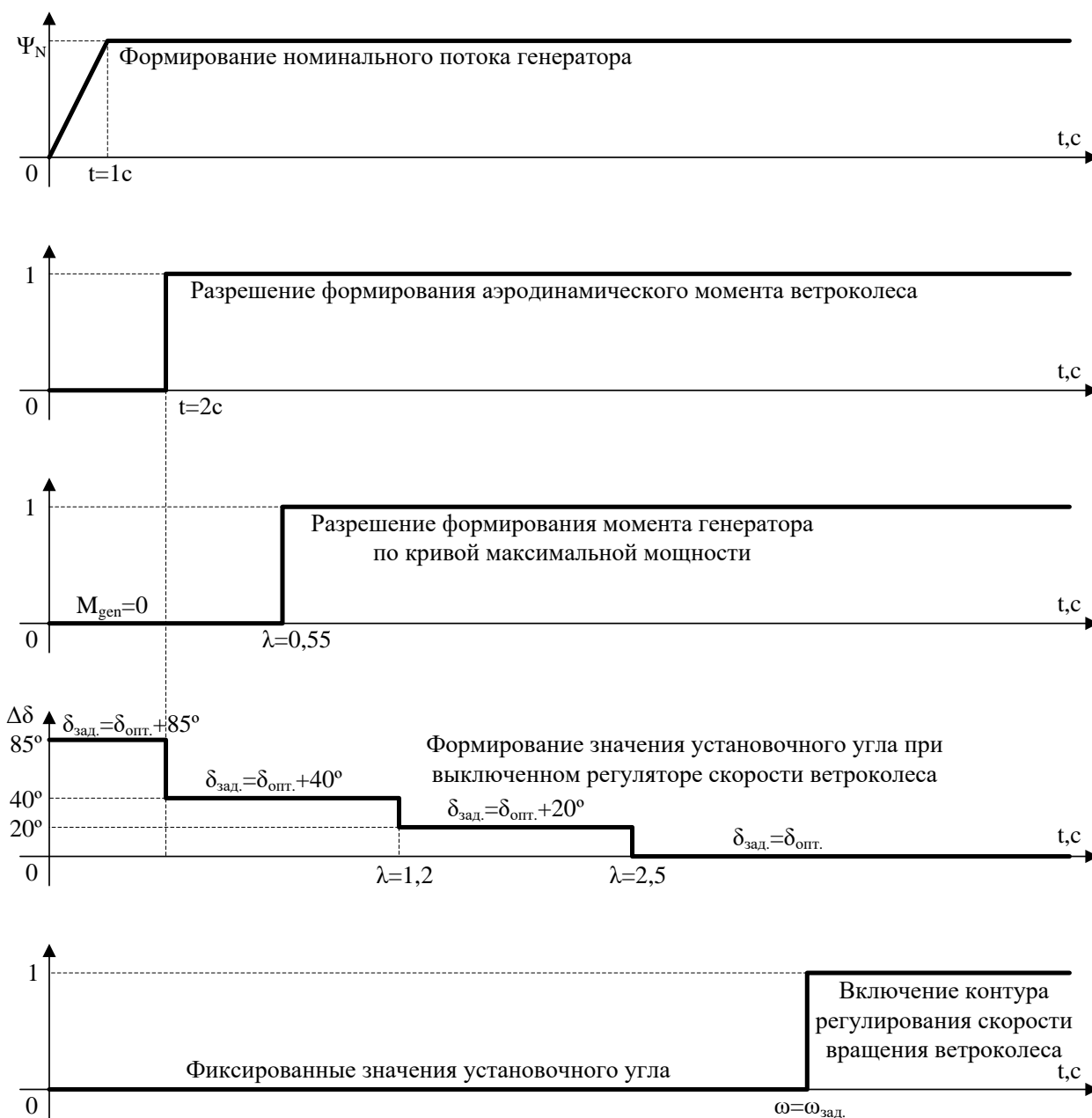


Рисунок 2.30 – Диаграмма формирования управляющих сигналов блоком логики управления в режиме пуска ветрогенератора

Согласно этой диаграмме, прежде всего в генераторе формируется номинальный поток с помощью задатчика потока, так как скачкообразная подача задания на поток, без задатчика, может привести к большим скачкам тока статора. Далее, через 1 секунду после окончания работы задатчика потока, блок логики

управления выдает сигнал, который разрешает формирование аэродинамического момента ветроколеса. Это означает, что должны быть сняты механические тормоза, и установлено задание на установочный угол лопасти на уровне $\delta_{зад.} = \delta_{опт.} + 40^\circ$. Необходимо отметить, что все это время от начала пуска должно формироваться нулевое задание на момент $M_{g\text{ зад.}} = 0$. При этом пусковой момент ветроколеса невозможно вычислить на основе характеристик, которые приведены на рисунке 2.28. Это объясняется тем, что углы атаки во время процесса пуска могут достигать достаточно больших значений, отсутствующих на поляре профиля лопасти (Рисунок 2.8), на основе которой были построены указанные характеристики.

Поэтому приведенный пусковой момент ветроколеса при быстроходностях $\lambda \leq 0,55$ рассчитывался по следующей формуле [1, с. 38].

$$M_{w0} \approx \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2}{4 \cdot \lambda_d \cdot u_r} \quad (2.37)$$

Формирование не нулевого задания на момент генератора в соответствии с формулой (2.36) становится возможным только при достижении быстроходности $\lambda = 0,55$, так как именно при этой быстроходности и pitch-угле $\Delta\delta = 40^\circ$ на ветроколесе формируется достаточный приводной момент и создаются необходимые условия для перехода машины в генераторный режим работы. Таким условием можно считать существенное превышение момента ветроколеса приведенного к валу генератора над заданным электромагнитным моментом генератора, т.е. $M_w^* \gg M_{g\text{ зад.}}$. Если значения упомянутых моментов заменить их выражениями в соответствии с формулами (2.12) и (2.36), то получим условие

$$M_w^* = \frac{0,49 \cdot c_{pw}(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot v^3}{\omega_g} \gg \frac{0,49 \cdot c_{pw\text{ max}} \cdot D^2 \cdot v_N^3}{\omega_{gN}^3} \cdot \omega_g^2 = M_{g\text{ зад.}} \quad (2.38)$$

После сокращений и учета формулы (2.34) получим следующее условие

$$\frac{c_{pw}}{\lambda^3} \gg \frac{c_{pw \max}}{\lambda_d^3} \quad (2.39)$$

При быстроходности $\lambda=0,55$ и pitch-угле $\Delta\delta=40^\circ$ момент ветроколеса, характеристики которого приведены на рисунке 2.28, в 47 раз превосходит заданный момент генератора, что обеспечивает надежный разгон ветроколеса. При этом ветроустановка, уже начиная с быстроходности $\lambda=0,55$, находится в режиме генерации электроэнергии.

Дальше осуществляется разгон ветроколеса силами ветра. Для увеличения аэродинамического момента на валу ветроколеса во время пуска при быстроходностях $\lambda=1,2$ та $\lambda=2,5$, в случае 3-х ступенчатого пуска, осуществляется изменение задания на установочный угол лопасти на фиксированные величины $\delta_{\text{зад.}} = \delta_{\text{опт.}} + 20^\circ$ та $\delta_{\text{зад.}} = \delta_{\text{опт.}}$ соответственно (Рисунок 2.30). При указанных быстроходностях так же соблюдается условие (2.39). При достижении заданной скорости вращения ветроколеса вступает в работу регулятор скорости, который и формирует в дальнейшем необходимое значение установочного угла, обеспечивая поддержку скорости вращения ветроколеса.

Моделирование процесса пуска ветрогенератора проводилось в программном пакете Matlab в соответствии со структурной схемой системы регулирования ветроустановки, изображенной на рисунке 2.24. Соответствующая модель блока управления пуском в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунки Б.5–Б.7). В процессе пуска, для упрощения, можно не учитывать временные задержки в контуре регулирования установочного угла лопасти и контуре регулирования электромагнитного момента генератора ввиду их малых значений, измеряемых несколькими десятками миллисекунд. При моделировании была использована модель ветра на основе измеренных параметров ветроустановки, приведенная на рисунке 2.6. Значение суммарного момента инерции ветроколеса и генератора – J_Σ определялось по формуле, полученной на основе предположения, что центр тяжести лопасти находится приблизительно на расстоянии $0,44 \cdot R$ от центра вращения ветроколеса.

$$J_{\Sigma} = J_g + \frac{3 \cdot m_l \cdot (0,44 \cdot R)^2}{u_r^2}, \quad (2.40)$$

где, m_l – масса лопасти, кг; J_g – момент инерции генератора кг·м².

При моделировании были использованы технические параметры ветроустановки USW 56–100 Новоазовской ВЭС с асинхронным генератором АВГ 280М40М2, а именно: $m_l=160$ кг, $J_g=2,2$ кг·м², $R=8,5$ м, номинальная мощность генератора – $P_{gN}=110$ кВт.

Передаточное число редуктора и необходимое значение номинальной скорости ветра можно определить по формуле

$$u_r = \frac{\omega_{gN} \cdot R}{\nu_N \cdot \lambda_d}; \quad \nu_N = \sqrt[3]{\frac{P_{gN}}{0,49 \cdot c_{pwmax} \cdot D^2}}. \quad (2.41)$$

Поведение таких параметров ветроустановки, как скорость ветра, скорость и электромагнитный момент генератора, а также приведенный момент ветроколеса во время 3-ёх ступенчатого пуска, полученное при моделировании приведено на рисунке 2.31.

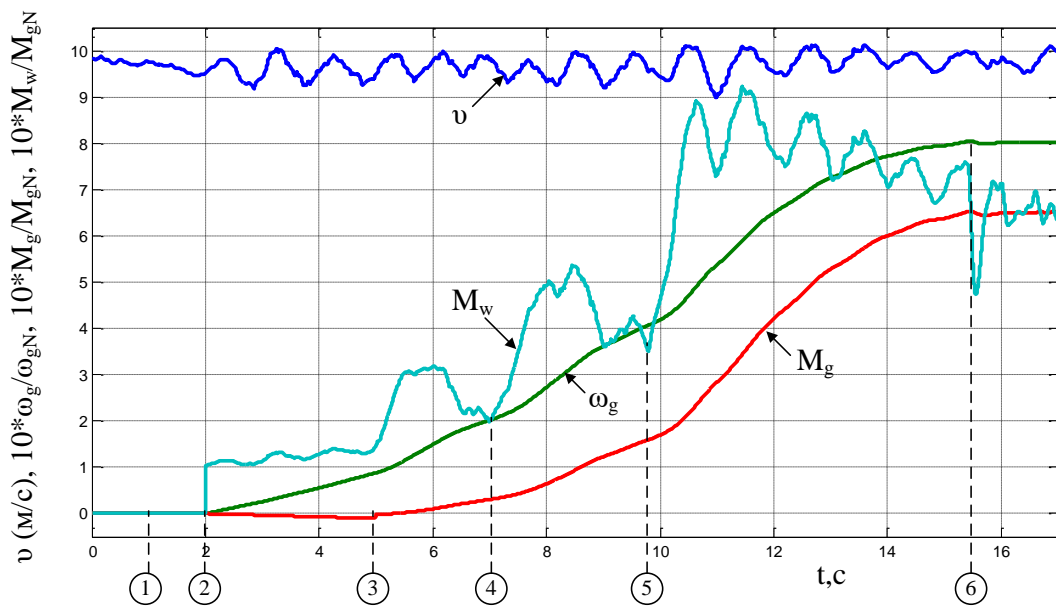


Рисунок 2.31 – Поведение скорости ветра – v , скорости и электромагнитного момента генератора – ω_g , M_g , приведенного момента ветроколеса – M_w при 3-ёх ступенчатом пуске

Этапы пуска ветроколеса соответствуют диаграмме пуска (Рисунок 2.30), они показаны на рисунке 2.31 пронумерованными штрихпунктирными линиями:

- линия 1 означает окончание процесса формирования потока генератора;
- линия 2 означает разрешение формирования аэродинамического момента ветроколеса с установочным углом $\delta_{зад.} = \delta_{онт.} + 40^\circ$;
- линия 3 означает разрешение формирования задания на момент генератора согласно формуле максимального момента (2.36);
- линия 4 означает переключение установочного угла на фиксированное значение $\delta_{зад.} = \delta_{онт.} + 20^\circ$ при соответствующей быстроходности;
- линия 5 означает переключение установочного угла на фиксированное значение $\delta_{зад.} = \delta_{онт.}$ при соответствующей быстроходности;
- линия 6 означает включение регулятора скорости вращения ветроколеса.

Поведение аналогичных параметров установки во время 7-и ступенчатого пуска приведено на рисунке 2.32, где можно увидеть более плавные изменения момента ветроколеса и скорости генератора. Разность во времени при 3-ёх ступенчатом и 7-и ступенчатом пуске (время между линиями 2 и 6) при данных условиях составляет лишь 1,5 секунды.

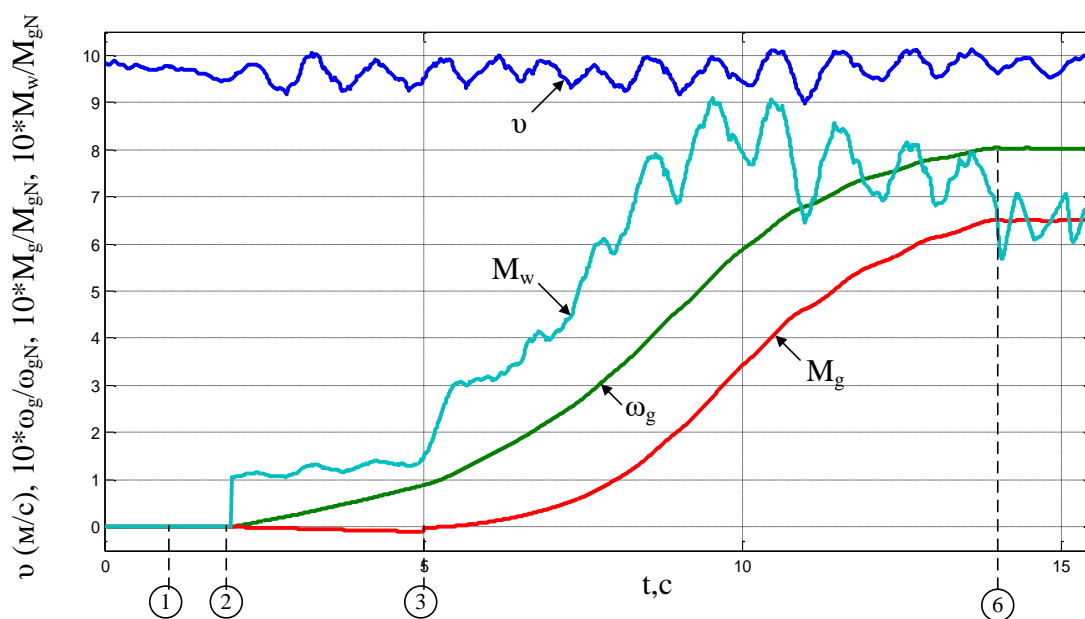


Рисунок 2.32 – Поведение скорости ветра – v , скорости и электромагнитного момента генератора – ω_g , M_g , приведенного момента ветроколеса – M_w при 7-и ступенчатом пуске

Какое значение pitch-угла должно поддерживаться в каком диапазоне быстроходностей, для обеспечения оптимального 7-и ступенчатого пуска, показано в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Соответствие между pitch-углом и диапазонами быстроходностей во время 7- и ступенчатого пуска ветрогенератора

Диапазон быстроходности	0÷0,95	0,95÷1,34	1,34÷1,7	1,7÷2	2÷2,28	2,28÷2,81	2,81÷5
Значение pitch-угла $\Delta\delta$ (грд.)	40	30	20	15	10	7	0

Рисунки 2.31 и 2.32 показывают, что блок логики управления, который формирует управляющие сигналы в соответствии с диаграммой на рисунке 2.30, обеспечивает плавное изменение электромагнитного момента генератора, и постоянную положительную разность между моментом ветроколеса и моментом генератора, что является необходимым условием разгона ветроколеса до рабочей скорости вращения.

2.5 Оценка эффективности работы системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки генератора

2.5.1 Основная задача системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки

Как упоминалось ранее (Рисунок 2.25), задачей системы регулирования в режиме частичной нагрузки является получение максимальной мощности от ветрового потока. Для этого требуется поддержание оптимального угла притекания – β_{opt} в соответствии с формулой (2.15) и оптимального угла атаки – α_{opt} в соответствии с рисунком 2.8. Поддержание необходимых значений этих углов приведет к работе ветроколеса с расчетной быстроходностью – λ_d и максимальным коэффициентом мощности – $c_{pw\ max}$, (Рисунок 2.10). Поскольку скорость ветра не является постоянной величиной, то выполнение приведенных

выше условий возможно только при пропорциональном изменении угловой скорости вращения ветроколеса по отношению к скорости ветра перед ветроколесом в соответствии с формулой (2.13). Тогда система регулирования должна поддерживать оптимальную скорость ветроколеса в соответствии с формулой

$$\omega_{w \text{ opt}} = \frac{\lambda_d \cdot v \cdot u_r}{R} . \quad (2.42)$$

Однако, как уже упоминалось ранее, угловая скорость вращения ветроколеса формируется под воздействием момента ветроколеса и момента генератора по формуле (2.32). При этом в режиме частичной нагрузки момент ветроколеса будет формироваться в соответствии с рисунком 2.15 при оптимальном значении установочного угла ($\delta = \delta_{opt}$), т.е. нулевом значении pitch-угла ($\Delta\delta = 0$), а момент генератора будет формироваться в соответствии с формулой (2.36) на основании текущего значения скорости вращения генератора. Таким образом, взаимодействие двух моментов должно приводить к поддержанию оптимальной скорости ветроколеса по формуле (2.42). Это предположение основано на том, что если текущая скорость ветроколеса (генератора) превышает оптимальное значение, то тормозящий момент генератора превысит максимальный момент ветроколеса, формулы (2.36) и (2.32), появится отрицательное ускорение и скорость ветроколеса начнет уменьшаться, устремившись к оптимальному значению. В другом случае, если текущая скорость ветроколеса (генератора) меньше оптимального значения, то момент ветроколеса превысит момент генератора, появится положительное ускорение и скорость ветроколеса начнет увеличиваться, снова устремившись к оптимальному значению. С учетом вышесказанного равновесие моментов ветроколеса и генератора будет достигаться при оптимальной скорости вращения – $\omega_{w \text{ opt}}$. Необходимо отметить, что формула (2.36) является идеализированной, поскольку не учитывает механические потери мощности в подшипниках и редукторе, а также электрические потери в генераторе при передаче мощности от ветроколеса

генератору, что может привести к завышенному заданию на момент генератора. С учетом этих потерь формула заданного значения момента генератора в режиме частичной нагрузки должна быть скорректирована к виду

$$M_{g \max} = \frac{0,49 \cdot c_{pw \max} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot D^2 \cdot v_N^3}{\omega_{gN}^3} \cdot \omega_g^2, \quad (2.43)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ – КПД механических потерь, $\eta_{\text{эл}}$ – КПД электрических потерь.

Приведенные выше рассуждения о поддержании оптимальной скорости вращения ветроколеса являются абсолютно верными для стационарного режима работы ветроустановки, однако необходимо провести исследование, насколько они будут верны в динамических режимах. Поскольку в динамике скорость ветра будет меняться во времени в соответствии с предложенной моделью, изменение реального момента генератора не будет мгновенным, а будет зависеть от быстродействия контура регулирования момента, изменение скорости ветроколеса будет зависеть от суммарного момента инерции системы.

Для проведения таких исследований необходимо использовать математическую модель генератора наряду с моделью системы векторного регулирования момента генератора.

2.5.2 Математическая модель генератора во вращающейся системе координат

Как показано в [32, с. 52], для создания математической модели синхронной или асинхронной машины переменного тока удобно воспользоваться векторным представлением основных величин: потока ротора, тока статора и напряжения статора во вращающейся системе координат. Пример такого представления для генераторного режима работы асинхронной машины изображен на рисунке 2.33.

Как видно из рисунка, вращающаяся система координат d, q вращается с частотой поля ω_s , и ее вещественная ось d связана с потоком ротора Ψ_r . Проекция вектора тока статора на действительную ось d вращающейся системы координат – i_{sd} , на мнимую ось q вращающейся системы координат – i_{sq} .

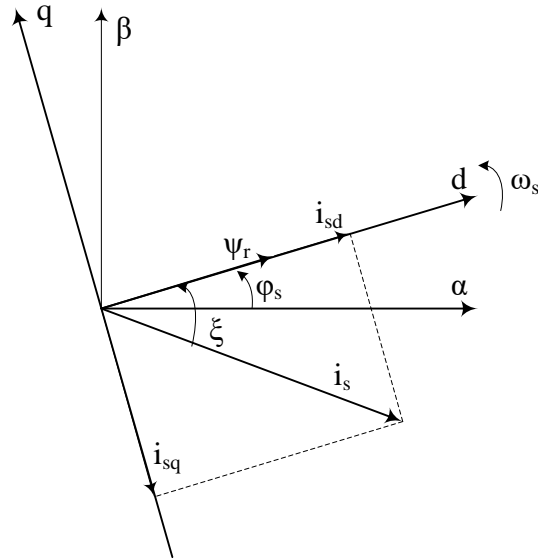


Рисунок 2.33 – Векторы потока ротора и тока статора во вращающейся системе координат

Угол φ_s – это угол между неподвижной системой координат α, β и вращающейся системой координат d, q . В стационарном режиме работы угол ζ между векторами потока ротора $\underline{\Psi}_r$ и тока статора \underline{i}_s не изменяется.

В [32, с. 65] показано, что на базе основных уравнений машины во вращающейся системе координат d, q , можно получить значения потока ротора, абсолютного скольжения ω_r , и момента асинхронного генератора с КЗ ротором в зависимости от проекций вектора тока статора на оси системы координат d, q

$$\Psi'_{rd} = \frac{L_h}{1 + p \cdot T_r} \cdot i_{sd}, \quad (2.44)$$

$$\omega_r = \frac{L_h}{T_r \cdot \Psi'_{rd}} \cdot i_{sq}, \quad (2.45)$$

$$M_g = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \Psi'_{rd} \cdot i_{sq}, \quad (2.46)$$

где k_r – коэффициент связи между статором и ротором со стороны ротора, который можно определить по формуле $k_r = L_h / L'_r$, Ψ'_{rd} – поток ротора приведенный к статору, Вб; L_h – главная индуктивность, Гн; T_r – постоянная ротора, с; z_p – число пар полюсов.

Формула (2.46) демонстрирует, что регулировать электромагнитный момент асинхронного генератора можно, поддерживая постоянный поток ротора и изменяя проекцию тока статора на ось q . Формулы (2.44) и (2.46) обуславливают названия проекций тока статора на оси d и q , i_{sd} – потокообразующая компонента, i_{sq} – моментобразующая компонента.

Так же основные уравнения асинхронной машины позволяют получить зависимости между проекциями тока статора, напряжения статора и электродвижущей силы статора на оси вращающейся системы координат d, q

$$i_{sd} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot (U_{sd} - E_{sd}), \quad E_{sd} = p \cdot k_r \cdot \Psi'_{rd} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq}, \quad (2.47)$$

$$i_{sq} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot (U_{sq} - E_{sq}), \quad E_{sq} = \omega_s \cdot k_r \cdot \Psi'_{rd} + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd}, \quad (2.48)$$

где U_{sd}, U_{sq} – проекции вектора напряжения статора на оси вращающейся системы координат, В; E_{sd}, E_{sq} – проекции вектора электродвижущей силы на оси вращающейся системы координат, В; T_s – постоянная времени статора, с; σ – коэффициент рассеяния, L_s – индуктивность статора, Гн.

Таким образом, приведенные выше формулы (2.44 – 2.48) являются базовыми при формировании математической модели асинхронной машины во вращающейся системе координат [64, 32, с. 65 - 67]. Но для окончательного формирования модели нужно воспользоваться формулами перехода от трёхфазного представления вектора напряжения статора к представлению его в неподвижной системе координат α, β , и далее формулами перехода от неподвижной системы координат α, β к вращающейся системе координат d, q

$$U_{s\alpha} = U_{sa}, \quad (2.49)$$

$$U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{sa} + 2 \cdot U_{sb}), \quad (2.50)$$

$$U_{sd} = U_{s\alpha} \cdot \cos \varphi_s + U_{s\beta} \cdot \sin \varphi_s, \quad (2.51)$$

$$U_{sq} = -U_{s\alpha} \cdot \sin \varphi_s + U_{s\beta} \cdot \cos \varphi_s, \quad (2.52)$$

где U_{sa} , U_{sb} – фазные напряжения статора, В; φ_s – угол между координатными системами.

Учитывая формулы (2.44 – 2.48) и (2.49 – 2.52) и формулу (2.31), можно создать математическую модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат, структурная схема которой изображена на рисунке 2.34 [32, с. 68].

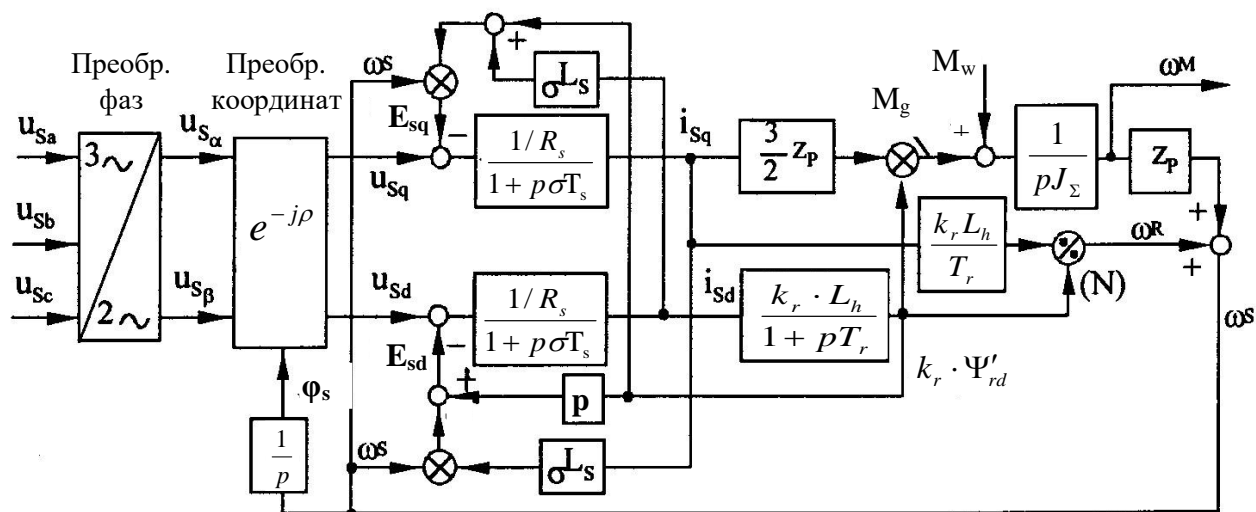


Рисунок 2.34 – Структурная схема математической модели асинхронной машины с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат d, q

Как видно из приведенной структурной схемы, входными параметрами математической модели является напряжение статора и приводной момент ветроколеса. Такие величины, как поток ротора – Ψ_{rd} , проекции тока статора на оси вращающейся системы координат d, q – i_{sd} , i_{sq} , абсолютное скольжение – ω_r , а также электромагнитный момент генератора M_g рассчитываются внутри модели, и могут использоваться при моделировании работы системы регулирования ветроустановки. Математическая модель асинхронной машины в пакете Matlab показана в приложении Б (Рисунок Б.2).

Рисунок 2.34 показывает, что для функционирования математической модели необходимо определить следующие параметры асинхронной машины, а именно: постоянные времени ротора и статора – T_r , T_s , значение главной индуктивности и индуктивности статора – L_h , L_s , значение активного сопротивления статора – R_s и значение коэффициента рассеяния – σ . Определить указанные параметры можно

опираясь на паспортные данные асинхронного генератора [65]. Для расчета были использованы паспортные данные асинхронного генератора с КЗ ротором – АВГ 280М40М2, применяемого на Новоазовской ВЭС, а именно: номинальный ток статора – I_s (А), номинальное напряжение статора – U_{sN} (В), номинальная частота статора – f_{sN} (Гц), номинальная скорость вращения ротора – n_N (об/мин), номинальное значение $\cos\varphi$, приведенные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Каталожные данные генератора АВГ 280М40М2

P_N	U_N	I_N	$\cos\varphi_N$	η_N	n_N	s_N	K_i	$M_{\text{пуск}}$	M_{max}
кВт	В	А	о.е.	о.е.	об/мин	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
110	380	194	0.86	0.94	1513	0.0087	5.6	0.93	2.2

В [66] рекомендована следующая последовательность расчета:

Рассчитывается потокообразующая компонента вектора тока статора в номинальном режиме

$$I_{sdN} \approx \sqrt{2} \cdot I_{sN} \cdot \sqrt{1 - \cos\varphi} . \quad (2.53)$$

Рассчитывается моментобразующая компонента вектора тока статора в номинальном режиме

$$I_{sqN} \approx \sqrt{2 \cdot I_N^2 - I_{sdN}^2} . \quad (2.54)$$

Рассчитывается абсолютное скольжение генератора

$$\omega_{rN} = 2 \cdot \pi \cdot \left(f_N - \frac{z_p \cdot n_N}{60} \right) . \quad (2.55)$$

Рассчитывается постоянная времени ротора

$$T_r = \frac{I_{sqN}}{\omega_{rN} \cdot I_{sdN}} . \quad (2.56)$$

Рассчитывается индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_{\sigma} \approx \left(\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \frac{I_{sdN}}{I_{sqN}} \right) \cdot \frac{U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot I_{sN}}. \quad (2.57)$$

Рассчитывается индуктивное сопротивление главного контура намагничивания

$$X_h \approx \frac{\sqrt{2} \cdot U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot I_{sdN}} - X_{\sigma}. \quad (2.58)$$

Рассчитывается активное сопротивление статора

$$R_s \approx \frac{\omega_{rN}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \cdot \frac{I_{sdN}}{I_{sqN}} \cdot X_h. \quad (2.59)$$

Рассчитывается коэффициент рассеяния

$$\sigma \approx \frac{X_{\sigma}}{X_h}. \quad (2.60)$$

Рассчитывается значение главной индуктивности и индуктивности статора

$$L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f_N}; \quad L_s = \frac{X_h}{(1 - \sigma) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N}. \quad (2.61)$$

Рассчитывается значение постоянной времени статора

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}. \quad (2.62)$$

Результаты расчета по формулам (2.53-2.62) сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры математической модели асинхронного генератора АВГ 280М40М2

T_r , с	T_s , с	L_h , Гн	L_s , Гн	R_s , ом	σ
0,91	0,91	0,009	0,0096	0,01	0,065

Параметры математической модели асинхронной машины с КЗ ротором соответствуют инверсной Г-образной схеме замещения (Рисунок 2.35).

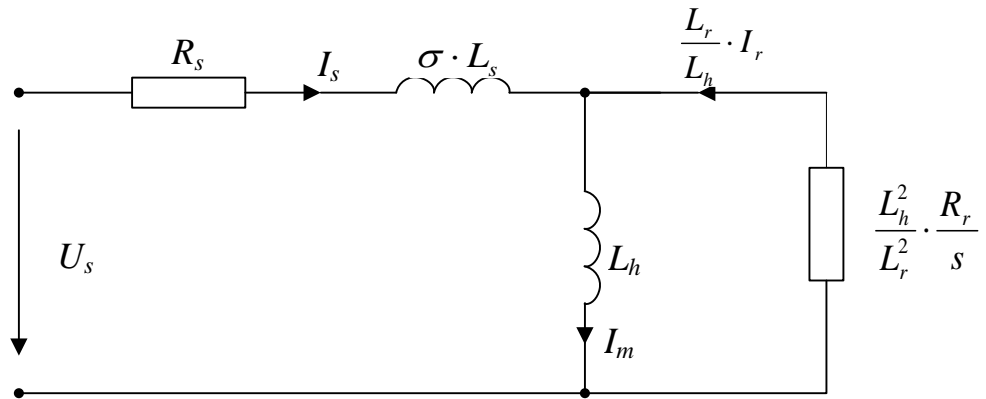


Рисунок 2.35 – Инверсная Г-образная схема замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (I_m – ток намагничивания машины)

2.5.3 Структура системы векторного регулирования момента генератора

Обеспечить регулирование момента генератора можно с помощью системы векторного регулирования [64, с. 25, 32, с. 354], структура которой приведена на рисунке 2.36. Математическая модель этой системы в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунки Б.1, Б.3).

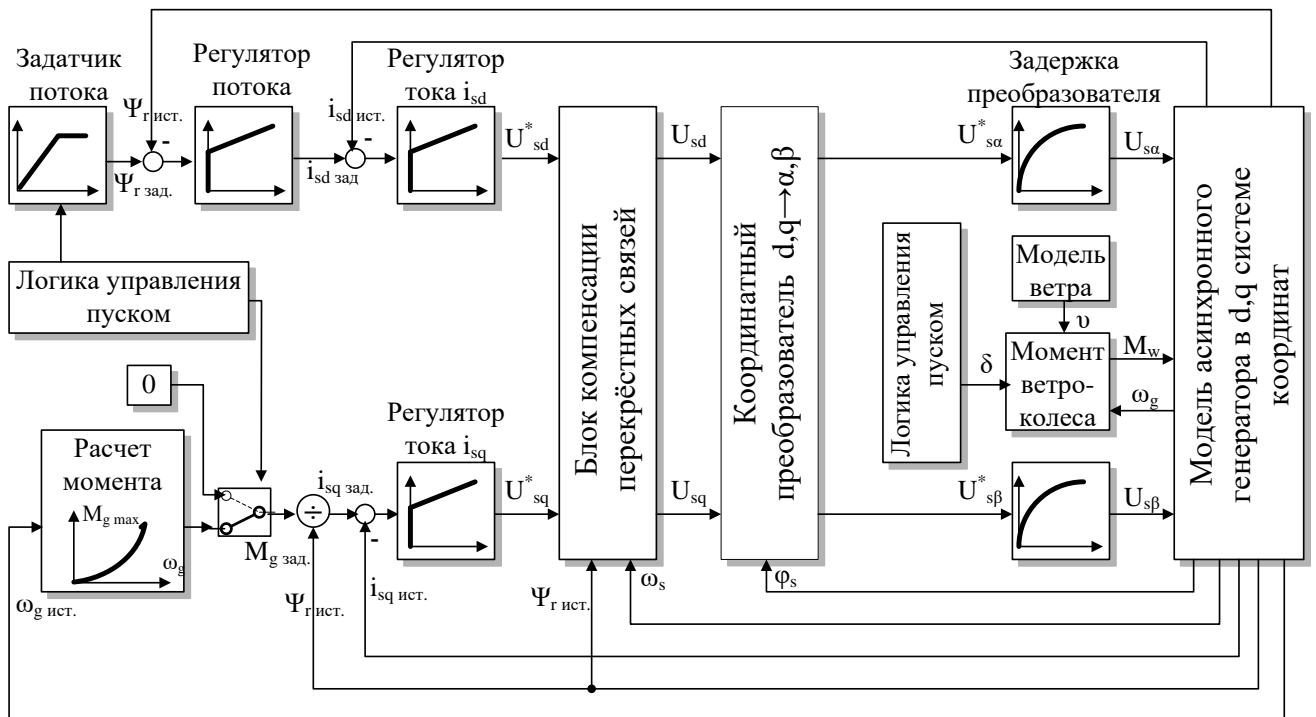


Рисунок 2.36 – Структура системы векторного регулирования момента асинхронного генератора с КЗ ротором

Приведенная система векторного регулирования состоит из нескольких контуров регулирования. Контур регулирования потока позволяет поддерживать постоянным поток ротора Ψ_r за счет влияния регулятора потока на потокообразующую компоненту тока статора – i_{sd} , согласно формуле (2.44). Задание на момент формируется в системе согласно формуле (2.43), что обеспечивает работу на линии максимальной мощности ветроколеса. Регулирование электромагнитного момента генератора обеспечивается влиянием на моментобразующую компоненту тока статора i_{sq} , согласно формуле (2.46). Регулирование проекций тока статора на оси d и q вращающейся системы координат достигается за счет необходимой ориентации в этой системе вектора напряжения статора U_s посредством метода векторной модуляции [66], заложенного в активный выпрямитель (Рисунок 2.23).

Для обеспечения корректной работы в системе используется блок компенсации перекрестных связей. Этот блок обеспечивает компенсацию влияния электродвижущей силы асинхронной машины на переходные процессы в контурах регулирования токов i_{sd} , i_{sq} . Из формул (2.47) и (2.48) следует, что если компенсировать влияние электродвижущей силы, то связь между соответствующими проекциями тока и напряжения на оси вращающейся системы координат будет описываться апериодическим звеном. В [32] показано, что для обеспечения такой компенсации, выходные сигналы блока компенсации перекрестных связей должны формироваться согласно следующим формулам

$$U_{sd} = U_{sd}^* - \frac{\omega_s \cdot \sigma \cdot T_s}{1 + p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot U_{sq}^*, \quad (2.63)$$

$$U_{sq} = U_{sq}^* + \frac{\omega_s \cdot \sigma \cdot T_s}{1 + p \cdot \sigma \cdot T_s} \cdot U_{sd}^* + \omega_s \cdot k_r \cdot \Psi_r. \quad (2.64)$$

Опираясь на приведенные формулы, можно создать структурную схему блока компенсации перекрестных связей, которая приведена на рисунке 2.37.

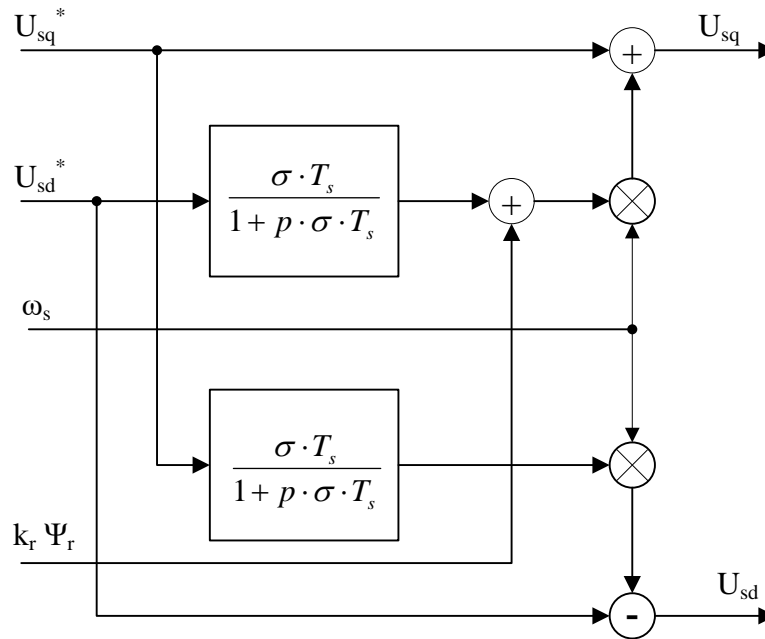


Рисунок 2.37 – Структурная схема блока компенсации перекрестных связей

Поскольку активный выпрямитель со стороны генератора формирует вращающийся вектор напряжения статора на основе его проекций на оси неподвижной системы координат α, β , а задание на формирование вектора напряжения выдается системой регулирования в проекциях на оси вращающейся системы координат d, q , то необходимо осуществлять координатное преобразование.

Переход от координатной системы d, q к координатной системе α, β осуществляется с учетом угла φ_s между координатными системами.

$$U_{s\alpha} = U_{sd} \cdot \cos \varphi_s - U_{sq} \cdot \sin \varphi_s, \quad (2.65)$$

$$U_{s\beta} = U_{sd} \cdot \sin \varphi_s + U_{sq} \cdot \cos \varphi_s. \quad (2.66)$$

При условии компенсации перекрестных связей, упрощенную структурную схему контуров регулирования моментобразующей – i_{sq} и потокообразующей – i_{sd} компонент тока статора, можно представить так, как изображено на рисунке 2.38. Эти два контура регулирования являются идентичными. Объект регулирования в контурах состоит из апериодического звена, которое символизирует задержку преобразователя при отработке управляющего сигнала и

апериодического звена, которое описывает связь между напряжением и током статора согласно уравнениям статора, формулы (2.47) и (2.48). Для регулирования тока используется пропорционально-интегральный регулятор.

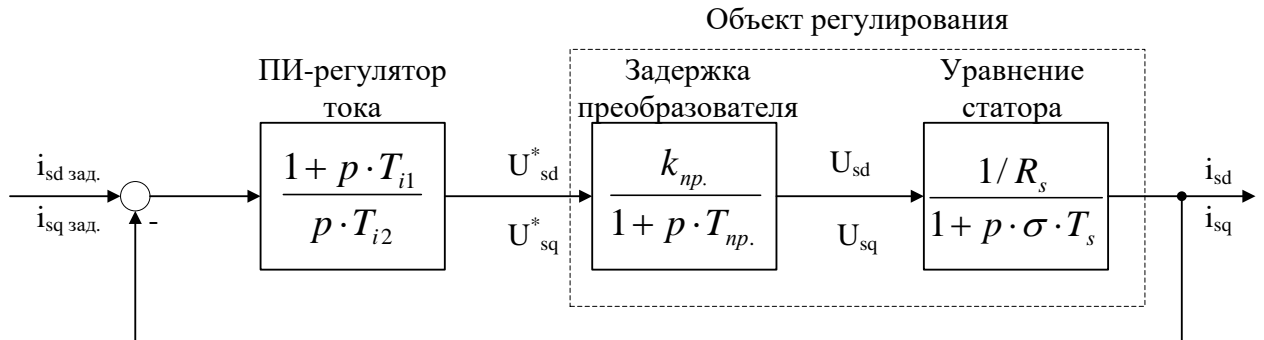


Рисунок 2.38 – Структурная схема контуров регулирования моментобразующей – i_{sq} и потокообразующей – i_{sd} компонент тока статора

Коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора тока можно определить согласно принципу модульного оптимума [67] по формулам

$$T_{i1} = \sigma \cdot T_s; T_{i2} = \frac{2 \cdot T_{np.} \cdot k_{np.}}{R_s}. \quad (2.67)$$

Постоянную времени апериодического звена $T_{np.}$, которая описывает задержку преобразователя при обработке управляющего сигнала, можно принять равной 0,001 с с учетом быстродействия современных микропроцессорных устройств, которые реализуют функционирование системы регулирования.

При выборе коэффициентов регулятора тока согласно формуле (2.67) передаточная функция замкнутого контура регулирования тока приобретает вид

$$G_i(p) = \frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_{np.} + p^2 \cdot 2 \cdot T_{np.}^2} \approx \frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_{np.}}. \quad (2.68)$$

По причине малого значения постоянной времени $T_{np.}$ можно пренебречь слагаемым в знаменателе передаточной функции, который имеет вторую степень оператора Лапласа. После такого упрощения передаточная функция контура тока упрощается до апериодического звена с постоянной времени $2T_{np.}$.

Для расчета коэффициентов регулятора потока нужно определить объект регулирования в контуре потока. Объект состоит из упрощенной передаточной функции замкнутого контура регулирования потокообразующей компоненты тока статора – i_{sd} , и апериодического звена, которое описывает взаимосвязь компоненты тока – i_{sd} с потоком ротора согласно формуле (2.44). Структурная схема контура регулирования потока ротора приведена на рисунке 2.39.

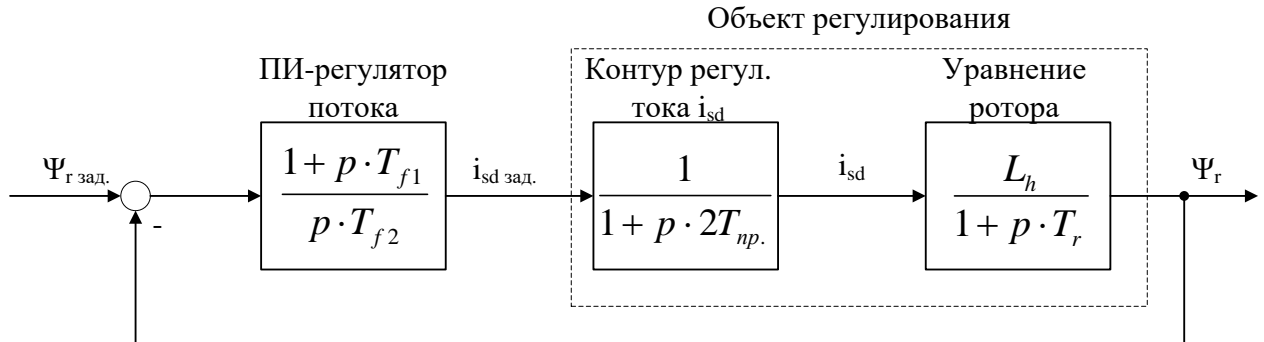


Рисунок 2.39 – Структурная схема контура регулирования потока ротора

Коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора потока можно рассчитать согласно принципу модульного оптимума по следующим формулам

$$T_{f1} = T_r ; T_{f2} = 4 \cdot T_{np.} \cdot L_h . \quad (2.69)$$

Нужно отметить, что при запуске системы регулирования контур регулирования потока должен вступать в действие первым, обеспечивая постоянный номинальный поток во время регулирования момента генератора.

2.5.4 Моделирование работы системы управления ветроустановкой в режиме частичной нагрузки

Для оценки эффективности работы системы регулирования в режиме частичной нагрузки следует проверить, насколько она справляется со своим основным заданием, а именно поддержкой максимального коэффициента мощности ветроколеса в динамических режимах, т.е. при изменении скорости ветра. Для этого следует протестировать работу системы регулирования (Рисунок

2.36) с использованием модели ветра, модели ветроколеса, а также контура регулирования момента генератора. При этом следует помнить, что в режиме частичной нагрузки контур регулирования скорости ветроколеса бездействует (Рисунок 2.24), т. е. устанавливается фиксированное нулевое значение pitch-угла ($\Delta\delta=0$).

Для проведения тестирования воспользуемся уравнением вращательного движения для ветроколеса

$$M_w - M_g^* = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_w}{dt}, \quad (2.70)$$

где M_g^* – момент генератора, приведённый к валу ветроколеса, н·м.

Если уравнение умножить на угловую скорость вращения ветроколеса ω_w и проинтегрировать обе части, то можно получить выражение

$$\omega_w = \sqrt{\frac{2}{J_\Sigma} \cdot \int_0^t (P_w - P_g) \cdot dt}. \quad (2.71)$$

При этом, мощность ветроколеса – P_w можно рассчитать с учетом выражения (2.12) по формуле

$$P_{g \max} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{pw}(\lambda) \cdot R^2 \cdot v^3. \quad (2.72)$$

Задание на максимальную мощность генератора формируется с учетом выражения (2.36) по формуле

$$P_{g \text{ зад.}}^{\max} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{pw \max} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{v_N}{\omega_{wN}} \right)^3 \cdot \omega_w^3 \quad (2.73)$$

Реальное значение мощности генератора следует оценивать с учетом быстродействия контура регулирования момента генератора (Рисунок 2.38) и формулы (2.68), которая позволяет представить в упрощенном виде контур момента генератора как апериодическое звено.

Тогда динамику поведения реальной мощности генератора упрощенно можно оценить по формуле

$$P_g = \frac{1}{1 + 2 \cdot T_{np} \cdot p} \cdot P_{g \text{ зад}}^{\max} \quad (2.74)$$

Приведенные выше формулы позволяют составить структурную схему модели для оценки эффективности работы системы регулирования ветроустановки в режиме частичной нагрузки [68] (Рисунок 2.40).

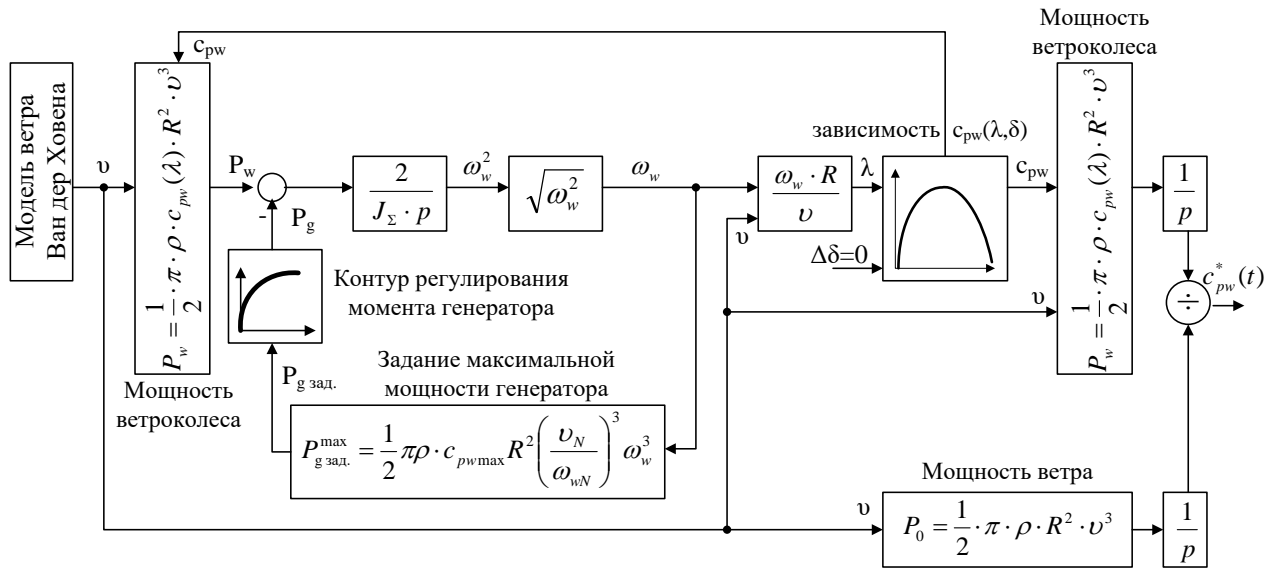


Рисунок 2.40 – Структурная схема модели для оценки эффективности работы системы регулирования ветроустановки в режиме частичной нагрузки

Для проведения оценки эффективности системы регулирования ветроустановки была использована рассмотренная ранее модель ветра Ван дер Ховена (Рисунок 2.3) и нейромодель зависимости $c_{pw}(\lambda, \delta)$, приведенная на рисунке 2.14. При проведении исследования критерием эффективности работы системы регулирования было выбрано значение результирующего коэффициента мощности ветроколеса в течении 10-минутного интервала времени, которое рассчитывалось по формуле

$$c_{pw}^* = \frac{\int_0^{600} P_w dt}{\int_0^{600} P_0 dt} = \frac{\int_0^{600} c_{pw}(\lambda) \cdot v^3 dt}{\int_0^{600} v^3 dt} \quad (2.75)$$

Необходимо отметить, что приведенная на рисунке 2.40 структурная схема модели является универсальной, т.е. может быть применена для любого ветрогенератора, в котором используется принцип регулирования электромагнитного момента посредством активного выпрямителя.

При проведении моделирования использовались характеристики $c_{pw}(\lambda)$ профиля NASA-4412 для расчетных быстроходностей $\lambda_d=5$, $\lambda_d=7$, которые приведены на рисунке 2.10. Момент инерции ветроколеса рассчитывался с учетом формулы (2.40) при весе лопасти $m_{л}=12000$ кг и радиусе ветроколеса $R=55$ м, что соответствует параметрам ветроустановки Vestas 112.

Моделирование согласно схеме, приведенной на рисунке 2.40, проводилось в программном пакете Matlab (приложение Б, Рисунок Б.20) для трех значений низкочастотной компоненты скорости ветра v_s – 4 м/с, 7 м/с, 10 м/с. В процессе моделирования оценивалось поведение следующих величин: скорость ветра, скорость вращения ветроколеса, значение текущей быстроходности ветроколеса и значение результирующего коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw}^* . Поведение скорости ветра (сплошная линия) и скорости вращения ветроколеса (пунктирная линия) в процессе моделирования при значении низкочастотной компоненты скорости ветра $v_s = 10$ м/с для ветроколеса с расчетной быстроходностью $\lambda_d=7$ приведено на рисунке 2.41.

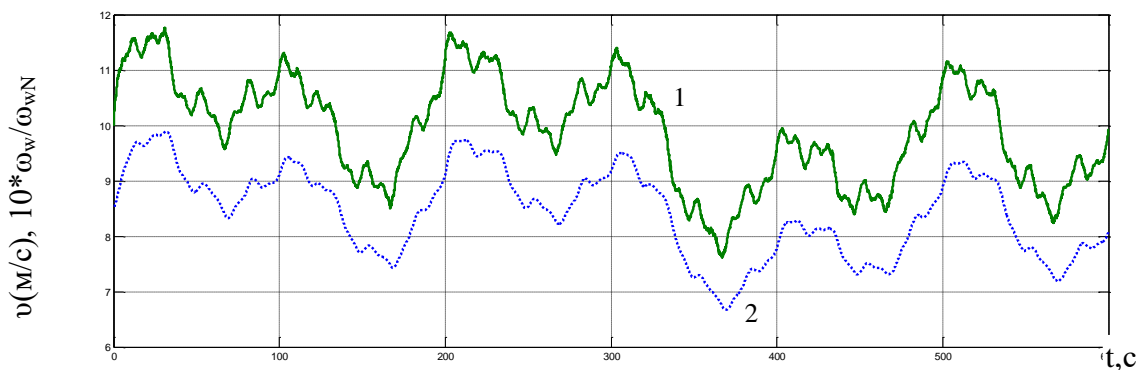


Рисунок 2.41 – Поведение скорости ветра – 1 и скорости вращения ветроколеса – 2 при моделировании в режиме частичной нагрузки ($\lambda_d=7$, $v_s = 10$ м/с)

Рисунок показывает, что скорость вращения генератора в режиме частичной нагрузки в основном повторяет поведение скорости ветра, однако, при слишком

быстрых изменениях скорости ветра, скорость генератора не успевает так быстро меняться из-за большого значения момента инерции ветроколеса. Это приводит к некоторым незначительным отклонениям текущей быстроходности ветроколеса от ее расчетного значения λ_d (Рисунок 2.42).

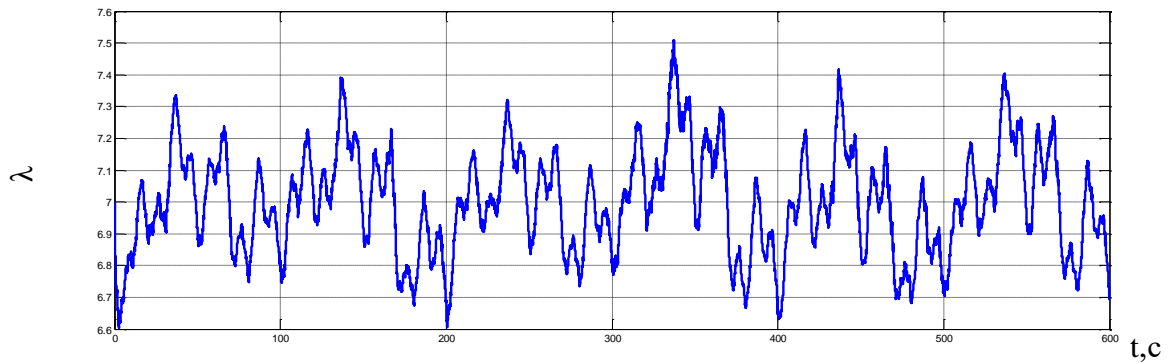


Рисунок 2.42 – Поведение быстроходности ветроколеса при моделировании в режиме частичной нагрузки ($\lambda_d=7, v_s = 10$ м/с)

Вследствие отклонения быстроходности от расчетного значения λ_d происходит незначительное отклонение коэффициента мощности ветроколеса от его максимального значения – $c_{pw\ max}$ (Рисунок 2.43).

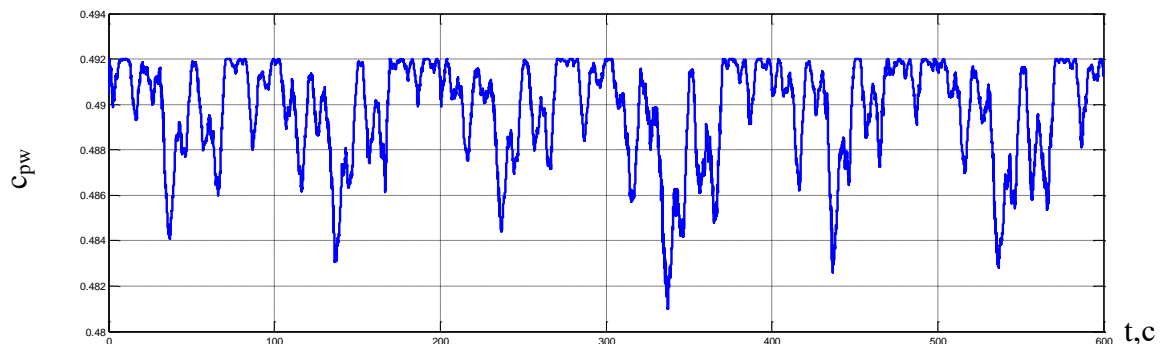


Рисунок 2.43 – Поведение коэффициента мощности ветроколеса при моделировании в режиме частичной нагрузки ($\lambda_d=7, v_s = 10$ м/с)

Результаты оценки эффективности работы системы регулирования ветроустановки в режиме частичной нагрузки, полученные при моделировании с расчетными быстроходностями ветроколеса $\lambda_d=5, \lambda_d=7$ и разными значениями низкочастотной компоненты скорости ветра в модели Ван дер Ховена $v_s = 4$ м/с, 7 м/с, 10 м/с приводятся в таблице 2.4

Таблица 2.4 – Результаты оценки эффективности работы системы регулирования в режиме частичной нагрузки с использованием модели ветра Ван дер Ховена

	$\lambda_d=5$ ($c_{pw\ max}=0,482$)			$\lambda_d=7$ ($c_{pw\ max}=0,492$)		
v_s м/с	4	7	10	4	7	10
c_{pw}^*	0,481	0,481	0,481	0,490	0,490	0,489
$\Delta\lambda$	4,96÷5,06	4,89÷5,15	4,80÷5,26	6,9÷7,1	6,76÷7,26	6,6÷7,5

Приведенные в таблице 2.4 результаты показывают, что исследуемая система регулирования ветроустановки в режиме частичной нагрузки позволяет поддерживать коэффициент мощности ветроколеса очень близко к его максимальному значению (отклонение от максимума на 0,1 % при $\lambda_d=5$, и 0,2 % при $\lambda_d=7$ в случае $v_s=10$ м/с). Моделирование работы системы регулирования с использованием технических параметров ветроустановки USW 56-100 Новоазовской ВЭС с асинхронным генератором АВГ 280М40М2 дает аналогичные результаты. Таким образом, показатели работы системы регулирования в режиме частичной нагрузки практически не зависят от типа генератора, она в любом случае выполняет свою основную задачу и обеспечивает высокую энергоэффективность при работе ветроустановки.

Необходимо отметить, что моделирование согласно структурной схеме на рисунке 2.40 проводилось с целым рядом упрощений, а именно: использовалась модель ветра без учета эффекта затенения башни, контур регулирования момента генератора был упрощен до апериодического звена, моделирование проводилось без учета режима пуска ветрогенератора и перехода от пускового режима к режиму частичной нагрузки.

Поэтому для проведения более детализированной оценки работы системы регулирования в режиме частичной нагрузки, без обозначенных выше упрощений, было проведено еще одно моделирование с использованием модели ветра, учитывающей эффект затенения башни (приложение Б, Рисунки Б.8-Б.10), (Рисунки 2.20 и 2.22), полной модели генератора и системы регулирования

момента (Рисунок 2.36) и с учетом работы системы в пусковом режиме (Рисунки 2.29 и 2.30).

Результаты моделирования приведены на рисунках 2.44 и 2.45. Рисунок показывает, что кривая активной мощности генератора огибает кривую максимальной мощности ветроколеса. Колебания мощности ветроколеса, связанные с эффектом затенения башни, мало отображаются на активной мощности ветрогенератора благодаря большому моменту инерции ветроколеса и его демпфирующей роли. При работе в этом режиме целесообразно оценить реальный результирующий коэффициент мощности ветроколеса в условиях снижения скорости ветра в секторе затенения. Такое снижение приводит к отклонению угла притекания от оптимального значения для лопасти, которая проходит третий сектор, что в свою очередь приводит к отклонению быстроходности от расчетного значения и снижению коэффициента мощности лопасти в секторе затенения (Рисунки 2.7 и 2.10). Количественную оценку значения результирующего коэффициента мощности ветроколеса в условиях эффекта затенения башни можно провести согласно выражению

$$c_{pw}^* = \frac{\int_0^t (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}) \cdot dt}{\int_0^t P_0 \cdot dt} = \frac{\frac{1}{3} \cdot \int_0^t (c_{pw1}(\lambda_1) \cdot v_1^3 + c_{pw2}(\lambda_2) \cdot v_2^3 + c_{pw3}(\lambda_3) \cdot v_3^3) \cdot dt}{\int_0^t v_1^3 \cdot dt}, \quad (2.76)$$

где P_{w1} , P_{w2} , P_{w3} – мощности лопастей, Вт; c_{pw1} , c_{pw2} , c_{pw3} – коэффициенты мощности каждой из лопастей, v_1 , v_2 , v_3 – скорости ветра для каждой лопастей, м/с; P_0 – теоретическая мощность ветра, Вт, λ_1 , λ_2 , λ_3 – быстроходности лопастей.

Расчеты согласно выражению (2.76), проведенные для 10-и разных вариантов поведения скорости ветра в течение минутного интервала времени, показали снижение коэффициента мощности ветроколеса вследствие эффекта затенения башни до уровня приблизительно 0,45 т.е. на 0,03 по сравнению с расчётным значением $c_{pwmax}=0,48$ при $\lambda_d=5$. Этот факт должен учитываться при оценках энергоэффективности ветроустановки.

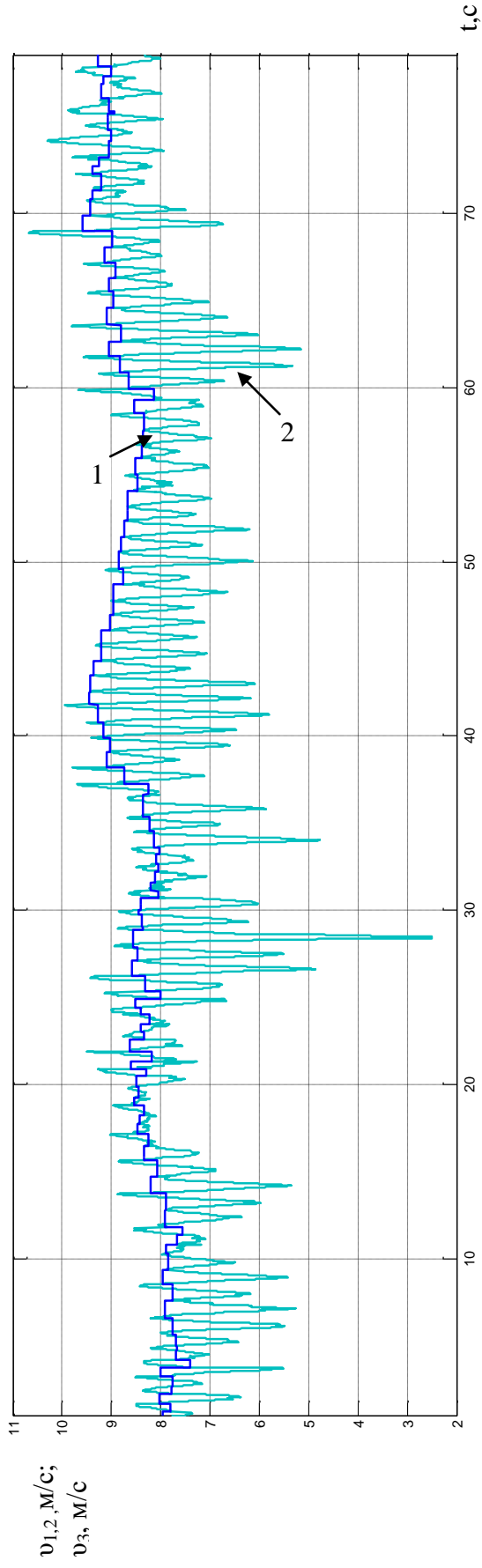


Рисунок 2.44 – Поведение скорости ветра в верхних секторах – $v_{1,2}$ (кривая 1) и в секторе затенения – v_3 (кривая 2)

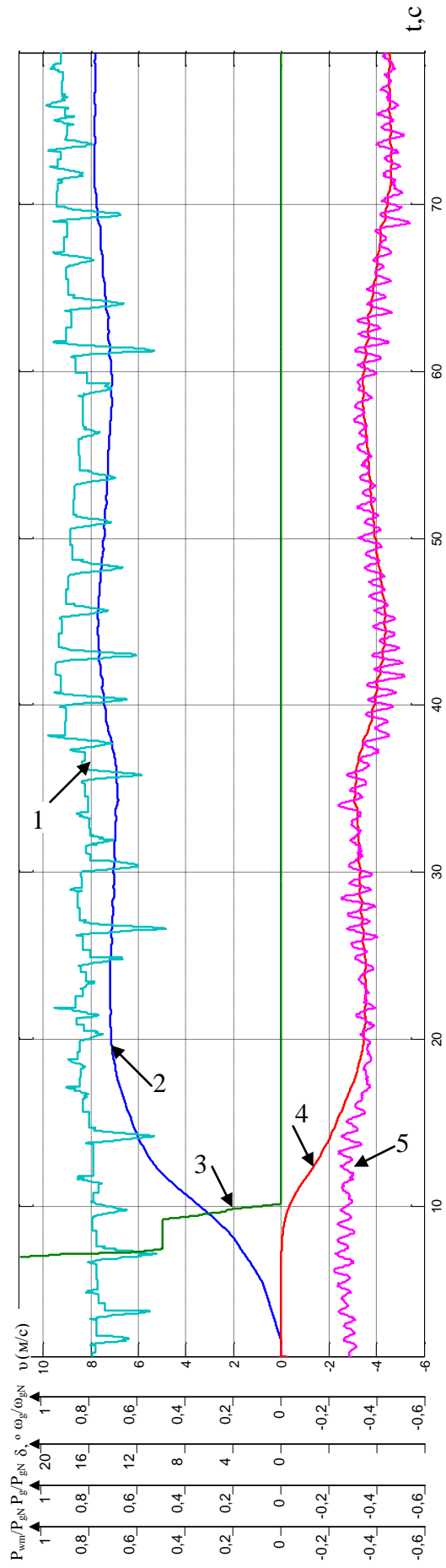


Рисунок 2.45 – Поведение скорости ветра одной из лопастей (1), скорости генератора (2), pitch-угла лопасти (3), активной мощности генератора (4) и максим. мощности ветроколеса (5) при пуске и в режиме частичной нагрузки

2.6 Совершенствование работы системы управления ветроустановкой в режиме ограничения мощности генератора

2.6.1 Основные задачи и особенности работы системы управления ветроустановкой в режиме ограничения мощности, оптимизация контура скорости вращения ветроколеса

Режим ограничения мощности, безусловно, является наиболее сложным режимом при работе системы регулирования, поскольку в этом режиме, в дополнение к уже работающему контуру регулирования момента генератора, включается в работу, бездействовавший в режиме частичной нагрузки, контур регулирования скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.24). Включение второго контура в работу происходит в случае превышения скоростью ветра определенного (номинального) значения, формула (2.41).

В этом случае задачей обоих контуров является поддержание заданных (номинальных) значений момента генератора и скорости вращения генератора, что в итоге приводит к поддержанию активной мощности генератора на уровне заданного (номинального) значения в условиях колебаний скорости ветра. При дальнейшем нарастании скорости ветра выше определенного (номинального) значения система регулирования должна обеспечить стабилизацию, т. е. ограничение мощности генератора на заданном уровне (Рисунок 2.25).

Поскольку принципы работы и особенности настройки контура регулирования момента были описаны в предыдущем разделе, в этом разделе основное внимание будет уделено принципам оптимизации контура регулирования скорости вращения ветроколеса.

Для определения параметров регулятора скорости нужно определить передаточные функции всех структурных элементов, входящих в состав объекта регулирования (Рисунок 2.24). Таковыми являются: контур регулирования установочного угла лопасти, модель ветроколеса и интегратор, связывающий разность моментов ветроколеса и генератора и скорость его вращения. Как уже

упоминалось ранее, современные мощные ветроустановки, для изменения pitch-угла, используют позиционный электропривод, система регулирования которого представляет собой каскадную трех контурную систему с тремя контурами: тока, скорости и положения, построенную по принципу подчиненного регулирования. Тогда контур регулирования установочного угла лопасти в упрощенном варианте может быть представлен в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 2.46 [5, с. 439]. Математическая модель этого контура в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунок Б.18).

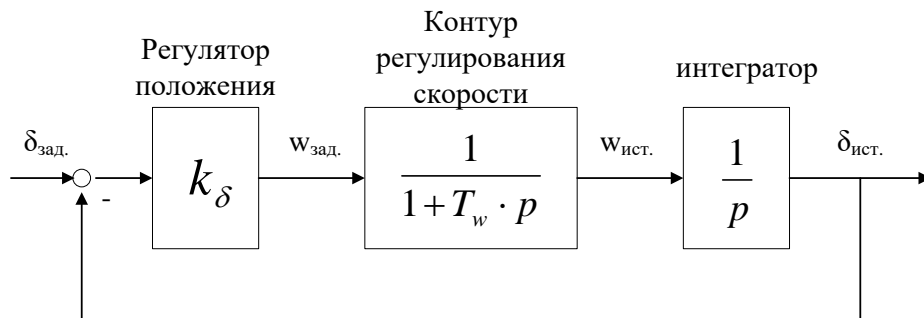


Рисунок 2.46 – Контур регулирования установочного угла лопасти

При выборе коэффициента пропорционального регулятора положения $k_\delta = 1/(4 \cdot T_w)$ в контуре обеспечивается отсутствие перерегулирования за счет равенства коэффициента демпфирования передаточной функции контура – $d=1$. Тогда окончательный вид передаточной функции замкнутого контура регулирования установочного угла лопасти в полном и упрощенном виде определяется следующей формулой

$$G_\delta(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_w \cdot p + 4 \cdot T_w^2 \cdot p^2} \approx \frac{1}{1 + 4 \cdot T_w \cdot p}. \quad (2.77)$$

При этом быстродействие контура регулирования установочного угла будет определяться значением постоянной времени T_w в контуре регулирования скорости, которую для современных электроприводов можно принять равной приблизительно 20 мс [5, с. 439].

За контуром регулирования установочного угла следует модель ветроколеса, которая определяет взаимосвязь между pitch-углом и моментом ветроколеса. С учетом рисунков 2.12 и 2.15, а также формул (2.12) и (2.30) эту взаимосвязь можно описать с учетом нелинейного коэффициента передачи ветроколеса k_{wl} и линейного коэффициента, который объединяет все, не зависящие от установочного угла величины (Рисунок 2.47).

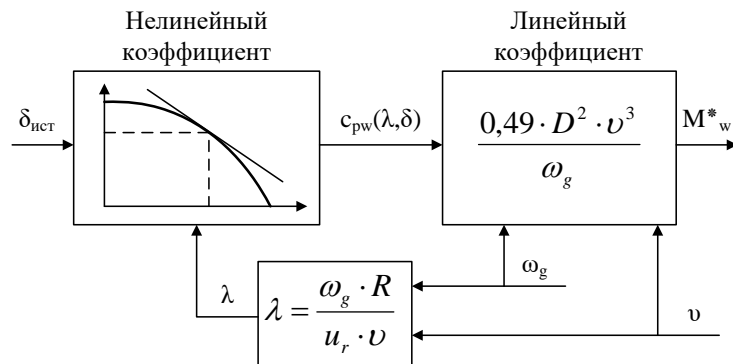


Рисунок 2.47 – Структурная схема блока формирования момента ветроколеса

Таким образом, контур регулирования скорости вращения ветроколеса будет иметь вид [69], изображенный на рисунке 2.48.

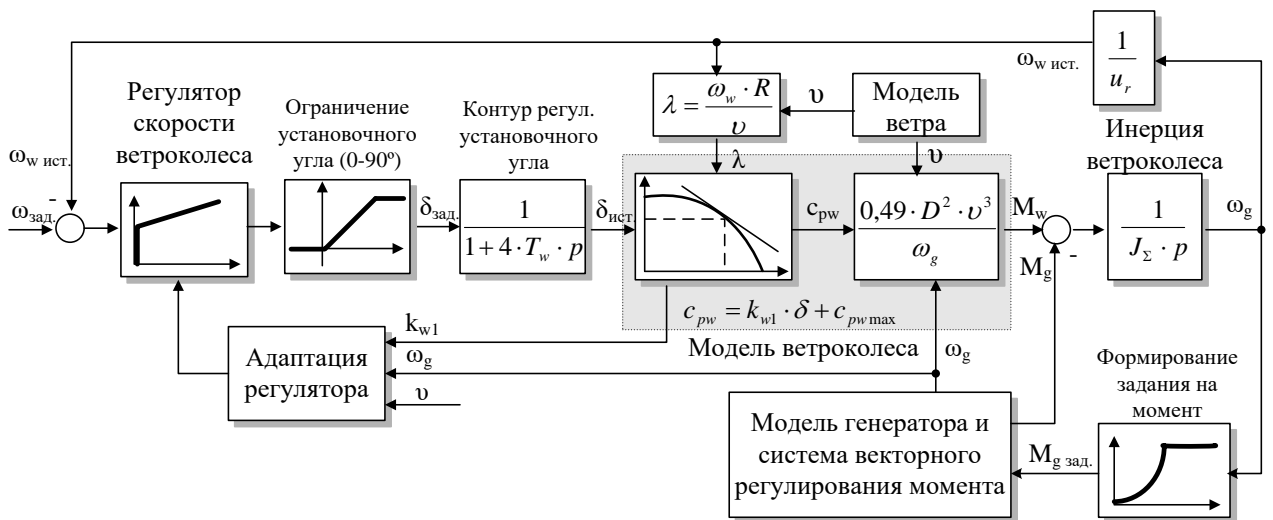


Рисунок 2.48 – Контур регулирования скорости вращения ветроколеса

Согласно рисунку 2.48, объект регулирования в приведенном контуре состоит из апериодического звена, которое приближённо описывает динамические свойства контура регулирования установочного угла лопасти, нелинейного и линейного коэффициентов, которые присутствуют в модели

ветроколеса, а также интегратора, который устанавливает связь между моментами и скоростью вращения генератора.

Для определения коэффициентов регулятора нужно установить, какие параметры объекта регулирования будут неизменными, а какие будут изменяться в процессе регулирования. Все переменные параметры находятся в модели ветроколеса, такими являются: скорость ветра, скорость вращения генератора и переменный коэффициент k_{w1} , который описывает нелинейную связь между установочным углом - δ и коэффициентом c_{pw} согласно формуле

$$c_{pw} = k_{w1} \cdot \delta + c_{pw\max}, \quad k_{w1} = \frac{dc_{pw}}{d\delta}. \quad (2.78)$$

Подставим значение коэффициента мощности из формулы (2.78) в формулу момента ветроколеса (2.12), тогда получим

$$M_w = 0.49 \cdot D^2 \cdot \left(\frac{v^3}{\omega_g} \cdot k_{w1} \right) \cdot \delta + c_{pw\max} \cdot 0.49 \cdot D^2 \cdot \left(\frac{v^3}{\omega_g} \right). \quad (2.79)$$

На основе формулы (2.79) формирование момента ветроколеса можно представить в соответствии со структурой, изображенной на рисунке 2.49, на котором можно выделить возмущающее воздействие, обусловленное ветром.

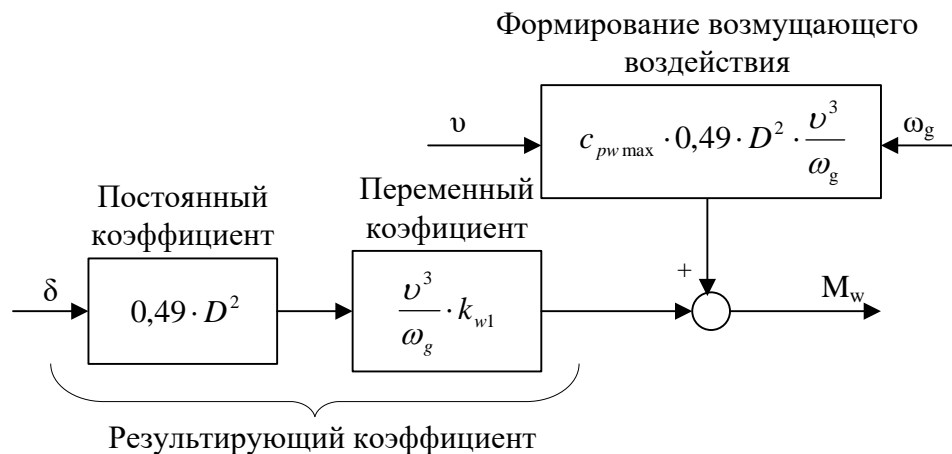


Рисунок 2.49 – Формирование момента ветроколеса с выделением возмущающего воздействия

Рисунок демонстрирует, что значение постоянного – k_{wconst} и переменного – k_{wvar} коэффициентов, которые устанавливают связь между установочным углом и моментом ветроколеса, можно определить по формулам

$$k_{wconst} = 0,49 \cdot D^2, \quad k_{wvar} = \frac{v^3}{\omega_g} \cdot k_{w1}. \quad (2.80)$$

Значение результирующего коэффициента – k_{ws} можно определить по формуле

$$k_{ws} = 0,49 \cdot D^2 \cdot \frac{v^3}{\omega_g} \cdot k_{w1}. \quad (2.81)$$

Для контура, изображенного на рисунке 2.48 целесообразно выбрать ПИ-регулятор скорости с адаптацией к изменяющимся параметрам объекта регулирования. Передаточная функция ПИ-регулятора скорости вращения ветроколеса в непрерывном виде соответствует формуле

$$G_{wR}(p) = \frac{T_{wR} \cdot p + 1}{T_{w0} \cdot p}. \quad (2.82)$$

Регулятор скорости ветроколеса следует настраивать из соображений минимизации влияния возмущающего сигнала [70], которым является куб скорости ветра (Рисунок 2.49). Для определения коэффициентов регулятора, представим передаточную функцию контура регулирования скорости ветроколеса по отношению к возмущающему воздействию [69, с. 22]

$$G_v(p) = \frac{T_{w0} \cdot p \cdot (T_{ws} \cdot p + 1)}{J_{\Sigma} \cdot T_{w0} \cdot T_{ws} \cdot p^3 + J_{\Sigma} \cdot T_{w0} \cdot p^2 + T_{wR} \cdot k_{ws} \cdot p + k_{ws}}, \quad (2.83)$$

где $T_{ws} = 4 \cdot T_w$ – постоянная времени в объекте регулирования, обусловленная инерционностью контура регулирования установочного угла лопасти.

Для минимизации влияния возмущающего сигнала на скорость ветроколеса применим принцип модульного оптимума к полиному в формуле (2.83) за

исключением дифференцирующей части – $T_{w0}p$, присутствие которой обеспечивает более высокий порядок астатизма контура регулирования. Таким образом, получим значение коэффициентов регулятора скорости – T_{wR} и T_{w0}

$$T_{wR} = 4,25 \cdot T_{ws}, \quad T_{w0} = \frac{8,5 \cdot T_{ws}^2 \cdot k_{ws}}{J_{\Sigma}}. \quad (2.84)$$

Учитывая то, что коэффициент k_{ws} имеет постоянную и переменную часть, согласно формуле (2.81), в формуле расчета коэффициента регулятора – T_{w0} целесообразно также сгруппировать постоянные и переменные величины отдельно для того, чтобы обеспечить возможность адаптации регулятора к изменениям параметров объекта регулирования. Такая группировка представлена в следующей формуле

$$T_{w0} = \left(\frac{8,5 \cdot T_{ws}^2 \cdot 0,49 \cdot D^2}{J_{\Sigma}} \right) \cdot \left(\frac{\nu^3 \cdot k_{w1}}{\omega_g} \right) = T_{w0}^* \cdot \left(\frac{\nu^3 \cdot k_{w1}}{\omega_g} \right), \quad (2.85)$$

где коэффициент T_{w0}^* – является группировкой всех постоянных величин.

Дискретная форма ПИ-регулятора скорости ветроколеса будет иметь вид

$$G_{wR}(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (2.86)$$

Из формулы (2.86) может быть получено разностное уравнение, которое используется для реализации дискретного ПИ-регулятора в микропроцессорной системе регулирования [71]

$$\delta_{зад}[k] = \delta_{зад}[k-1] + b_0 \cdot \Delta\omega_w[k] + b_1 \cdot \Delta\omega_w[k-1], \quad (2.87)$$

где $\Delta\omega_w$ – ошибка регулирования скорости вращения ветроколеса на указанном шаге регулирования, $\delta_{зад}$ – выходной сигнал регулятора, т.е. заданный pitch-угол.

При этом значение коэффициентов дискретного регулятора, с учётом выражения (2.85), можно определить по следующим формулам

$$b_0 = \frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 + \frac{T}{2 \cdot T_{wR}} \right) \cdot \frac{\omega_g}{v^3 \cdot k_{wl}}, \quad (2.88)$$

$$b_1 = -\frac{T_{wR}}{T_{w0}^*} \cdot \left(1 - \frac{T}{2 \cdot T_{wR}} \right) \cdot \frac{\omega_g}{v^3 \cdot k_{wl}}, \quad (2.89)$$

где T – период дискретности при работе регулятора.

Структурная схема дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса приведена на рисунке 2.50.

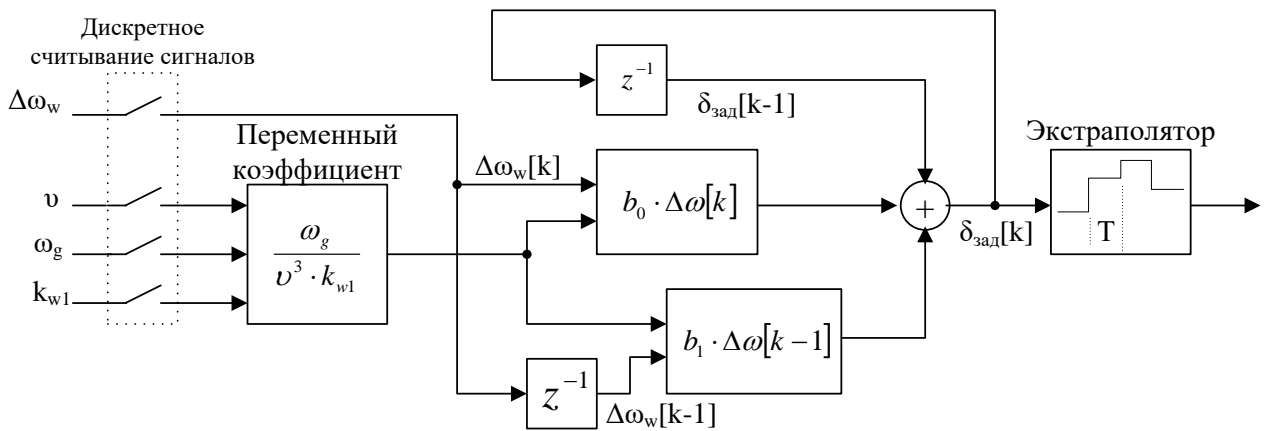


Рисунок 2.50 – Структурная схема дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса

Приведенная структурная схема показывает, что значения коэффициентов разностного уравнения b_0 и b_1 , определяемые по формулам (2.88) и (2.89), будут постоянно корректироваться в зависимости от значения скорости ветра, скорости генератора и нелинейного коэффициента k_{wl} . Постоянный контроль за указанными величинами дает возможность регулятору подстраиваться под изменение параметров объекта регулирования, т.е. делает регулятор адаптивным [72].

Нужно отметить, что при переходе к дискретному регулятору необходимо также учитывать передаточную функцию экстраполятора

$$H_0(p) = \frac{1}{1 + T/2 \cdot p}. \quad (2.90)$$

Дополнительная инерционность в объекте регулирования, обусловленная экстраполятором, должна учитываться при расчете коэффициента регулятора T_{w0} , формула (2.84), т.е. значение параметра объекта регулирования T_{ws} должно быть увеличено на половину периода дискретности согласно формуле

$$T_{ws}^* = 4 \cdot T_w + \frac{T}{2}. \quad (2.91)$$

Как было показано выше, для корректной работы регулятора в процессе регулирования нужно постоянно контролировать переменные величины: скорость ветра, скорость генератора, и переменный коэффициент k_{wl} . И если для определения скорости ветра и скорости генератора можно воспользоваться соответствующими датчиками, то переменный коэффициент k_{wl} можно определять, пользуясь нейро-моделью зависимости коэффициента мощности ветроколеса – c_{pw} от быстроходности и pitch-угла (Рисунок 2.14). Процесс определения k_{wl} , можно продемонстрировать в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 2.51 (приложение Б, Рисунок Б.16).

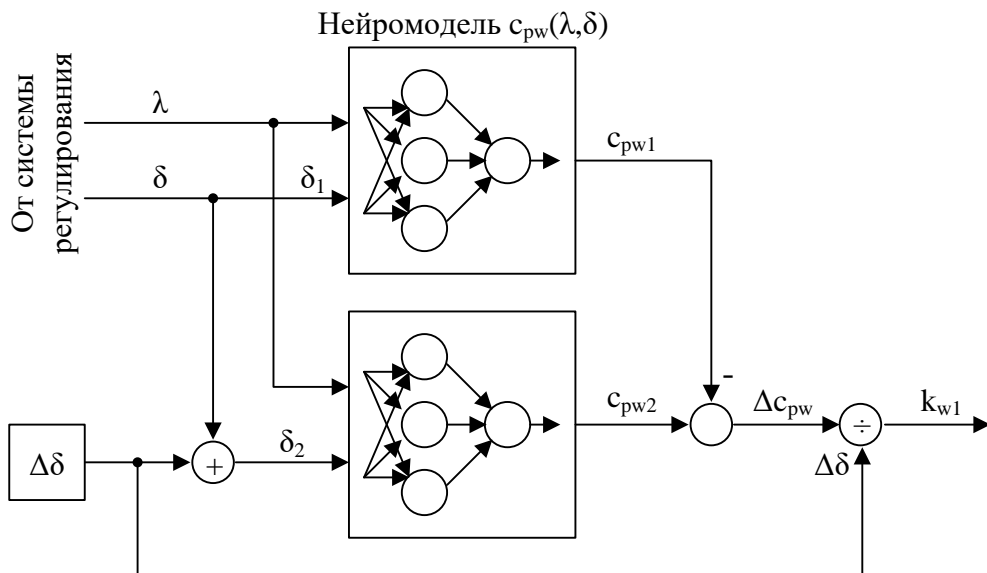


Рисунок 2.51 – Структурная схема для определения коэффициента k_{wl}

Как показывает рисунок 2.51, определение переменного коэффициента k_{wl} происходит согласно формуле (2.78) с заменой дифференциалов на малые приращения – $\Delta\delta$ и Δc_{pw} без существенной потери точности.

Результаты моделирования процесса регулирования скорости ветроколеса в программном пакете Matlab для контура, изображенного на рисунке 2.48 с дискретным регулятором, изображенным на рисунке 2.50, продемонстрированы на рисунке 2.52. Моделирование проводилось следующим образом, осуществлялся плавный разгон ветроколеса до номинальной скорости, по сигналу задатчика интенсивности, за счет аэродинамического момента при постоянной скорости ветра ($v=14$ м/с) и нулевом моменте генератора в течение 8-и секунд. На 10-ой секунде скачкообразно прикладывался номинальный момент генератора, а на 12-ой секунде имитировались колебания скорости ветра по синусоидальному закону в диапазоне от 13 до 15 м/с с частотой 1 Гц.

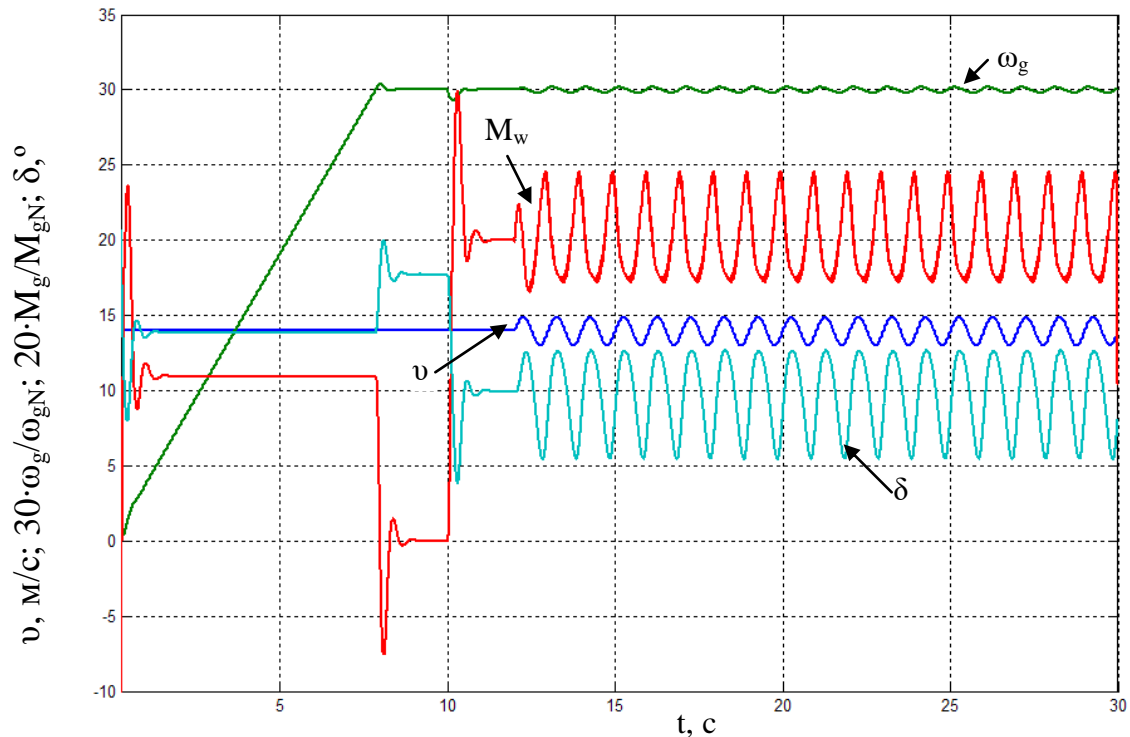


Рисунок 2.52 – Моделирование процесса регулирования скорости вращения ветроколеса при синусоидальных изменениях скорости ветра

При моделировании использовались параметры: постоянная времени объекта регулирования – $T_{ws}=60$ мс, суммарный момент инерции системы – $J_{\Sigma}=19$ кг·м², период дискретности регулятора – $T=2$ мс, диаметр ветроколеса – $D=17$ м.

Результаты моделирования показывают, что приведенный контур справляется с задачей регулирования скорости ветроколеса посредством изменения установочного угла лопасти. Отклонение скорости ветроколеса от номинальной, обусловленные заданными колебаниями скорости ветра, не превышают 1 рад/с, что составляет менее 1%. Однако в процессе регулирования наблюдаются существенные колебания аэродинамического момента ветроколеса, которые можно объяснить присутствием довольно большой постоянной времени T_{ws} в объекте регулирования.

2.6.2 Совершенствование параметров функционирования контура скорости вращения ветроколеса с учетом эффекта затенения башни.

Однако работа контура скорости вращения ветроколеса может существенно усложниться, если учесть тот факт, что в условиях эффекта затенения башни лопасти поочередно оказываются в секторах с разной скоростью ветра (Рисунки 2.16 и 2.22). При этом скорость ветра в третьем секторе существенно снижается, это означает, что лопасть, которая находится в третьем секторе работает при быстроходностях, существенно больших, чем лопасти, которые двигаются в 1-ом и 2-ом секторах. Если показать зависимость коэффициента мощности ветроколеса с расчетной быстроходностью $\lambda_d=5$ от pitch-угла для разных фиксированных быстроходностей (Рисунок 2.53) становится понятным, что лопасть в третьем секторе работает на характеристиках $c_{pw}(\text{pitch})$ со значительно большей чувствительностью к изменениям pitch-угла чем лопасти в 1-ом и 2-ом секторах.

Исходя из вышесказанного, очевидно, что лопасть в третьем секторе оказывается в совсем других точках объемной поверхности $c_{pw}(\lambda, \text{pitch})$ (Рисунок 2.11). Тогда структура системы регулирования скорости ветроколеса, приведенная на рисунке 2.48, должна быть изменена с учетом того факта, что лопасти работают при разных скоростях ветра и с разным характером нелинейных зависимостей $c_{pw}(\text{pitch})$.

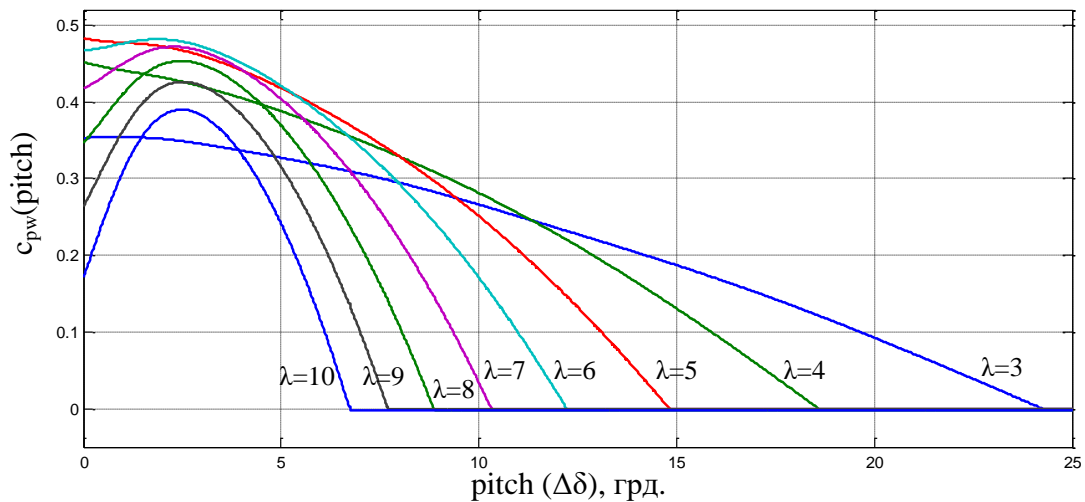


Рисунок 2.53 – Семейство зависимостей коэффициента мощности ветроколеса от pitch-угла $c_{pw}(\text{pitch})$ для разных значений быстроходности $\lambda=3\div 10$

В таком случае каждая лопасть должна иметь свой регулятор скорости вращения ветроколеса, который будет учитывать ветровые условия, при которых работает лопасть. Т.е. система регулирования скорости ветроколеса должна быть разделена на три канала. В таком случае можно говорить о раздельном формировании заданного значения pitch-угла каждым из трёх регуляторов. Вариант такой системы регулирования приведен на рисунке 2.54, а её Matlab-модель в приложении Б (Рисунок Б.11).

Рисунок 2.54 показывает, что в регуляторах, по сравнению с рисунком 2.48, для адаптации к изменениям в объекте регулирования, дополнительно используются значения долевых коэффициентов k_{d1} , k_{d2} , k_{d3} . Эти коэффициенты показывают, во сколько раз доля приводного момента, который создает каждая лопасть, отличается от трети суммарного момента ветроколеса. Так как именно треть общего момента создает каждая лопасть при равномерном распределении моментов между лопастями, в случае одинакового значения скорости ветра для всех лопастей. Тогда можно утверждать, что долевые коэффициенты, таким образом, корректируют управляющие сигналы регуляторов, чтобы добиться равного значения моментов каждой из лопастей в условиях неравномерной скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса.

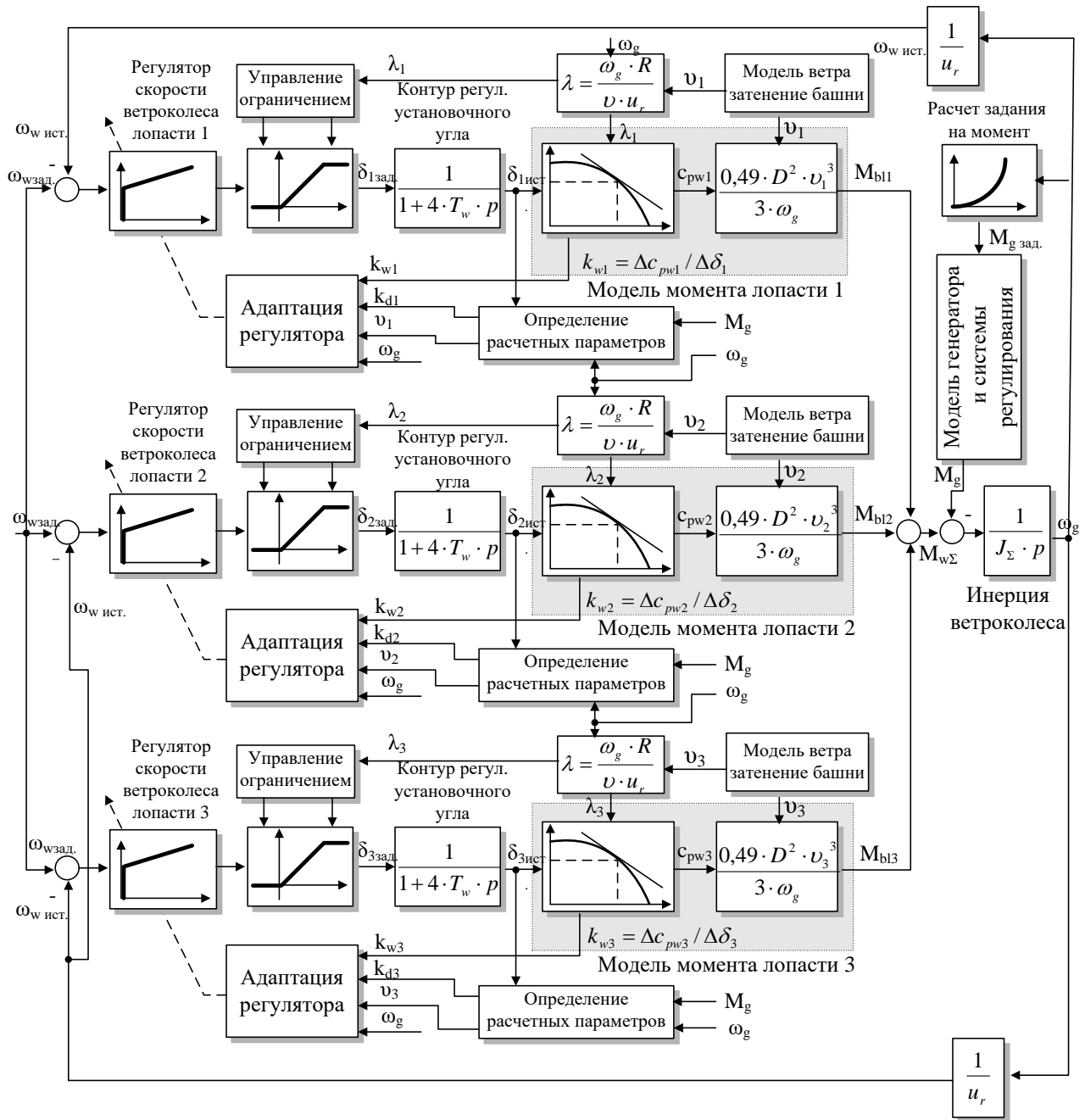


Рисунок 2.54 – Трёхканальная система регулирования скорости вращения ветроколеса с отдельным формированием заданного pitch-угла каждой лопасти

Долевые коэффициенты могут быть рассчитаны по следующим формулам

$$k_{d1} = \frac{M_{bl1}}{\frac{1}{3} \cdot M_{w\Sigma}} = \frac{c_{pw1} \cdot v_1^3}{\frac{1}{3} \cdot (c_{pw1} \cdot v_1^3 + c_{pw2} \cdot v_2^3 + c_{pw3} \cdot v_3^3)}, \quad (2.92)$$

$$k_{d2} = \frac{M_{bl2}}{\frac{1}{3} \cdot M_{w\Sigma}} = \frac{c_{pw2} \cdot v_2^3}{\frac{1}{3} \cdot (c_{pw1} \cdot v_1^3 + c_{pw2} \cdot v_2^3 + c_{pw3} \cdot v_3^3)}, \quad (2.93)$$

$$k_{d3} = \frac{M_{bl3}}{\frac{1}{3} \cdot M_{w\Sigma}} = \frac{c_{pw3} \cdot v_3^3}{\frac{1}{3} \cdot (c_{pw1} \cdot v_1^3 + c_{pw2} \cdot v_2^3 + c_{pw3} \cdot v_3^3)}, \quad (2.94)$$

где M_{bl1} , M_{bl2} , M_{bl3} – моменты, созданные каждой из лопастей, Н·м; c_{pw1} , c_{pw2} , c_{pw3} – коэффициенты мощности для каждой из лопастей, v_1 , v_2 , v_3 – скорости ветра для секторов 1, 2 и 3, м/с; $M_{w\Sigma}$ – суммарный момент ветроколеса, Н·м.

Кроме введения долевых коэффициентов, в каждом из каналов использовано зависимое от скорости ограничение pitch-угла. Такая необходимость продиктована разным допустимым диапазоном изменений pitch-угла для каждой из быстроходностей (Рисунок 2.53). Рисунок показывает, что для быстроходностей от 6 до 10 при pitch-углах приблизительно 2,5 градуса характеристики имеют точки перегиба, в которых значение коэффициентов k_{w1} , k_{w2} , k_{w3} , будет равняться нулю, что является недопустимым для регулирования, так как нуждается в бесконечно большом коэффициенте усиления регулятора. Задача звена ограничения благодаря нижней границе не допускать попадания pitch-угла в эту зону. Значение верхней границы звена ограничения продиктовано необходимостью работы ветроколеса с положительным значением коэффициента мощности. Таким образом, структура регулятора скорости вращения ветроколеса, изображённая на рисунке 2.50, должна быть скорректирована к виду, приведённому на рисунке 2.55.

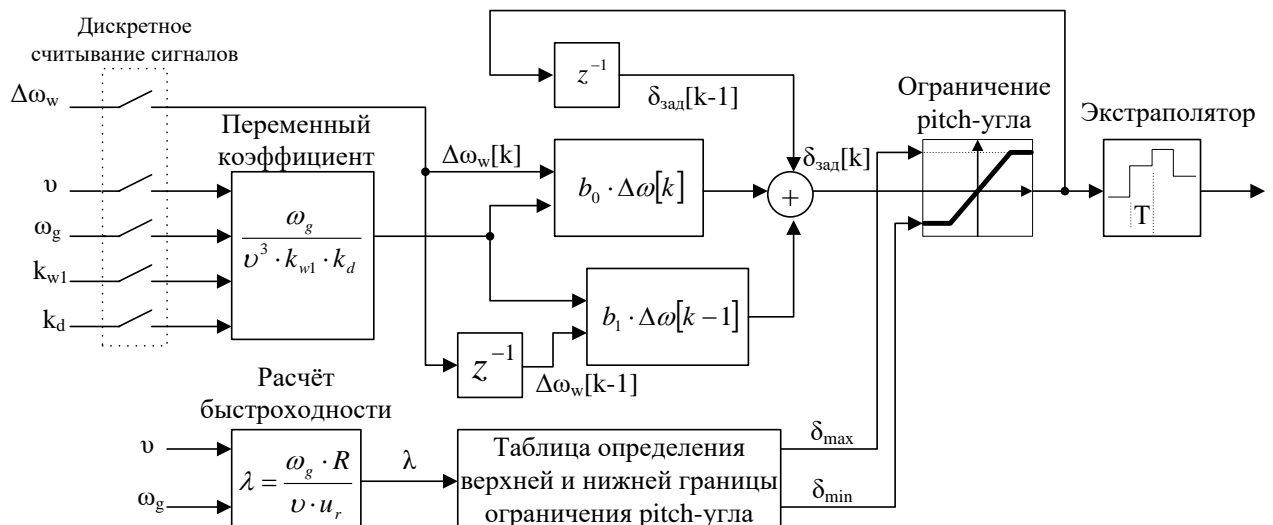


Рисунок 2.55 – Измененная структура регулятора скорости вращения ветроколеса с учетом ограничения и долевого коэффициента k_d

Математическая модель регулятора, изображенного на рисунке 2.55, в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунок Б.15).

Зависимость верхней и нижней границы ограничения pitch-угла от быстроходности соответствует характеристикам, которые изображены на рисунке 2.53. Эта зависимость приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Зависимость верхней и нижней границы ограничения pitch-угла от быстроходности

быстроходность λ	3	4	5	6	7	8	9	10
верхняя граница δ_{max} (градусы)	24,6°	18,6°	14,8°	12,2°	10,32°	8,9°	7,7°	6,7°
нижняя граница δ_{min} (градусы)	1,5°	0°	0°	2°	2,5°	2,6°	2,6°	2,6°

Очевидно, что трехканальная система регулирования скорости вращения ветроколеса, которая приведена на рисунке 2.54, может функционировать только при условии индивидуального определения скорости ветра для каждой из лопастей. Без сомнения, для этого может быть использован принцип расчета скорости ветра на основе нейросети, которая на основе значений pitch-угла и момента ветроколеса позволяет получить значение скорости ветра (Рисунок 2.20). Но при разделении системы регулирования на три независимых канала каждая лопасть в процессе регулирования имеет свой pitch-угол и создает свой момент, который нужно выделить из суммарного момента ветроколеса, что значительно усложняет расчеты. Для определения суммарного момента ветроколеса можно воспользоваться формулой косвенного определения, которая учитывает электромагнитный момент и угловое ускорение генератора

$$M_{w\Sigma} = M_g + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \Psi'_{rd} \cdot i_{sq} + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_g}{dt}. \quad (2.95)$$

Необходимые для расчета значения потока ротора – Ψ'_{rd} и моментобразующей компоненты тока статора – i_{sq} доступны в системе

векторного регулирования момента генератора (Рисунок 2.36). Для выделения момента каждой лопасти из суммарного момента ветроколеса может быть использована следующая методика. Отправной точкой расчета является положение лопастей, изображенное на рисунке 2.16. Теоретически можно считать, что в этом положении эффект затенения башни еще не проявляется, т.е. скорость ветра для всех лопастей одинаковая. Поскольку в систему регулирования заложены долевые коэффициенты, формулы (2.92-2.94), регуляторы будут стремиться образовать одинаковые моменты для каждой лопасти. Одинаковые моменты лопастей при одинаковой скорости ветра возможны только при одинаковых значениях pitch-углов лопастей. Итак, при этом положении лопастей pitch-углы должны иметь практически одинаковые, или очень близкие значения. Это утверждение подтверждается результатами моделирования работы трёхканальной системы, изображенной на рисунке 2.54, при значениях скорости ветра, которые задаются имитатором (Рисунок 2.22). Поведение pitch-углов трёх лопастей в процессе регулирования приведено на рисунке 2.56, который демонстрирует, что при показанном на рисунке 2.16 положении лопастей, разность между pitch-углами не превышает 1° и происходит перегиб значения pitch-углов, т.е. меняется знак производной приведенных характеристик. Тогда, зафиксировать этот момент можно, ориентируясь по поведению производной pitch-углов, которая равняется нулю в точке перегиба.

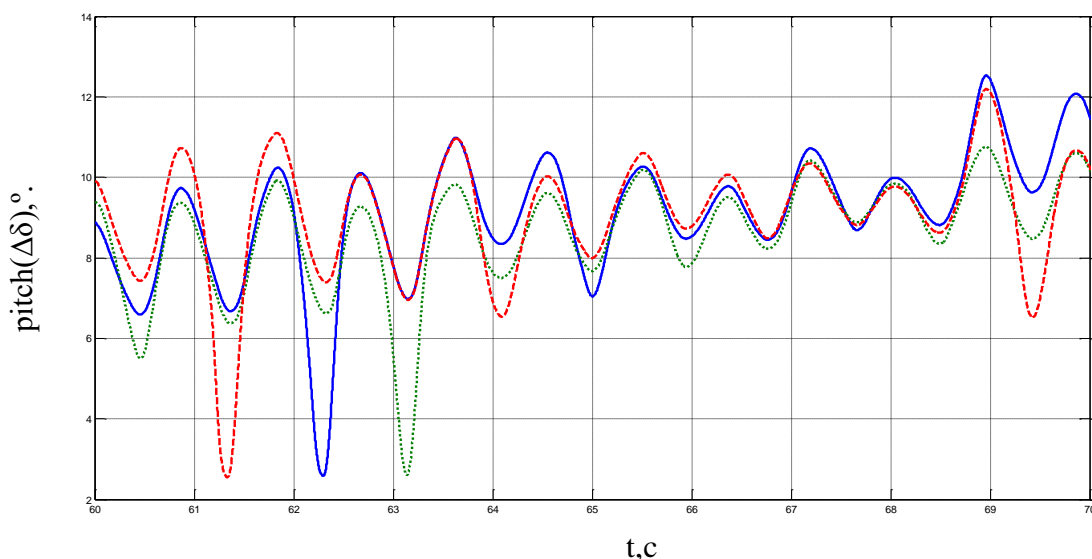


Рисунок 2.56 – Поведение pitch-углов лопастей при регулировании скорости

Принцип дальнейшего расчета демонстрирует рисунок 2.57. Среднее значение pitch-угла и суммарное значение момента ветроколеса в точке перегиба, рассчитанное по формуле (2.95), фиксируются экстраполятором и поступают на вход нейросети, показанной на рисунке 2.19. Нейросеть позволяет получить значение скорости ветра в 1-ом и 2-ом секторах, которое теоретически остаётся неизменным в течение следующих 120° поворота.

На основе расчетной скорости ветра, и скорости вращения генератора определяется текущая быстроходность лопастей в 1-ом и 2-ом секторах, которая вместе со значением pitch-углов лопастей в этих секторах позволяет получить значения текущих коэффициентов мощности этих лопастей благодаря использованию нейросети, приведенной на рисунке 2.14. Далее по приведенным на рисунке 2.57 формулам определяются моменты лопастей в секторах вращения, долевые коэффициенты лопастей, а также скорость ветра в 3-ем секторе затенения. Математическая модель показанного на рисунке 2.57 метода расчета скорости ветра приведена в приложении Б (Рисунки Б.12-Б.14).

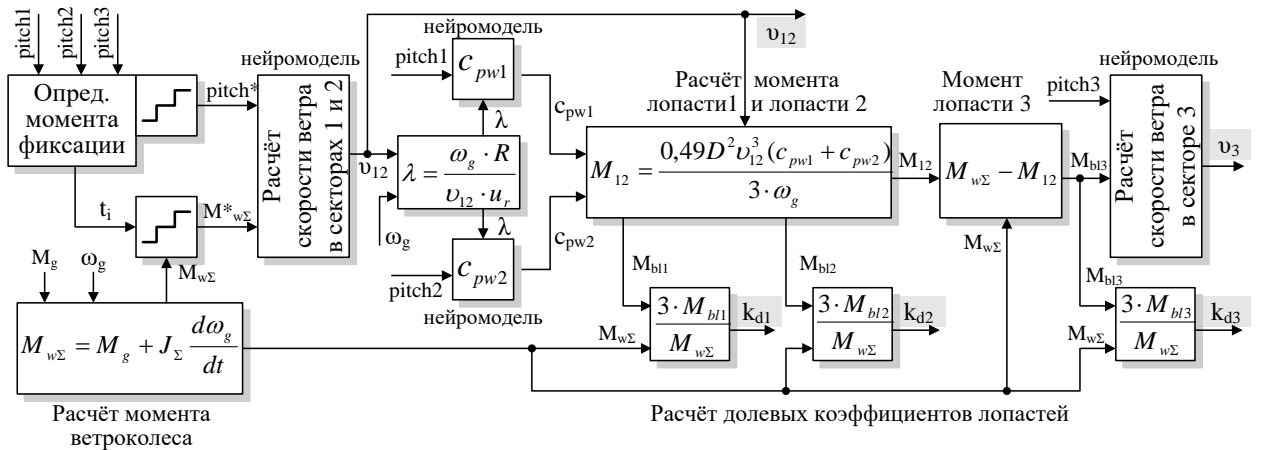


Рисунок 2.57 – Структурная схема расчетного метода определения скорости ветра в секторах вращения и долевых коэффициентов лопастей

Таким образом, приведенная на рисунке 2.57 схема позволяет расчётным путем определить все величины, необходимые для работы контура регулирования скорости вращения ветроколеса. Результаты моделирования работы приведенной

системы в пакете Matlab, с точки зрения точности расчета скорости ветра в секторах вращения ветроколеса, показаны на рисунке 2.58.

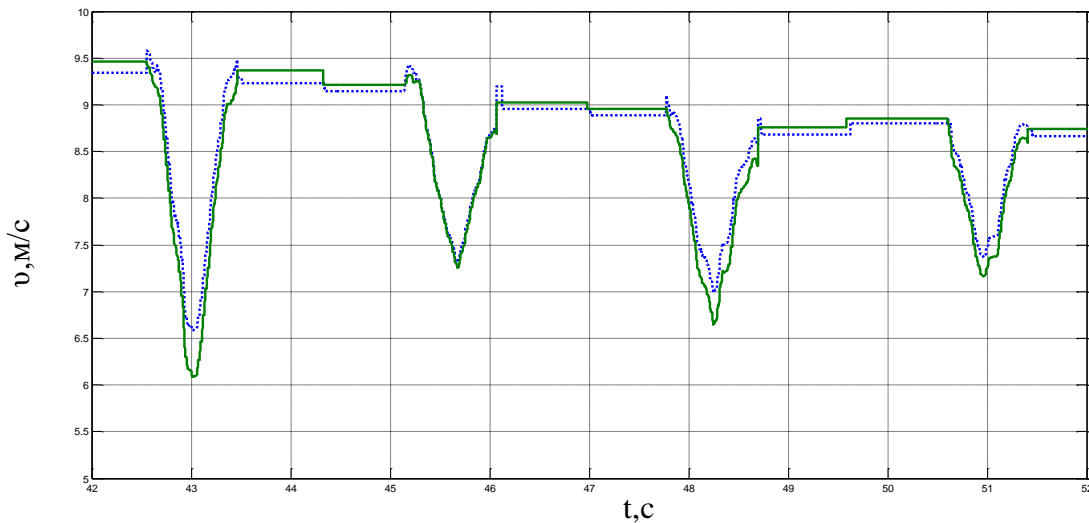


Рисунок 2.58 – Сравнение значения имитированной скорости ветра (непрерывная линия) с ее расчётным значением (пунктир) для одной лопасти

Приведенные на рисунке 2.58 графики показывают, что рассчитанное значение скорости ветра с небольшой погрешностью практически повторяет значение, которое выдает имитатор ветра, что свидетельствует о корректной работе схемы расчетного метода определения скорости ветра (Рисунок 2.57).

Необходимо отметить, что оценку качества работы контура регулирования скорости вращения ветроколеса нужно проводить не только с точки зрения качества поддержания скорости на уровне заданной, а и с точки зрения минимизации колебаний аксиальной силы, которая действуют на лопасти во время процесса регулирования, и приводят к вибрациям ветроколеса, а также к вибрациям всей конструкции ветроустановки. Таким образом, минимизация колебаний аксиальной силы также является важной задачей системы регулирования. Оценка аксиальной силы для каждой из лопастей проводилась на основе векторной диаграммы, которая приведена на рисунке 2.59. Эта диаграмма демонстрирует связь тангенциальной и аксиальной компонент приводной силы, действующей на лопасть, с аэродинамическими углами.

Нужно также отметить, что расчёт аксиальной силы проводился для фрагмента лопасти, который находится на расстоянии действующего радиуса от центра вращения ($0,72 \cdot R$) и имеет длину $0,1 \cdot R$. Учитывая то, что в установках с pitch-системой регулирования сила сопротивления F_w в несколько десятков раз меньше чем приводная сила F_A , аксиальную силу можно приближенно рассчитать по следующей формуле на основе момента лопасти M_{bl} и угла притекания β без существенной потери точности

$$F_{ax} \approx \frac{F_t}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{0,15 \cdot M_{bl}}{0,72 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \beta} \quad (2.96)$$

Коэффициент 0,15 в формуле объясняется тем, что вышеназванный фрагмент лопасти создает момент, равный приблизительно 15% от общего момента лопасти [1, с. 96]. Математическая модель для расчета аксиальной силы в программном пакете Matlab показана в приложении Б (Рисунки Б.16, Б.17).

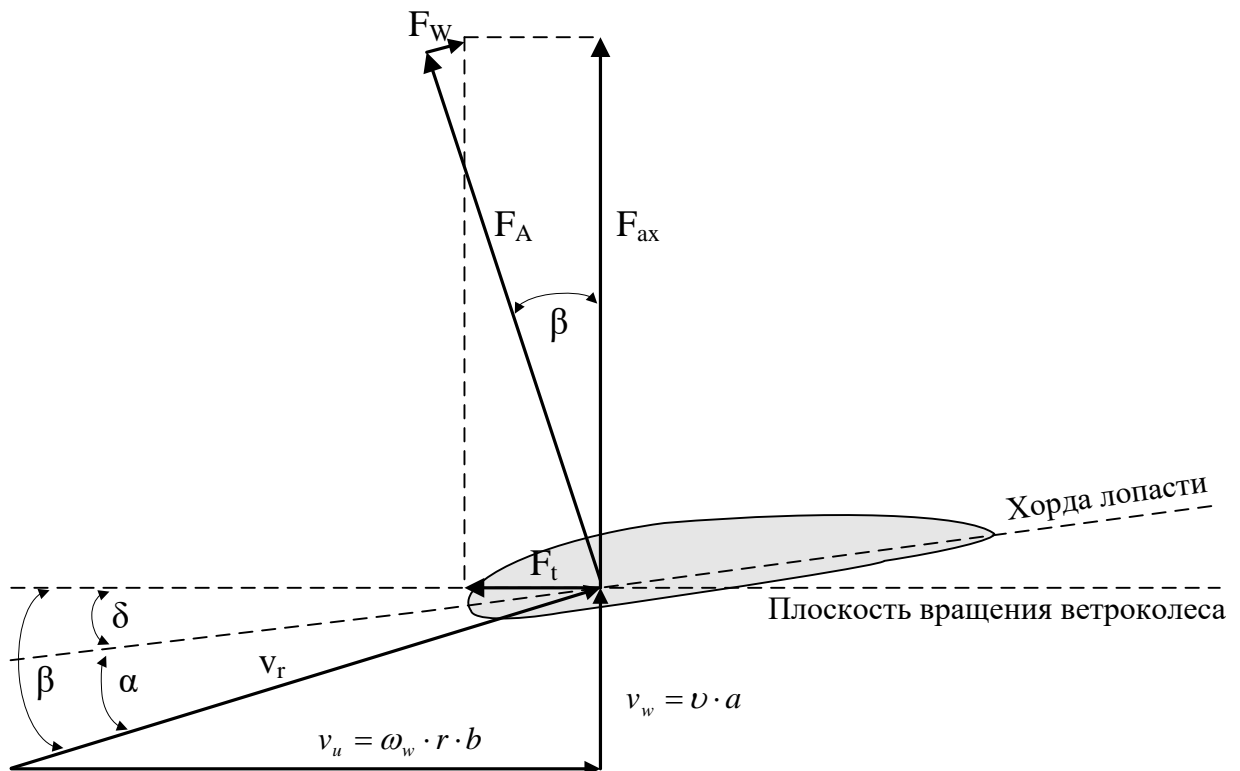


Рисунок 2.59 – Векторная диаграмма формирования тангенциальной F_t и аксиальной F_{ax} компонент силы, действующей на фрагмент лопасти при набегании потока

Значение угла притекания β может быть рассчитано на основе значения быстроходности λ для фрагмента лопасти на действующем радиусе, а также коэффициента Лагранжа K по следующим по формулам [19, с. 39]

$$a^* = \frac{K}{(1-K)^2} \cdot \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2 / (1-K)^2}, \quad (2.97)$$

$$b^* = \frac{K}{(1-K)} \cdot \frac{1}{1 + \lambda^2 / (1-K)^2}, \quad (2.98)$$

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1 - a^*}{1 + b^*} \right), \quad (2.99)$$

где величины a^* и b^* имеют связь с коэффициентами торможения ветрового потока a и b по следующим формулам $a = 1 - a^*$, $b = 1 + b^*$.

Работа трехканального контура регулирования скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.54) была промоделирована в программном пакете Matlab для двух вариантов. Первый вариант, когда система регулирования не учитывает провалы скорости ветра в третьем секторе затенения и для всех трех контуров регулирования использует одинаковую скорость ветра, зафиксированную экстраполятором для первого и второго секторов. И второй вариант, когда контуры регулирования учитывают провалы скорости ветра в третьем секторе, и её расчетное значение используется для адаптации регуляторов и расчета долевых коэффициентов. При моделировании, для упрощения, значение момента генератора – M_g прикладывалось после процесса разгона скачкообразно без использования модели генератора и системы векторного регулирования. Выходной сигнал имитационной модели ветра, использованной при моделировании, приведен на рисунке 2.60. Поведение основных параметров контура регулирования в процессе моделирования приведено на рисунках 2.61 – 2.63, при этом сплошная линия на графиках соответствует первому варианту, а пунктирная линия соответствует второму варианту моделирования.

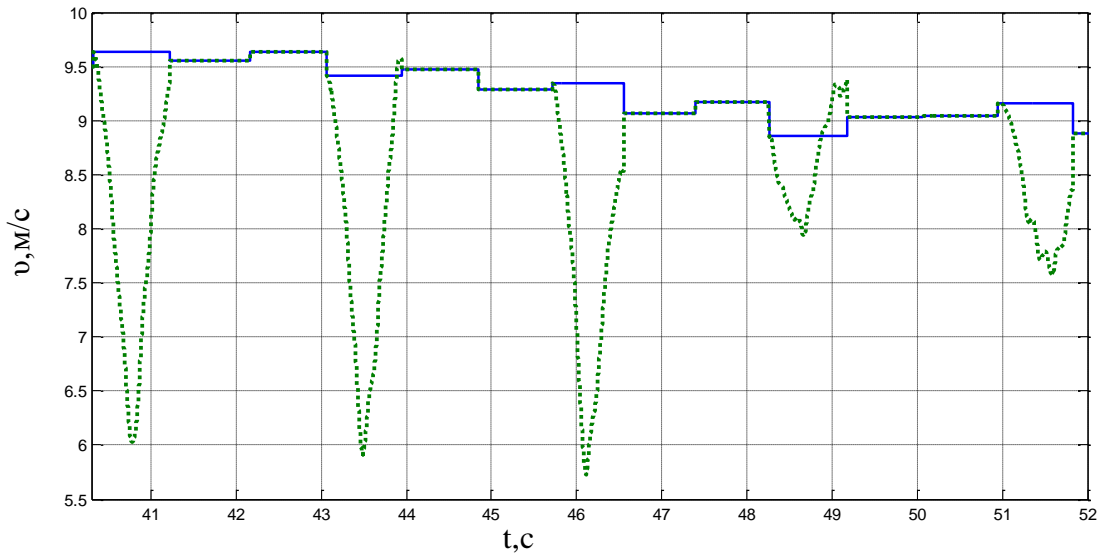


Рисунок 2.60 – Выходной сигнал модели ветра для 1-го и 2-го секторов (сплошная линия), а также для сектора затенения (пунктирная линия)

Приведенные рисунки демонстрируют, что система регулирования, которая учитывает эффект затенения башни, более качественно поддерживает скорость вращения генератора (Рисунок 2.61) и позволяет существенно уменьшить колебания аксиальной силы (Рисунок 2.63), особенно в случаях значительных просадок скорости ветра в третьем секторе.

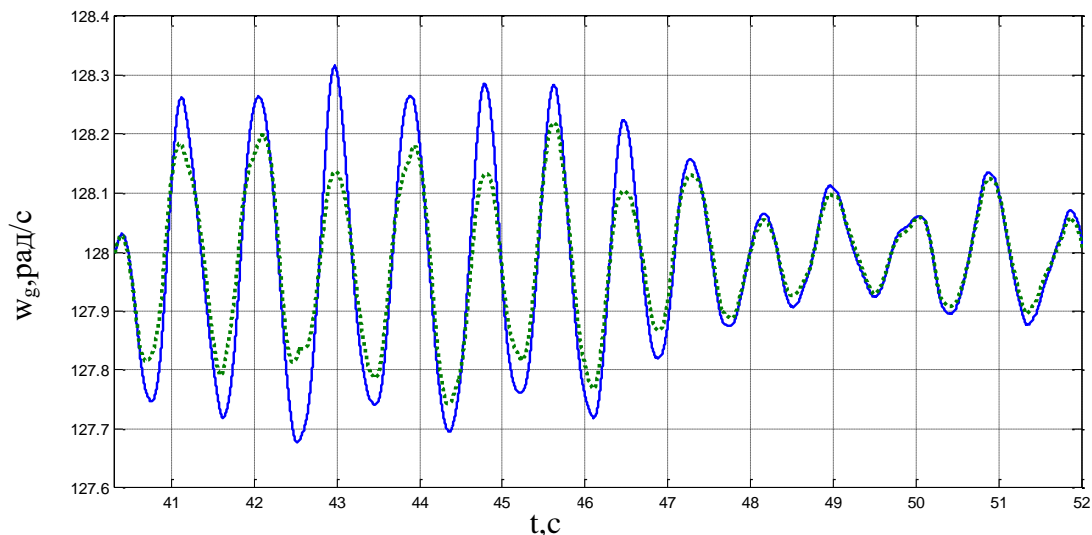


Рисунок 2.61 – Поведение скорости вращения генератора в процессе моделирования без учета (сплошная линия) и с учетом (пунктирная линия) эффекта затенения башни

При этом pitch-угол более спокойно ведет себя в 1-ом и 2-ом секторах, и более активно изменяется в третьем секторе (Рисунок 2.62), что показывает потребность в достаточно быстродействующем приводе поворота лопасти.

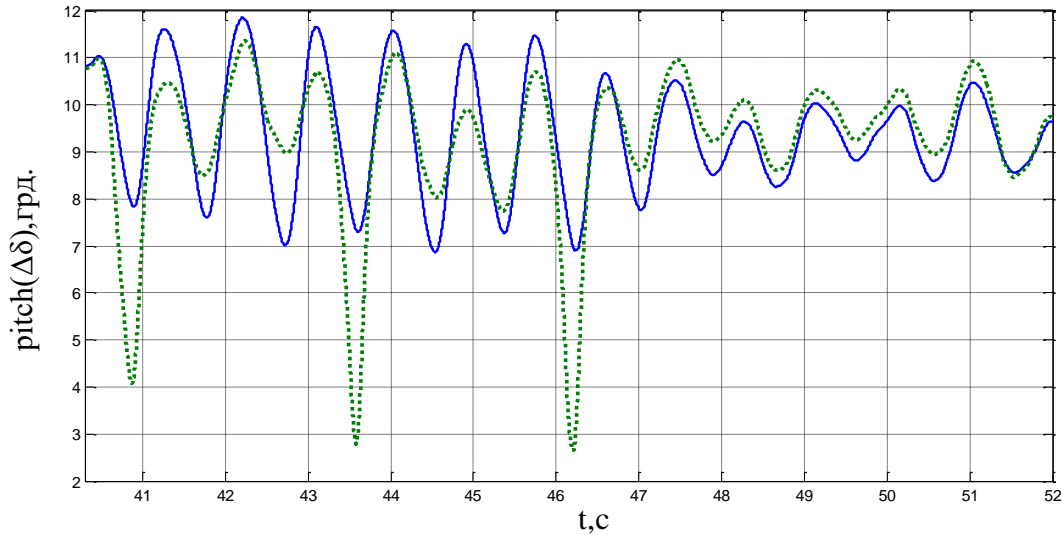


Рисунок 2.62 – Поведение pitch-угла лопасти в процессе моделирования без учета (сплошная линия) и с учетом (пунктир) эффекта затенения башни

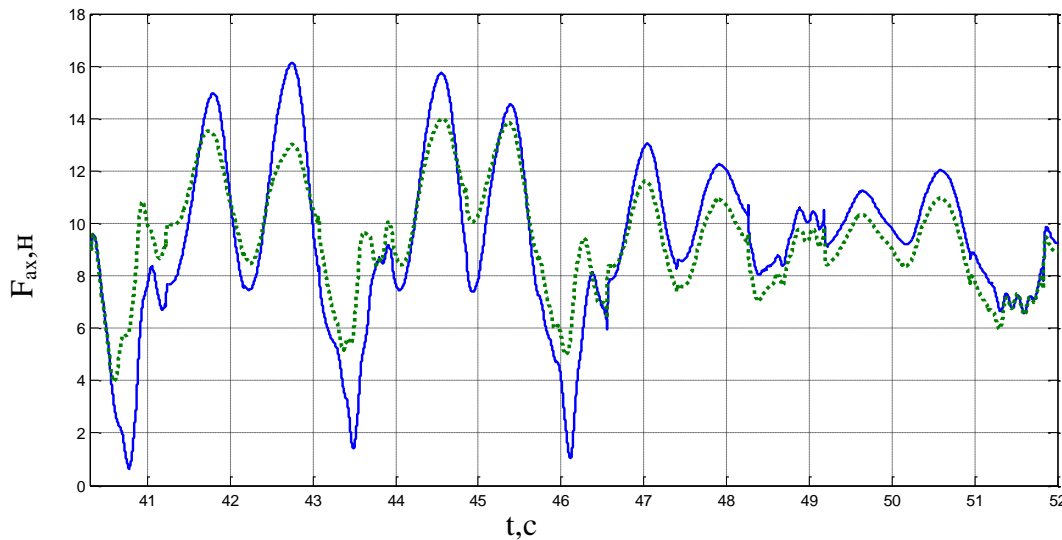


Рисунок 2.63 – Поведение аксиальной силы в процессе моделирования для фрагмента лопасти на расстоянии $0,72R$ от центра вращения

Таким образом, на основе результатов моделирования можно сделать вывод, что контур скорости, реализованный с учетом эффекта затенения башни, лучше выполняет свои основные функции, чем без учета этого эффекта.

Как было уже ранее сказано, в режиме ограничения мощности система регулирования ветроустановки задействует оба контура регулирования: контур скорости вращения ветроколеса и контур электромагнитного момента генератора. Поэтому для оценки качества работы системы регулирования полноценное моделирование следует проводить с использованием математической модели генератора и системы векторного регулирования (Рисунок 2.36), а также трехканального контура регулирования скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.54). Модель системы регулирования в пакете Matlab приведена в приложении Б (Рисунок Б.1). Результаты моделирования в пакете Matlab показали эффективную работу системы регулирования в режиме ограничения мощности непосредственно после процесса пуска (Рисунок 2.64). Так же показан переход из режима максимальной мощности к режиму ограничения мощности как после изменения задания мощности генератора (Рисунок 2.65), так и после увеличения скорости ветра (Рисунок 2.66). Отклонение активной мощности генератора от заданного значения в режиме ограничения не превышает показатель 2 %, что свидетельствует об эффективности предложенной системы стабилизации мощности и повышении точности её работы по сравнению с приведенными в литературе показателями 7-8 %. При этом в режиме ограничения мощности может обеспечиваться не только поддержание номинальной мощности, но и любого ее значения от нуля до номинала.

Поскольку в процессе регулирования в качестве задания на двухконтурную систему стабилизации мощности ветроустановки (Рисунок 2.24), поступает величина мощности, а контур регулирования скорости вращения ветроколеса должен получить задание на скорость, то нужно установить связь между заданием на активную мощность ветрогенератора и заданием на скорость его вращения. Эта связь определяется приведенной ниже формулой

$$\omega_{g \text{ зад.}} = \frac{\omega_{gN}}{\nu_N} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{g \text{ зад.}}}{0,49 \cdot c_{pw \text{ max}} \cdot D^2}} \quad (2.100)$$

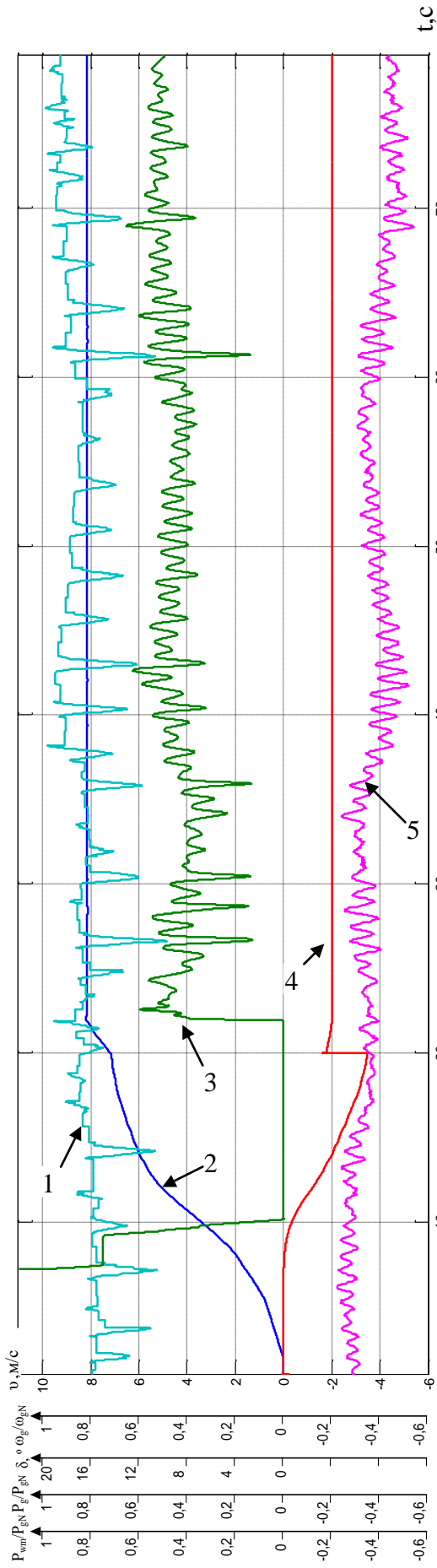


Рисунок 2.64 – Поведение скорости ветра(1), скорости генератора(2), pitch-угла (3), активной мощности генератора (4) и максимальной мощности ветроколеса (5) при работе системы регулирования в режиме ограничения мощности

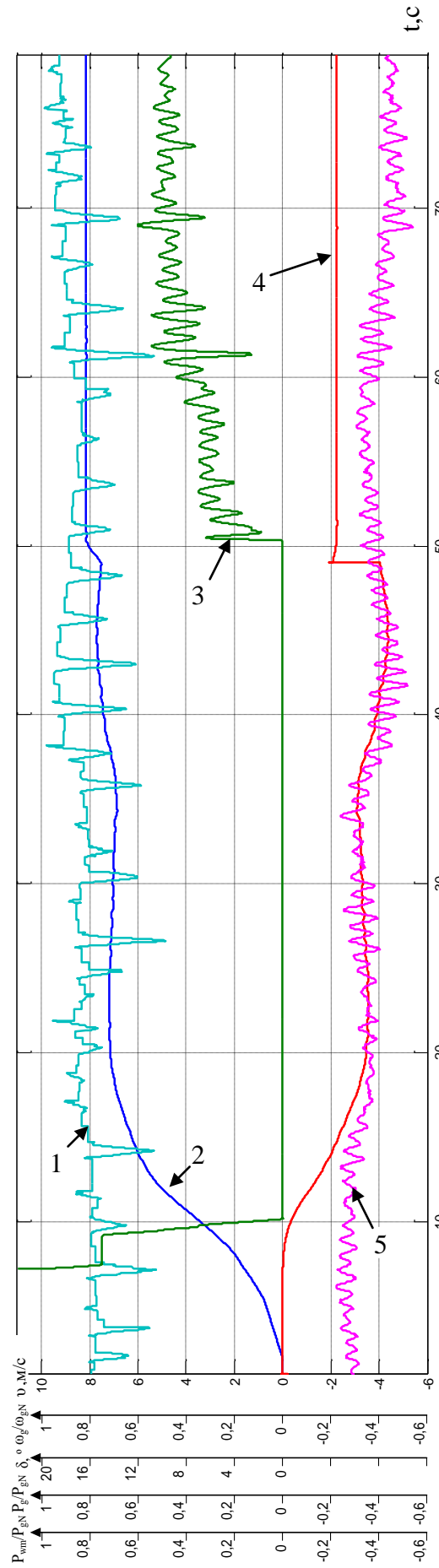


Рисунок.2.65 – Поведение скорости ветра(1), скорости генератора(2), pitch-угла (3), активной мощности генератора (4) и максим. мощности ветроколеса (5) при переходе от режима максимальной мощности в режим ограничения мощности

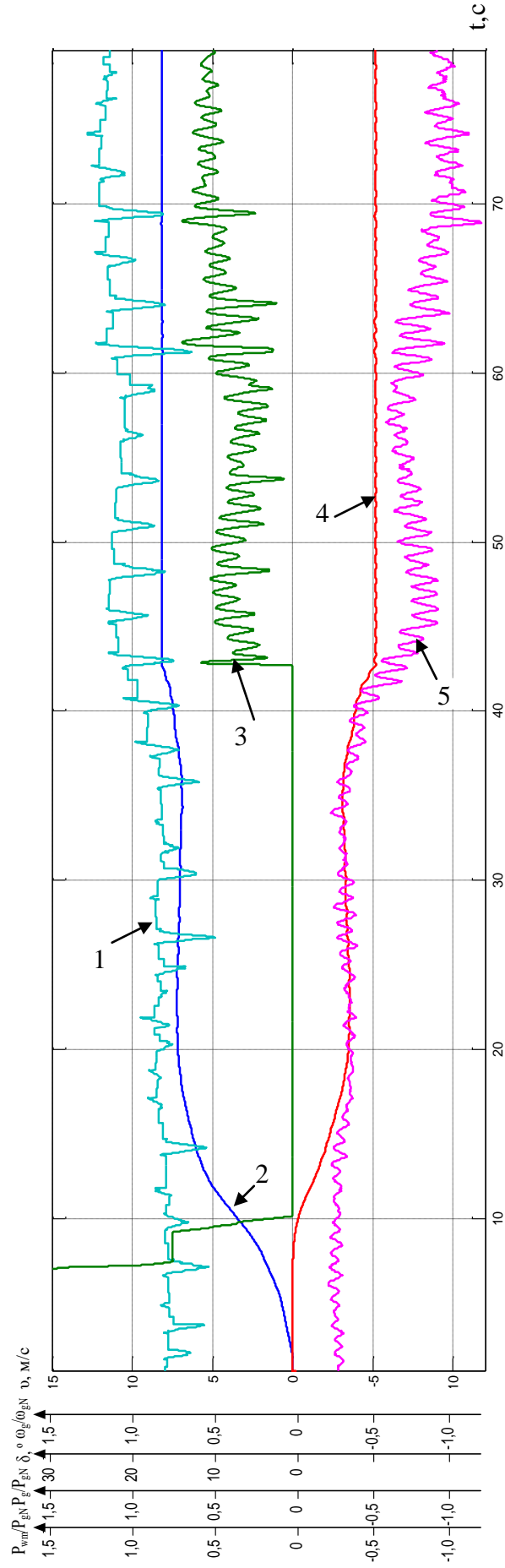


Рисунок 2.66 – Поведение скорости ветра(1), скорости генератора(2), pitch-угла (3), активной мощности генератора (4) и максимальной мощности ветроколеса (5) при увеличении скорости ветра и переходе системы регулирования от режима максимальной мощности к режиму ограничения мощности

Тогда, при формировании задания на скорость согласно формуле (2.100), в случае выполнении условия, описанного в формуле (2.101), система регулирования перейдет в режим отбора максимальной мощности

$$\omega_{\text{г зад.}} \geq \frac{\bar{v}}{v_N} \cdot \omega_{\text{гN}}, \quad (2.101)$$

где \bar{v} – средняя скорость ветра за определенное время.

А в случае выполнении условия, описанного в формуле (2.102)

$$\omega_{\text{г зад.}} < \frac{\bar{v}}{v_N} \cdot \omega_{\text{гN}}. \quad (2.102)$$

система регулирования перейдет в режим ограничения мощности.

2.7 Выводы по разделу 2

Основные задачи и принципы работы системы управления ветрогенераторной установки зависят от режимов ее работы.

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.

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.

Результаты исследований показали, 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. В результате численных исследований установлено, что предложенная трёхканальная система регулирования позволяет уменьшить отклонение скорости вращения ветроколеса от заданного значения, а также существенно уменьшает колебания аксиального усилия лопасти.

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.

Предложенные математические модели и основанные на них методы настройки регуляторов и способы формирования сигналов управления позволили повысить точность работы системы стабилизации мощности ветроустановки в режиме ограничения до уровня отклонения от заданного значения порядка 2%.

РАЗДЕЛ 3

ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ И
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ РАБОТЫ

3.1 Разработка метода энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля

3.1.1 Теоретические основы метода энергоэффективного управления системой ориентирования

Основной задачей исследования является разработка методики формирования сигнала управления для системы ориентирования фотоэлектрического модуля на базе позиционного электропривода, а также программная реализация компонентов системы управления ориентацией на основе микропроцессорного контроллера с последующей проверкой работоспособности предложенной методики на экспериментальной установке.

Анализ литературных источников позволил выделить основные разновидности систем ориентирования фотоэлектрических модулей [28]. Во-первых, это одноосные системы с горизонтальной или вертикальной осью, пример одноосной системы с вертикальной осью показан на рисунке 3.1а. В случае вертикальной оси поверхность модуля может быть наклонена на фиксированный угол по отношению к земной поверхности. Во-вторых, это одноосные системы с наклонной осью по отношению к поверхности земли (Рисунок 3.1 б). В таких системах плоскость модуля, вращаясь одним двигателем вокруг наклонной оси, совершает одновременный поворот в горизонтальной и вертикальном направлениях. В-третьих, это двухосные системы, в которых два двигателя обеспечивают вращение модуля отдельно относительно горизонтальной и вертикальной осей (Рисунок 3.1в).

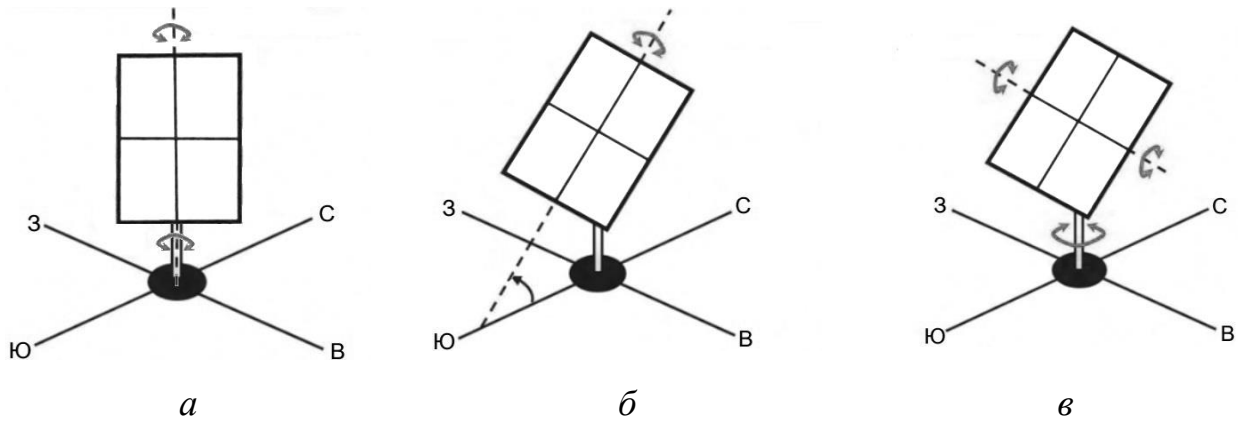


Рисунок 3.1 – Разновидности систем ориентирования: *a* – одноосная с вертикальной осью; *б* – одноосная с наклонной осью; *в* – двухосная система ориентирования

При изготовлении экспериментального стенда предпочтение было отдано системе ориентирования с наклонной осью. Поскольку, как уже упоминалось, в этой системе один двигатель обеспечивает поворот модуля в горизонтальном и вертикальном направлениях. При этом, с точки зрения конструктивного решения, двигатель с закрепленной на валу шестерней вращает полудиск, который наклонен к земной поверхности на угол β . Поверхность модуля закреплена перпендикулярно поверхности полудиска (Рисунок 3.2).

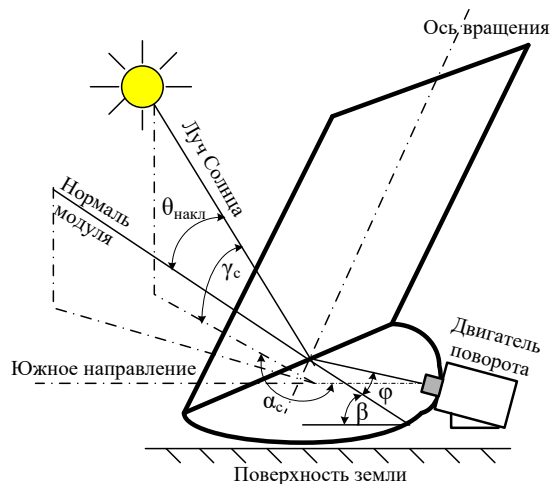


Рисунок 3.2 – Конструкция экспериментального стенда с наклонной осью вращения

На рисунке показаны следующие углы: ϕ – угол поворота полудиска относительно его центральной оси, β – угол наклона плоскости полудиска к

земной поверхности, α_c – азимут Солнца, γ_c – угол высоты Солнца над горизонтом, $\theta_{накл}$ – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность модуля, т.е. угол между нормалью модуля и направлением на Солнце.

Используя геометрические соотношения в приведенной на рисунке 3.2 конструкции, автором доказано, что косинус угла $\theta_{накл}$ вычисляется по формуле

$$\cos\theta_{накл} = \cos\varphi \cdot (\sin\gamma_c \cdot \sin\beta - \cos\gamma_c \cdot \cos\alpha_c \cdot \cos\beta) - \cos\gamma_c \cdot \sin\alpha_c \cdot \sin\varphi. \quad (3.1)$$

В данном случае энергоэффективный метод управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля подразумевает определение такого угла поворота полудиска – $\varphi_{опт}$, при котором угол $\theta_{накл}$ между направлением на солнце и нормалью модуля будет минимальным. Тогда солнечные лучи будут попадать на поверхность модуля как можно ближе к перпендикулярному направлению и энергоотдача модуля будет максимальной.

Для того, чтобы определить значение оптимального угла $\varphi_{опт}$, проведем исследование функции, описанной формулой (3.1) на экстремум, т.е. приравняем производную $d(\cos\theta_{накл})/d\varphi$ нулю. Это позволит определить значение $\varphi_{опт}$, при котором значение косинуса угла $\theta_{накл}$ будет максимальным, т.е. сам угол $\theta_{накл}$ будет иметь минимальное значение. Для удобства введем дополнительные обозначения переменных, тогда получим [73]

$$d = \sin\gamma_c \cdot \sin\beta - \cos\gamma_c \cdot \cos\alpha_c \cdot \cos\beta \quad (3.2)$$

$$q = \cos\alpha_c \cdot \sin\gamma_c \quad (3.3)$$

$$\varphi_{опт} = \arccos\left(\frac{d}{\sqrt{d^2 + q^2}}\right). \quad (3.4)$$

Таким образом, для вычисления оптимального угла поворота полудиска достаточно знать углы положения Солнца – γ_c и α_c , а также угол наклона полудиска системы ориентирования к земной поверхности – β . Геометрический смысл углов положения солнца показан на рисунке 3.3.

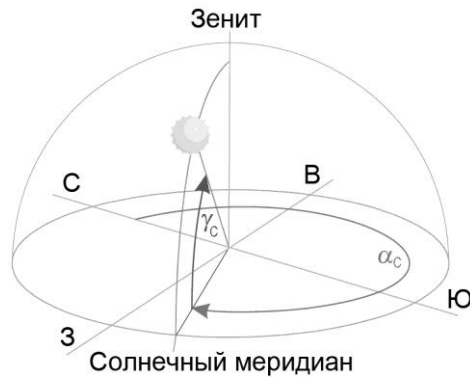


Рисунок 3.3 – Геометрический смысл углов положения Солнца

Для вычисления углов положения солнца воспользуемся предложенной в [23, с. 62 - 65] методикой. Сначала рассчитаем параметр J , связанный с номером дня в году

$$J = 360^\circ \cdot \frac{\text{День года}}{\text{Число дней в году}} . \quad (3.5)$$

Далее рассчитаем солнечное склонение – δ по формуле

$$\delta = 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J + 9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J + 26^\circ) . \quad (3.6)$$

Рассчитаем уравнение времени, которое учитывает изменение длительности светового дня.

$$t_{ep} = 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J + 85,9^\circ) + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J + 108,9^\circ) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J + 105,2) . \quad (3.7)$$

Далее рассчитаем значение среднего местного времени – CMB

$$CMB = MB - ЧП + 4 \cdot \lambda , \quad (3.8)$$

где MB – местное время, час; $ЧП$ – часовой пояс; λ – долгота местности, °.

На основании значений CMB и t_{ep} определим реальное местное время – PMB

$$PMB = CMB + t_{ep} . \quad (3.9)$$

На основании параметра PMB рассчитаем значение часового угла – ω .

$$\omega = (12 - PMB) \cdot 15 . \quad (3.10)$$

Теперь, на основании рассчитанных выше параметров и географической широты местности – ψ , можно рассчитать угол высоты Солнца над горизонтом – γ_c и азимут Солнца – α_c .

$$\gamma_c = \arcsin(\cos\omega \cdot \cos\psi \cdot \cos\delta + \sin\psi \cdot \sin\delta) \quad (3.11)$$

$$\text{для } PMB < 12:00 \text{ ч} - \alpha_c = 180^\circ - \arccos \frac{\sin\gamma_c \cdot \sin\psi - \sin\delta}{\cos\gamma_c \cdot \cos\psi}, \quad (3.12)$$

$$\text{для } PMB > 12:00 \text{ ч} - \alpha_c = 180^\circ + \arccos \frac{\sin\gamma_c \cdot \sin\psi - \sin\delta}{\cos\gamma_c \cdot \cos\psi}. \quad (3.13)$$

Таким образом, формулы (3.5÷3.13) позволяют вычислить все необходимые величины для расчета наилучшего угла поворота – φ_{opt} .

3.1.2 Структура и программная реализация системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля.

Для реализации системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля был использован микропроцессорный контролер – Simatic S7-300. В качестве привода поворота использовался преобразователь частоты Micromaster 440, который обеспечивает вращение асинхронного электродвигателя. Основные аппаратные и программные компоненты системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля приведены на рисунке 3.4 [73, с. 17].

Работа системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля организована следующим образом. Выходные данные системного таймера позволяют рассчитать параметр J по формуле (3.5) и значение среднего местного времени – SMB по формуле (3.8), что позволяет рассчитать оптимальный угол поворота модуля – φ_{opt} по формулам (3.2, 3.3 и 3.4).

Блок управления поворотом модуля формирует последовательность подачи заданий на систему ориентирования [74]. При этом формирование сигнала задания на угол поворота модуля может происходить как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режимах.

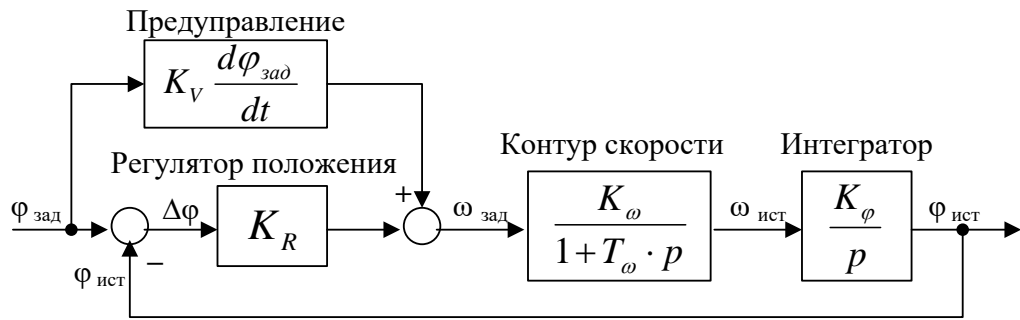


Рисунок 3.5 – Структурная схема контура регулирования угла поворота модуля

Тогда рассчитать коэффициент усиления регулятора положения – K_R , можно из условия равенства единице коэффициента демпфирования контура.

$$K_R = \frac{1}{4 \cdot T_\omega \cdot K_\omega \cdot K_\phi}, \quad (3.14)$$

где K_ω и T_ω – коэффициент передачи и постоянная времени контура скорости; K_ϕ – коэффициент интегратора, связывающий скорость и угол поворота.

Сигнал задания на скорость формируется согласно формуле (Рисунок 3.5)

$$\omega_{зад} = K_R \cdot \Delta\varphi[n] + K_V \frac{\varphi_{зад}[n] - \varphi_{зад}[n-1]}{T}. \quad (3.15)$$

Фрагмент программы, реализующий формулу (3.15), приведен на рисунке 3.6.

```

☐ Netzwerk 2 : Определение ошибки позиционир
L   #Fi_soll
L   #Fi_ist
-R
T   #dfi
ABS
T   #abs_dfi

☐ Netzwerk 4 : Вычисление заданной скорости тип
L   #dfi
L   #Kreg
*R
L   #w_vorst
+R
L   -1.000000e+000
*R
T   #w_soll_real

☐ Netzwerk 3 : Вычисление сигнала предупредл
L   #Fi_soll
L   #Fi_soll_n_1
-R
L   #abtastzeit
/R
L   5.030000e+002
*R
L   #Kvorst
*R
T   #w_vorst
L   #Fi_soll
T   #Fi_soll_n_1

☐ Netzwerk 5 : Перевод заданной скорости в INT
CALL "UNSCALE"
IN      :=#w_soll_real
HI_LIM :=2.764800e+004
LO_LIM :=-2.764800e+004
BIPOLAR:=#start_reg
RET_VAL:=MW110
OUT     :=#w_soll_int

```

Рисунок 3.6 – Фрагмент программы для вычисления сигнала задания скорости

Реальное значение скорости вращения привода $\omega_{уст}$ оценивается импульсным датчиком, установленным на валу двигателя со степенью точности 2048 импульсов на оборот. Сигналы импульсного датчика обрабатываются преобразователем частоты Micromaster 440 и в аналоговой форме поступают на АЦП контроллера, который оцифровывает значение сигнала скорости вращения двигателя поворота. В дальнейшем, на базе цифрового значения скорости, можно вычислить реальный угол поворота фотоэлектрического модуля $\varphi_{уст}$, который поступает в качестве обратной связи на регулятор положения.

При этом необходимо отметить, что нулевое значение угла поворота фотоэлектрического модуля присваивается такому положению модуля, когда его поверхность сориентирована перпендикулярно южному направлению. Нулевое значение угла поворота модуля фиксируется в системе управления соответствующим конечным выключателем. Таким образом, поворот модуля левее южного направления будет соответствовать отрицательным углам поворота, а поворот модуля правее южного направления будет соответствовать положительным углам поворота. Полный ход механизма ориентации соответствует диапазону углов поворота от -85° до $+85^\circ$. При этом крайние положения механизма поворота фиксируются двумя соответствующими конечными выключателями для предотвращения выхода приводной шестерни за пределы полудиска.

Расчет реального угла поворота фотоэлектрического модуля $\varphi_{уст}$ происходит на базе передаточной функции дискретного интегратора, которая трансформируется в разностное уравнение

$$\varphi_{уст} = \frac{b_0}{1 - a_1 \cdot z^{-1}} \cdot \omega_{уст} \quad (3.16)$$

$$\varphi_{уст}[n] = k_I \cdot T \cdot \omega[n] + \varphi[n-1], \quad (3.17)$$

где: k_I – коэффициент интегратора; T – период дискретности интегратора, с.

Ниже приводится пример реализации программного блока вычисления реального угла поворота модуля на языке программирования Step 7 в виде

нескольких сегментов программы (Рисунок 3.7). В пятом сегменте происходит процесс масштабирования скорости, при котором учитываются особенности работы АЦП контроллера и целочисленное значение скорости переводится в формат с плавающей запятой [77, 78]. В шестом сегменте реализуется разностное уравнение в соответствии с формулой (3.17). В седьмом сегменте происходит обнуление переменных разностного уравнения по сигналу «сброс».

```

└─ Netzwerk 5: Масштабирование скорости
  L   #w_ist
  L   13824
  -I
  T   #w_ist_2
  T   MW   30
  L   #w_ist_2
  ITD
  DTR
  T   #w1
  L   1.047000e+001
  *R
  L   1.382400e+004
  /R
  L   -1.000000e+000
  *R
  T   #w

└─ Netzwerk 6: Дискретный интегратор
  L   #w
  L   #T
  *R
  L   #Ki
  *R
  L   #Fi_n1
  +R
  T   #Fi_n1
  T   #Fi
  SPA  m01

└─ Netzwerk 7: Обнуление переменных
m00:  L   0.000000e+000
      T   #Fi_n1
      T   #Fi
m01:  MOP  0

```

Рисунок 3.7 – Фрагмент программы вычисления реального угла поворота модуля

Кроме этого, приведенная на рисунке 3.4 система управления, позволяет рассчитывать мгновенные значения плотности мощности солнечного излучения, поступающего на поверхность фотоэлектрического модуля – E_{solar} , на основании его тока короткого замыкания, т.е. без использования какого-либо фотоэлектрического датчика. Это происходит следующим образом: контактор по команде контроллера замыкает цепь солнечного модуля, быстродействующий датчик тока на основе эффекта Холла замеряет ток короткого замыкания модуля, сигнал датчика тока поступает на АЦП контроллера, после чего оцифрованное значение тока может быть использовано для расчета значения плотности мощности на поверхности фотоэлектрического модуля – E_{solar} по нижеследующей формуле.

$$E_{solar} \approx \frac{1000}{I_{кзN}} \cdot I_{кз}, \quad (3.18)$$

где $I_{кзN}$, $I_{кз}$ – токи короткого замыкания модуля соответственно при стандартной ($E_s=1000$ Вт/м²) и текущей плотности мощности солнечной энергии, А, измеренные при стандартной температуре $t = 25$ °С.

Необходимо так же отметить, что использованный в формуле знак приближенного равенства, означает, что при отклонениях температуры от стандартного значения 25°С, может появиться некоторая погрешность при расчете значения E_{solar} из-за температурного влияния на ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля – $I_{кз}$. Однако влияние температуры на ток $I_{кз}$ модуля весьма незначительно и описывается температурным коэффициентом, который составляет +0,04% на градус Цельсия. Это означает, что при отклонении температуры фотоэлектрического модуля от стандартного значения на 25°С, значение тока короткого замыкания и соответственно расчетное значение плотности мощности – E_{solar} отклониться от стандартного на 1%, что существенно не повлияет на точность регистрации измерений.

Таким образом, блок регистрации измерений в заданные моменты времени позволяет сохранять в памяти контроллера значения плотности мощности на поверхности фотоэлектрического модуля – E_{solar} на заданных углах его поворота относительно южно-направленной оси полудиска – φ , а так же сами значения этих углов.

Эта способность системы управления дает ей возможность работать в исследовательском режиме работы. В этом режиме сначала плотность мощности на поверхности фотоэлектрического модуля фиксируется системой регистрации при строгой ориентации модуля на юг и затем при повороте модуля на оптимальный угол – φ_{opt} , рассчитанный системой управления. При таком методе регистрации измерений можно провести сравнительный анализ, который покажет, какой прирост плотности мощности дает использование системы ориентирования по сравнению с жестко закрепленным и сориентированным на юг фотоэлектрическим модулем.

Кроме регистрации плотности мощности в указанных фиксированных положениях модуля, можно проводить регистрацию измерений прямо во время его движения с коротким временным интервалом записи в память, например каждые 20 мс. При этом диапазон изменения угла поворота целесообразно установить в пределах от $\varphi=0^\circ$ (ориентация на юг) до $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$. Во время поворота модуля можно использовать алгоритм трекера максимальной мощности на исследуемом секторе поворота с последующей записью в память значения максимальной зарегистрированной в данном секторе плотности мощности и угла поворота, соответствующего этой мощности. Дальнейшее сравнение зарегистрированного угла поворота, соответствующего максимальной плотности мощности, с расчетным значением оптимального угла поворота модуля – φ_{onm} позволит сделать вывод о корректности предложенного метода расчета оптимального угла для ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечной энергии.

Временная диаграмма, демонстрирующая процесс регистрации основных параметров системы во время измерительного цикла приведена на рисунке 3.8. При этом, измерительным циклом можно считать процесс поворота модуля с исходной позиции при $\varphi=0^\circ$ до позиции $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$ и возврат в исходное положение (ориентация на юг).

Процесс записи в память измеренных параметров происходит в моменты появления активирующих импульсов (Рисунок 3.8). Первый импульс появляется через секунду после включения контактора в цепи фотоэлектрического модуля, в этот момент запоминается значение плотности мощности модуля – E_{solar} в исходной позиции при $\varphi=0^\circ$ и время измерения – t . Сразу после этого начинается поворот модуля в позицию $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$. В процессе движения, при $\varphi=\varphi_{onm}$, появляется второй импульс и происходит регистрация плотности мощности модуля – E_{solar} в позиции φ_{onm} и значения угла – φ_{onm} . Третий импульс появляется в момент достижения позиции $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$. В этот момент фиксируется максимальная плотность мощности модуля, зарегистрированная трекером в

пройденном секторе – $E_{solar\ max}$ и угол поворота, на котором эта мощность была зафиксирована – φ_{max} .

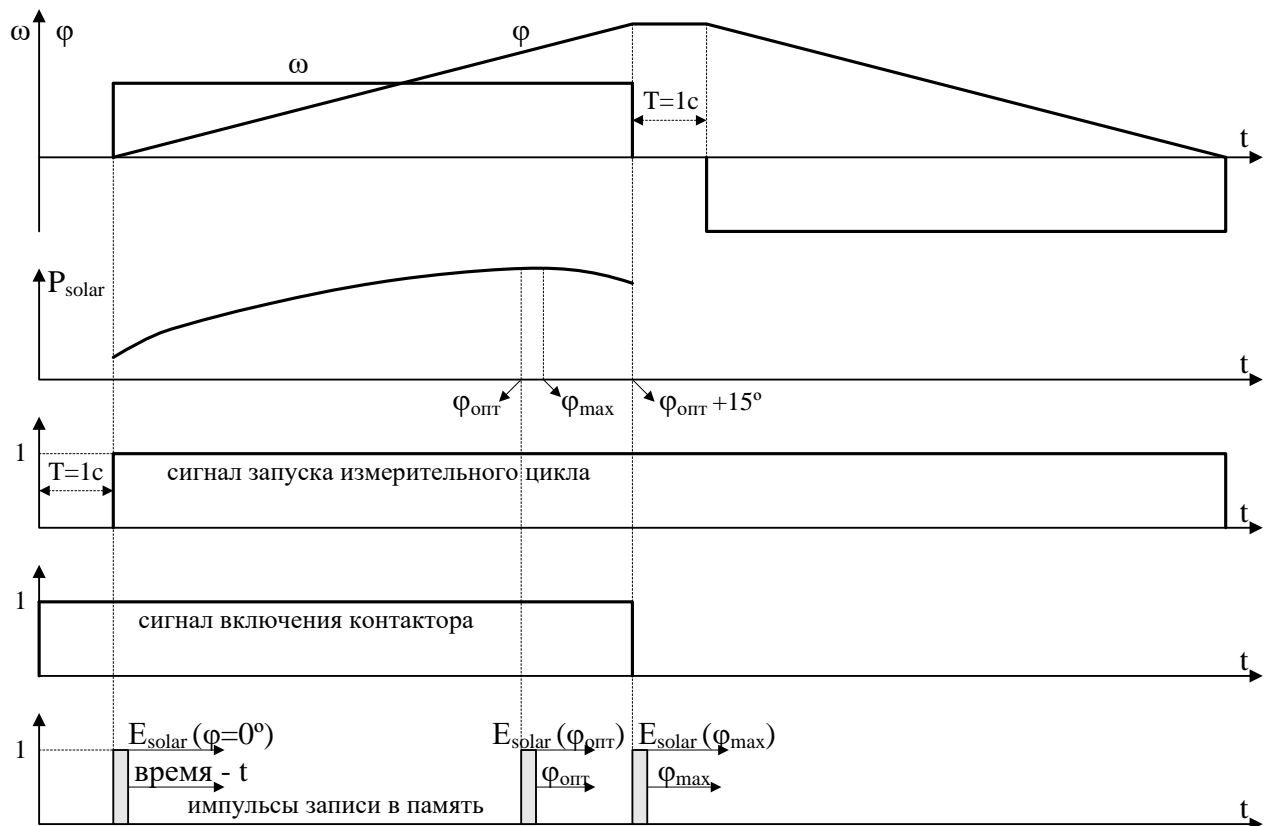


Рисунок 3.8 – Временная диаграмма измерительного цикла при регистрации основных параметров

В процессе регистрации все данные записываются в соответствующие блоки данных [79, 80]. При регистрации используется метод косвенной адресации, при котором адрес ячейки памяти в блоке данных, куда будет произведена запись, задается в адресном регистре. При окончании измерительного цикла значение адресного регистра увеличивается на 32 бита и подготавливается к следующей записи в память (Приложение Г). Измерительный цикл заканчивается, когда модуль возвращается в исходное положение – $\varphi=0^\circ$.

Алгоритм программы управления ориентированием приведен на рисунке 3.9. Структура программы управления и связи между программными блоками показаны на рисунке 3.10. Полный текст программы на языке программирования STEP 7 приведен в приложении Г.

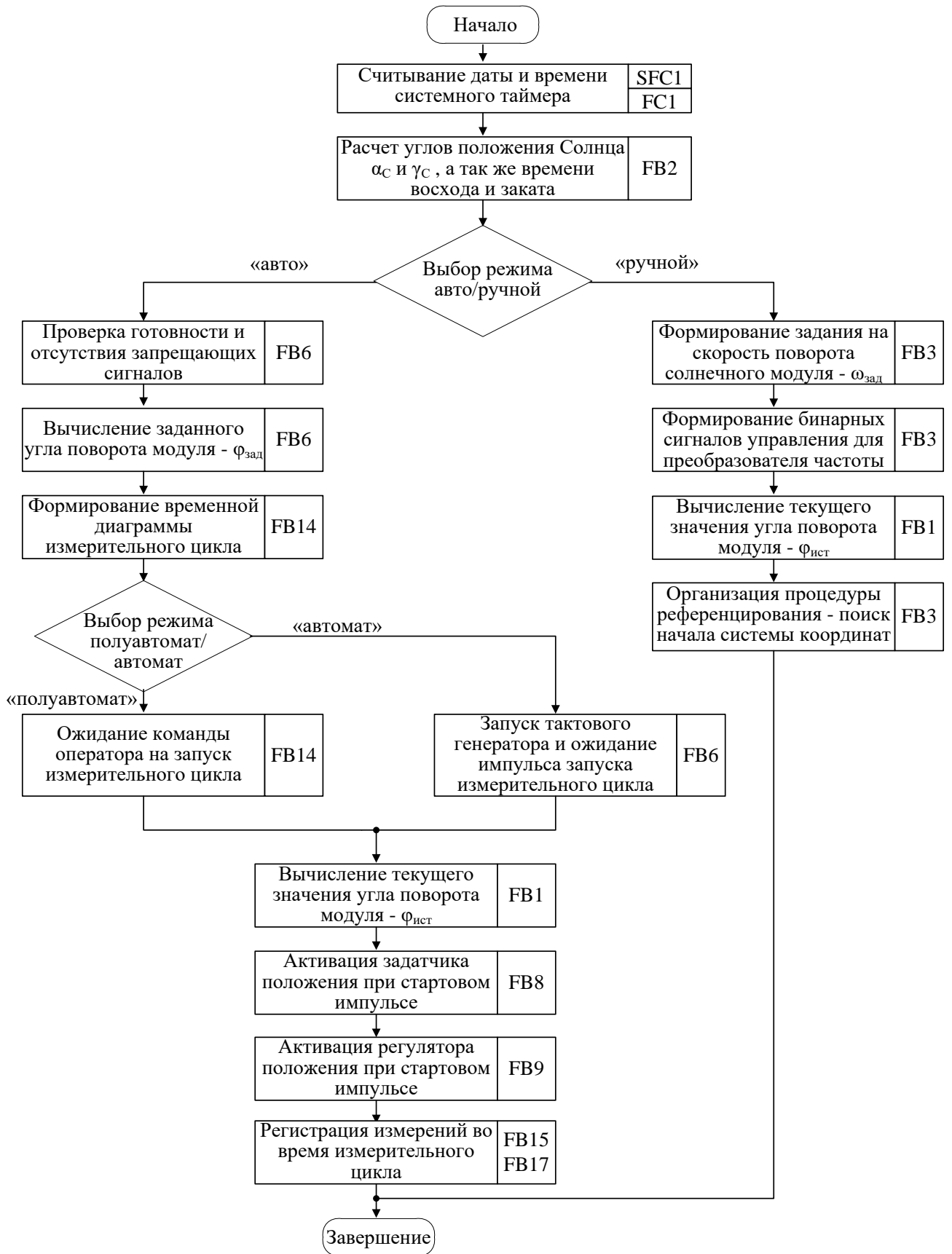


Рисунок 3.9 – Алгоритм программы управления системой ориентирования

3.1.3 Аппаратная реализация системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля

Для проверки работоспособности предложенного метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля была создана экспериментальная установка, которая позволила реализовать структуру системы управления ориентированием, приведенную на рисунке 3.4. Конструкция экспериментальной установки приведена на рисунке 3.11.

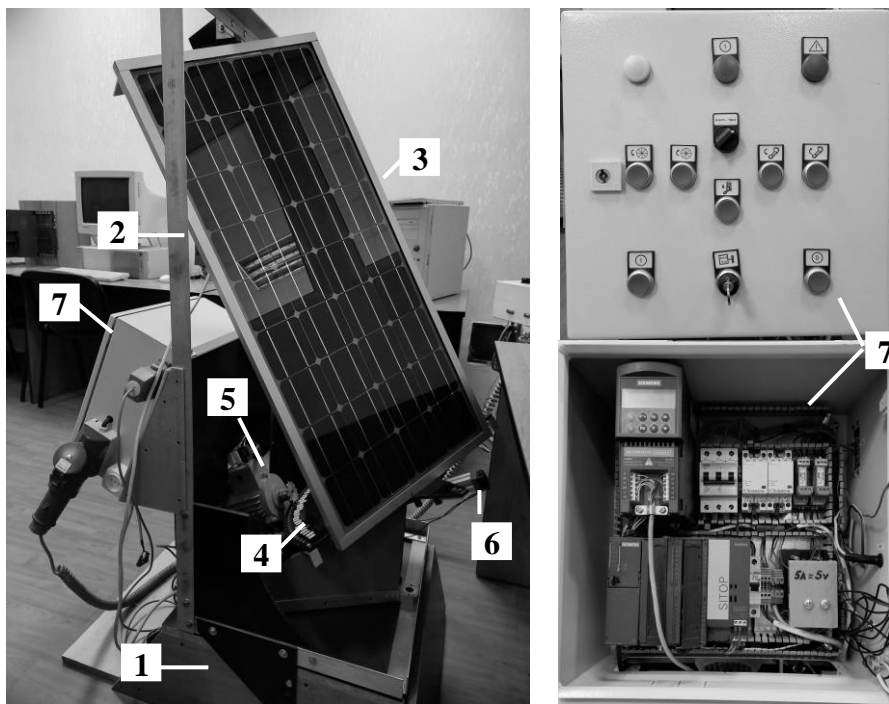


Рисунок 3.11 – Конструкция экспериментальной установки с системой ориентирования: 1 – неподвижное основание; 2 – рама; 3 – фотоэлектрический модуль; 4 – передаточный механизм; 5 – асинхронный двигатель; 6 – центральный конечный выключатель (направление на юг); 7 – шкаф управления

Основными конструктивными элементами экспериментальной установки являются: 1 – неподвижное основание в виде устойчивой деревянной платформы, 2 – рама, поворачивающаяся относительно горизонтальной оси, для изменения угла наклона оси вращения фотоэлектрического модуля к земной поверхности с фиксацией на четырех разных углах наклона (62° , 55° , 48° , 41°), 3 – фотоэлектрический модуль, вращающийся относительно наклонной оси, 4 –

передаточный механизм, состоящий из полудиска и вращающейся шестерни, 5 – асинхронный электродвигатель, 6 – центральный конечный выключатель для фиксации направления на юг, 7 – шкаф управления.

Как уже отмечалось ранее, такое конструктивное исполнение позволяет за счет вращения приводной шестерни, закрепленной на валу двигателя, менять положение поверхности модуля одновременно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Управления системой ориентирования было реализовано на базе программируемого логического контроллера Simatic S7-300 с центральным процессорным модулем – CPU 314C-2DP. Данный процессорный модуль применяется для построения систем управления с высокими требованиями к скорости обработки информации и малым временем реакции [81, 82]. Он имеет достаточный набор встроенных цифровых и аналоговых устройств ввода-вывода. Основные технические характеристики процессорного модуля – CPU 314C-2DP приводятся в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики процессорного модуля – CPU 314C-2DP

Наименование характеристики	Информация о характеристике
Время выполнения логической команды	0,1 мкс
Время выполн команды с плавающей запятой	6 мкс
Объем памяти	ОЗУ – 96 Кбайт Микрокарта памяти – 8 Мбайт
Наличие интерфейсов	MPI PROFIBUS DP
Количество встроенных цифровых входов	24 цифровых входа (DC 24V)
Количество встроенных цифровых выходов	16 цифровых выхода (DC 24V/0,5A)
Количество встроенных аналоговых входов	4 канала для измерения тока/напряжения 1 канал для измерения температуры
Количество встроенных аналоговых выходов	2 канала с возможностью переключения ток/напряжение

Приведенные технические характеристики процессорного модуля – CPU 314C-2DP позволяют эффективно реализовывать программные элементы, приведенные на структурной схеме управления системой ориентирования, (Рисунок 3.4).

При реализации программных элементов системы управления ориентированием особый интерес представляют технические параметры входных и выходных аналоговых каналов [83, 84], поскольку для реализации структурной схемы управления, изображенной на рисунке 3.4, необходимо использовать два входных аналоговых канала для считывания скорости приводного двигателя и тока фотоэлектрического модуля, а так же один выходной аналоговый канал для задания скорости приводного двигателя.

Структурная схема подключения аналоговых каналов ввода-вывода, встроенных в модуль центрального процессора CPU 314C-2DP, приведена на рисунке 3.12.

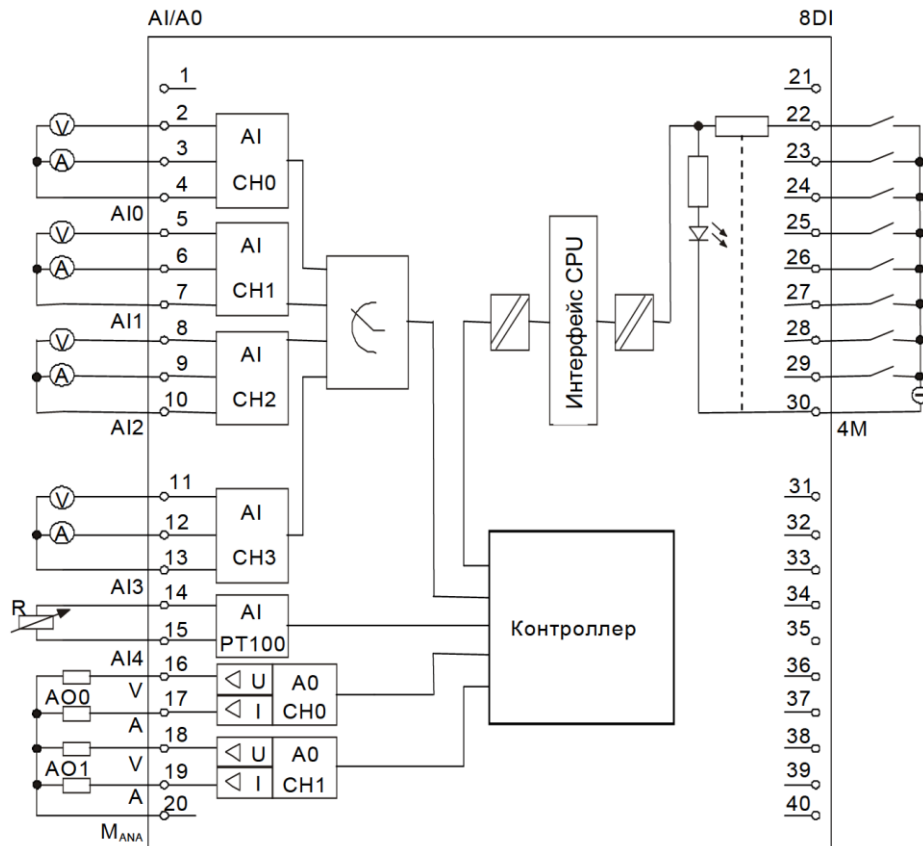


Рисунок 3.12 – Структурная схема подключения аналоговых каналов ввода-вывода модуля центрального процессора CPU 314C-2DP

Технические параметры входных аналоговых каналов модуля центрального процессора CPU 314C-2DP [85] приведены в таблице 3.2. Для измерения скорости приводного двигателя выбран измерительный диапазон от 0 до 20 мА, для измерения тока модуля выбран диапазон от 0 до 10 В [86, 87].

Таблица 3.2 – Технические параметры входных аналоговых каналов модуля центрального процессора CPU 314C-2DP

Параметр	Значение
Количество входов	4 канала – токовые и потенциальные входы 1 канал – вход сопротивления
Напряжение холостого хода, В	тип. 2,5
Измеряемый ток, мА	тип. от 1,8 мА до 3,3
Время интегрирования, мс	2,5 / 16,6 / 20
Допустимая входная частота, Гц	макс. 400
Разрешение в битах	11 бит + знак
Основное время выполнения, мс	1
Входной диапазон напряжения	± 10 В от 0 до 10 В
Входной диапазон тока	± 20 мА от 0 до 20 мА от 4 до 20 мА

Технические параметры выходных аналоговых каналов модуля центрального процессора CPU 314C-2DP приведены в таблице 3.3. Для управления скоростью приводного двигателя выбран выходной диапазон напряжения от +10 В до –10 В.

Таблица 3.3 – Технические параметры выходных аналоговых каналов модуля центрального процессора CPU 314C-2DP

Параметр	Значение	
Количество выходов	2	
Номинальное напряжение нагрузки L+, В	24	
Разрешение (включая область перегрузки), бит + знак	11	
Время преобразования (на канал), мс	1	
Время установления, мс	для омической нагрузки	0,6
	для емкостной нагрузки	1,0
	для индуктивной нагрузки	0,5
Выходной диапазон напряжения, В	± 10; от 0 до 10	
Выходной диапазон тока, мА	± 20 от 0 до 20; от 4 до 20	

Силовая часть преобразователя состоит из трех основных компонентов: неуправляемый AC/DC выпрямитель на основе шестипульсной мостовой схемы, промежуточный контур со сглаживающим конденсатором и транзисторный DC/AC инвертор [88], работающий по принципу векторной модуляции, с изменением частоты модуляции в пределах $2 \div 16$ кГц.

Как показано на рисунке 3.13, плата управления преобразователя имеет шесть параметрируемых цифровых входов – DIN1÷DIN6 с потенциальной развязкой, два аналоговых входа – AIN1÷AIN2 с допустимым диапазоном изменения входного сигнала от +10 В до –10 В или от 0 мА до 20 мА, два аналоговых выхода с допустимым диапазоном изменения выходного сигнала от 0 мА до 20 мА, а так же три параметрируемых релейных выхода.

В соответствии с рисунком 3.4, бинарный сигнал управления «вкл/откл» поступает от контроллера на цифровой вход DIN1 платы управления преобразователя частоты и далее обрабатывается словом управления преобразователя (специальный регистр управления), структура которого приведена в приложении В (Рисунок В.1). Сигнал задания скорости поступает на аналоговый вход AIN1 платы управления преобразователя частоты и обрабатывается далее функциональным блоком, приведенным на рисунке 3.14.

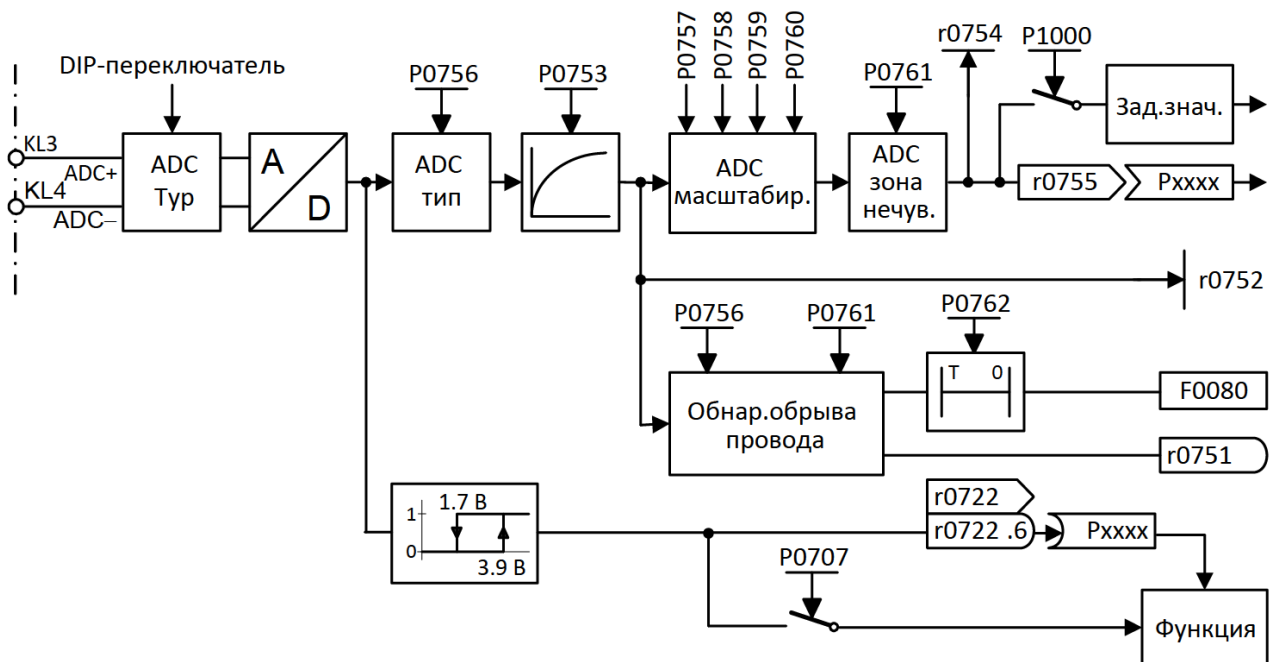


Рисунок 3.14 – Структура функционального блока для обработки сигнала AIN1

Для согласования параметров аналогового выходного канала (АО СНО) контроллера Simatic S7-300 (Рисунок 3.12), через который выдается задание на скорость вращения приводного двигателя, с параметрами аналогового входа - АIN1 платы управления преобразователем частоты (Рисунок 3.13) в функциональном блоке, приведенном на рисунке 3.14 были установлены значения параметров настройки P0756÷P0761 и P0753 в соответствии с таблицей 3.4.

Таблица 3.4 – Установленные значения параметров функционального блока для обработки сигнала аналогового входа АIN1

Номер параметра и его назначение	Значение параметра и комментарий
P0756 – выбор типа АЦП (ток/напряжение) и диапазона изменения входного сигнала.	P0756=4 , выбран двухполярный диапазон изменения входного сигнала АIN1 от +10 В до –10 В.
P0753 – постоянная времени сглаживающего фильтра (мс)	P0753=0 , сглаживающий фильтр не используется
P0757 – параметр масштабирования АЦП по горизонтальной оси - X1 (В)	P0757= –10В , предельное отрицательное значение входного сигнала
P0758 - параметр масштабирования АЦП по вертикальной оси - Y1 (%)	P0758= –10% , значение заданной частоты вращения двигателя (в % от базовой величины – 50 Гц), соответствующее предельному отрицательному значению входного сигнала - P0757 (установлено значение частоты –5Гц).
P0759 – параметр масштабирования АЦП по горизонтальной оси – X2 (В)	P0759= +10В , предельное положительное значение входного сигнала.
P0760 - параметр масштабирования АЦП по вертикальной оси – Y2 (%)	P0760= +10% , значение заданной частоты вращения двигателя (в % от базовой величины – 50 Гц), соответствующее предельному положительному значению входного сигнала - P0759 (установлено значение частоты +5Гц).
P0761 – ширина зоны нечувствительности АЦП (В)	P0761=0 , зона нечувствительности отсутствует.

Значение реальной скорости вращения двигателя измеряется импульсным датчиком скорости 1XP8001-1, имеющим 1024 импульса на оборот, который подключается к специальному измерительному модулю энкодера на преобразователе частоты. Измеренное значение скорости двигателя преобразуется

в аналоговую форму внутри платы управления преобразователя частоты и выдается через аналоговый выход АОУТ1. Процесс формирования аналогового значения измеренного сигнала скорости двигателя задается настройками параметров в специальном функциональном блоке, структура которого приведена на рисунке 3.15.

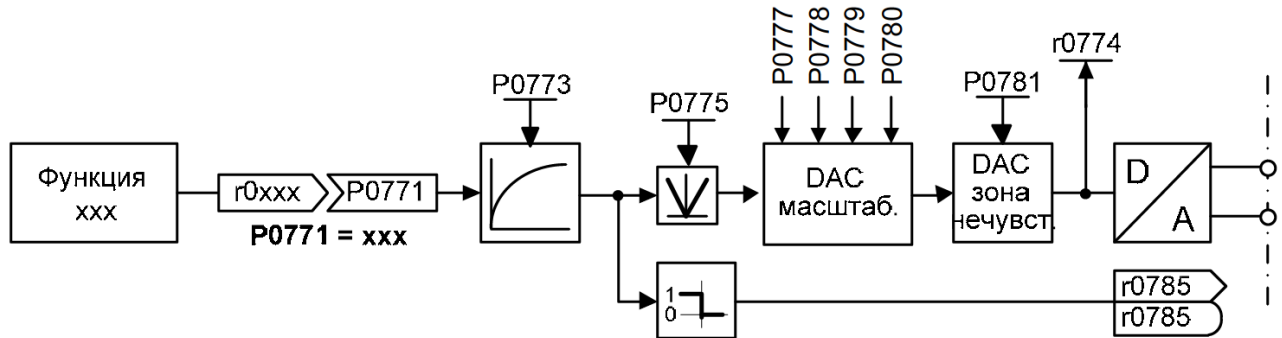


Рисунок 3.15 – Структура функционального блока для формирования выходного аналогового сигнала АОУТ1

Для согласования параметров аналогового входного канала (AI CH2) контроллера Simatic S7-300 (Рисунок 3.12), на который поступает сигнал измеренного значения скорости вращения приводного двигателя, с параметрами аналогового выхода – АОУТ1 платы управления преобразователем частоты (Рисунок 3.13), в функциональном блоке, приведенном на рисунке 3.15 были установлены значения параметров настройки P0775÷P0781, P0771 и P773 в соответствии с таблицей 3.5.

После обработки поступающего от контроллера входного аналогового сигнала задания на скорость посредством АЦП АIN1, его оцифрованное значение подается на контур регулирования скорости преобразователя частоты Micromaster 440 (приложение В, Рисунок В.2). Контур скорости построен по принципу подчиненного регулирования, т.е. содержит ПИ-регулятор скорости, который выдает задание на ток для внутреннего контура тока, формирующего приводной момент двигателя. Работа двух имеющихся контуров тока базируется на принципах векторного регулирования [32, с. 345]. Это означает, что приводной момент двигателя регулируется за счет моментобразующей компоненты тока

статора - i_{sq} , а магнитный поток двигателя регулируется за счет потокообразующей компоненты тока статора – i_{sd} .

Таблица 3.5 – Установленные значения параметров функционального блока для формирования сигнала на аналоговом выходе AOУТ1

Номер параметра и его назначение	Значение параметра и комментарий
P771 – указатель источника цифрового сигнала, преобразуемого в аналоговую форму.	P771=21 , выбран сигнал цифрового значения скорости двигателя.
P0773 – постоянная времени сглаживающего фильтра (мс)	P0773=0 , сглаживающий фильтр не используется
P775 – выбор функции определения модуля входного сигнала	P775=0 , функция определения модуля выключена
P776 – выбор диапазона изменения выходного аналогового сигнала	P776=0 , выбран диапазон 0÷20 мА
P0777 – параметр масштабирования ЦАП по горизонтальной оси - X1 (%)	P0777= -10% , предельное отрицательное значение обрабатываемого входного сигнала частоты вращения (в % от базовой величины – 50 Гц), выбранная граница соответствует частоте -5Гц.
P0778 - параметр масштабирования ЦАП по вертикальной оси - Y1 (мА)	P0778=0 , значение выходного сигнала ЦАП в мА, соответствующее предельному отрицательному значению обрабатываемого входного сигнала частоты вращения двигателя – P0777.
P0779 – параметр масштабирования ЦАП по горизонтальной оси –X2 (%)	P0779= +10% , предельное положительное значение обрабатываемого входного сигнала частоты вращения (в % от базовой величины – 50 Гц), выбранная граница соответствует частоте +5Гц.
P0780 - параметр масштабирования ЦАП по вертикальной оси – Y2 (мА)	P0780=20 , значение выходного сигнала ЦАП в мА, соответствующее предельному положительному значению обрабатываемого входного сигнала частоты вращения двигателя – P0779.
P0781 – ширина зоны нечувствительности ЦАП (мА)	P0781=0 , зона нечувствительности отсутствует.

Наличие внутреннего контура тока позволяет эффективно поддерживать скорость двигателя даже в тяжелых условиях работы передаточного механизма на открытом воздухе, что выгодно отличает предложенную систему позиционирования от системы на базе шагового двигателя.

Коэффициенты ПИ-регуляторов тока и скорости настраиваются в процессе запуска подпрограмм самонастройки преобразователя частоты, и при необходимости могут быть скорректированы пользователем. Параметры внутреннего задатчика интенсивности (P1120 и P1121 – время разгона и торможения соответственно) должны быть обнулены, поскольку характер изменения скорости задается задатчиком положения контура позиционирования (Рисунок 3.4).

Поворот фотоэлектрического модуля вокруг наклонной оси осуществляется посредством асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором – Siemens1LA7073-6AA10. Паспортные данные двигателя приведены в таблице. 3.6.

Таблица 3.6 – Паспортные данные асинхронного двигателя - Siemens1LA7073-6AA10

Параметр	Значение
Напряжение, В Δ/У	230/400
Фазность	3-фазный
Частота тока, Гц	50
Номинальная мощность, кВт	0,25
Номинальная частота вращения, об/мин	860
Класс защиты устройства, IP	IP 55
Коэффициент мощности	0,76
КПД, %	61,9
Потребляемый номинальный ток, А Δ/У	1,37/0,79

Измерение тока фотоэлектрического модуля осуществляется при помощи датчика тока на основе эффекта Холла – LEM LA 25-NP. Он обеспечивает гальваническую развязку между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями. Этот датчик тока имеет ряд преимуществ, а именно: быстродействующий выход, высокую точность, очень хорошую линейность, низкий температурный дрейф, оптимизированное время отклика, широкий диапазон частот, малые потери, высокую устойчивость к внешним помехам и большую перегрузочную способность.

Датчик тока LEM LA 25-NP питается напряжением $\pm 15\text{В}$. Схема его подключения представлена на рисунке 3.16.

Вторичная цепь

Вывод + : напряжение питания + 15 В

Вывод М : измерительный

Вывод - : напряжение питания - 15 В

Подключение

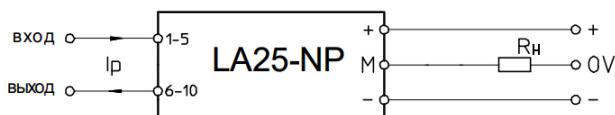


Рисунок 3.16 – Схема подключения датчика тока LEM LA 25-NP

Характеристики датчика тока LEM LA 25-NP представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Технические характеристики датчика тока LEM LA 25-NP

Параметр	Значение
Номинальный входной ток I_{PN} , А	от 5-25
Диапазон преобразования I_P , А	± 36
Номинальный аналоговый выходной ток I_{SN} , мА	25
Сопротивление нагрузочного резистора R_H (при $\pm 15\text{ В}$), Ом	при $\pm 25\text{ А}$, 100-320 при $\pm 36\text{ А}$, 100-190
Коэффициент преобразования K_N	1-2-3-4-5:1000
Напряжение питания ($\pm 5\%$) U_C , В	± 15
Ток потребления I_{CMA}	$10 + I_S$
Электрическая прочность изоляции U_d (50 Гц, 1 мин), кВ	2,5
Рабочее напряжение U_b , В	600
Точность преобразования при I_{PN} (при $T_A=25^\circ\text{C}$), %	$\pm 0,5$
Рабочая температура T_A , $^\circ\text{C}$	от -40 до +85

Сопротивление R_H датчика тока подбирается таким образом, чтобы при токе первичной цепи 5 А датчик выдавал напряжение 5 В ($R_H=200\text{ Ом}$), которое далее при помощи АЦП преобразуется в цифровую величину 4095 единиц. Таким образом, коэффициент передатчика датчика тока вместе с каналом АЦП определяется как отношение $4095/5$.

Взаимосвязи управляющего контроллера с датчиками и исполнительными устройствами системы ориентирования показаны на схеме электрических соединений, которая приводится на рисунке 3.17. На схеме также показаны адреса входных и выходных сигналов, используемые в программе управления.

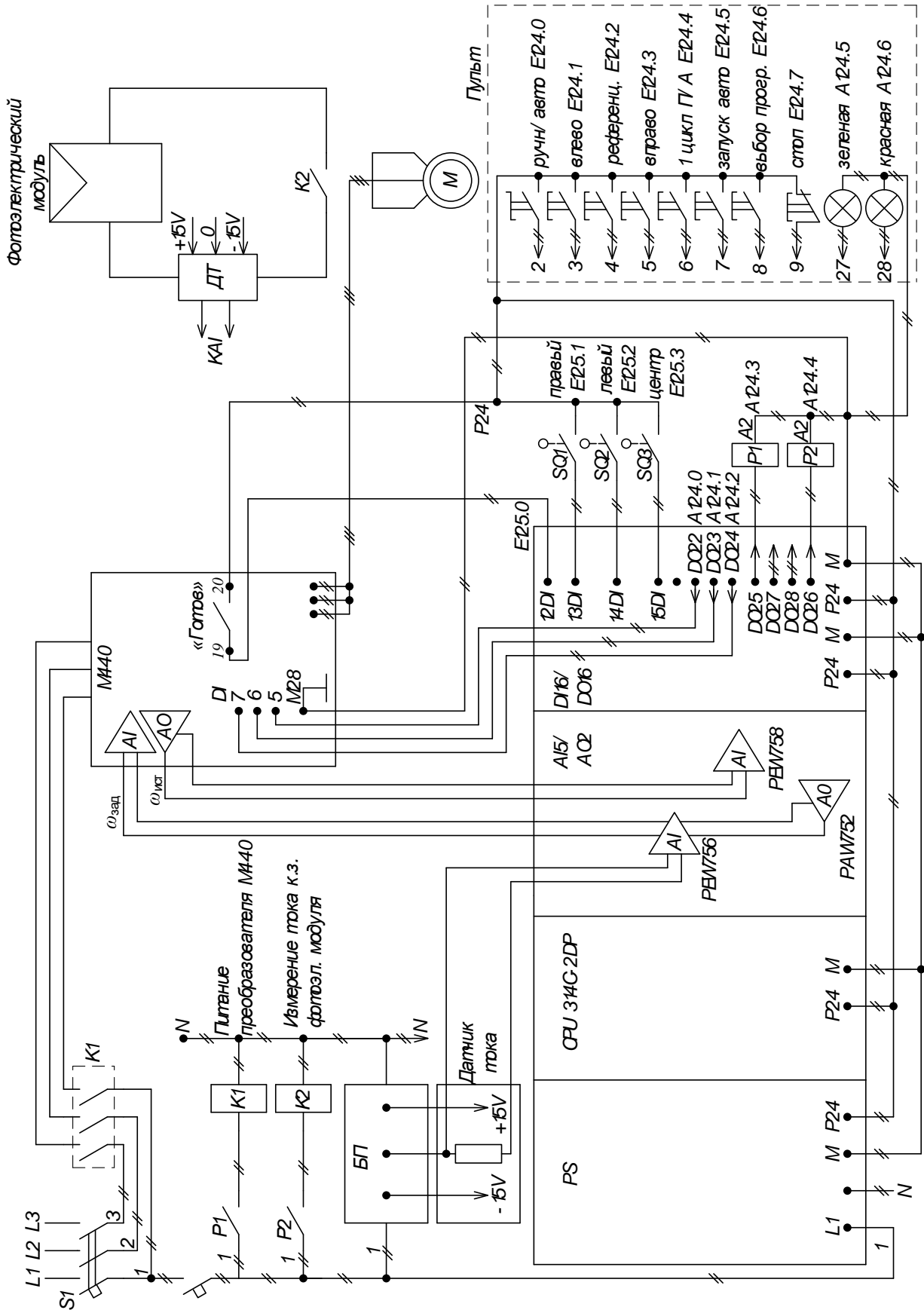


Рисунок 3.17 – Схема электрических соединений управляющего контроллера с пультом управления, датчиками и исполнительными устройствами системы ориентирования

3.1.4 Экспериментальная оценка работоспособности метода энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля

Проверка правильности предложенной методики проводилась на экспериментальном стенде 27 октября в ясный безоблачный день на открытой площадке при отсутствии затенения. Интервал проведения измерительных циклов составлял 10 минут. Результаты регистрации угла поворота модуля в точке максимальной мощности – φ_{max} и в расчетной оптимальной точке – φ_{opt} приведены на рисунке 3.18.

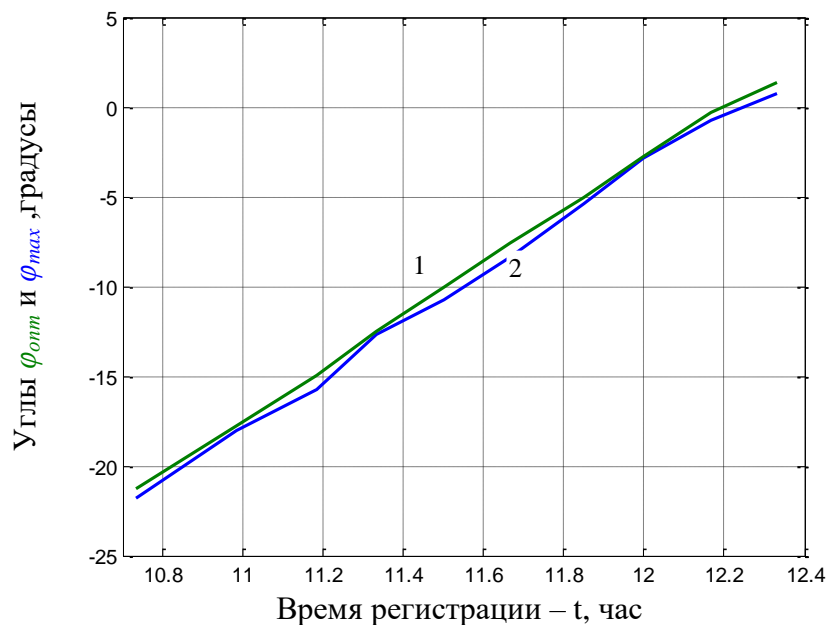


Рисунок 3.18 – Зарегистрированные значения угла поворота модуля: 1 – в расчетной оптимальной точке – φ_{opt} , 2 – в точке максимальной мощности – φ_{max}

Рисунок показывает, что отличие значения расчетного оптимального угла поворота модуля – φ_{opt} и значения угла поворота в точке максимальной мощности не превышает 1° , т.е. они практически совпадают на полуторачасовом измерительном интервале [73]. Небольшая разница между этими углами может быть объяснена погрешностью при работе АЦП контроллера, которая по данным производителя может составлять около 1 %.

Значения плотности мощности солнечного излучения, зарегистрированной на поверхности фотоэлектрического модуля в трех позициях: при фиксированной ориентации на юг ($\varphi=0^\circ$), в расчетной позиции ($\varphi=\varphi_{opt}$) и в позиции достижения максимальной мощности ($\varphi=\varphi_{max}$) приведены на рисунке 3.19.

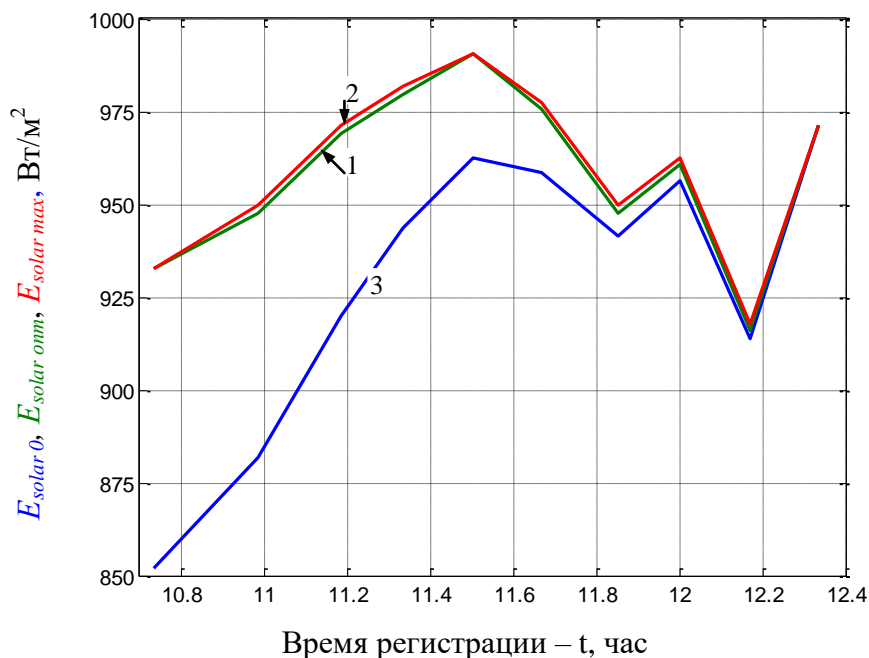


Рисунок 3.19 – Зарегистрированные значения плотности мощности модуля: 1 – в расчетной оптимальной точке – $E_{solar opt}$, 2 – в точке максимальной мощности – $E_{solar max}$, 3 – при фиксированной ориентации на юг – $E_{solar 0}$

Рисунок 3.19 показывает, что значения плотности мощности в расчетной точке – $E_{solar opt}$ и в точке максимальной мощности – $E_{solar max}$ так же практически совпадают, однако они могут быть существенно больше мощности фиксированно закрепленного модуля с ориентацией на юг – $E_{solar 0}$ при значительном отклонении солнца от южного направления.

Результаты исследования, показанные на рисунках 3.18 и 3.19, позволяют утверждать, что для ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечной энергии в ясную солнечную погоду, нет необходимости применять алгоритм трекера максимальной мощности, а достаточно воспользоваться формулой (3.4), которая на основании углов положения солнца и угла наклона оси вращения модуля позволит рассчитать оптимальный угол

поворота модуля – φ_{opt} . Углы положения солнца: α_c – азимут Солнца и γ_c – угол высоты Солнца над горизонтом рассчитываются на основании данных системного таймера и географических параметров местности установки модуля. Исключение алгоритма трэкера максимальной мощности позволит снизить энергозатраты на работу позиционного привода поворота модуля.

Будут ли приведенные утверждения так же справедливы для облачной погоды, когда положение светового пятна на небе может смещаться за счет рассеяния и отражения облаками, потребует дальнейших исследований.

После сделанных выводов остается выяснить, с какой периодичностью система ориентирования должна включаться и поворачивать модуль вслед за перемещающимся по небосклону Солнцем, чтобы с одной стороны избежать частых включений, а с другой стороны получать практически максимальную энергию от светового потока. Для решения этой задачи была использована способность системы регистрации записывать значения мощности модуля и угол его поворота с интервалом 20 ms прямо во время перемещения модуля в процессе измерительного цикла. График зависимости мощности модуля от угла его поворота, снятый во время движения, приведен на рисунке 3.20.

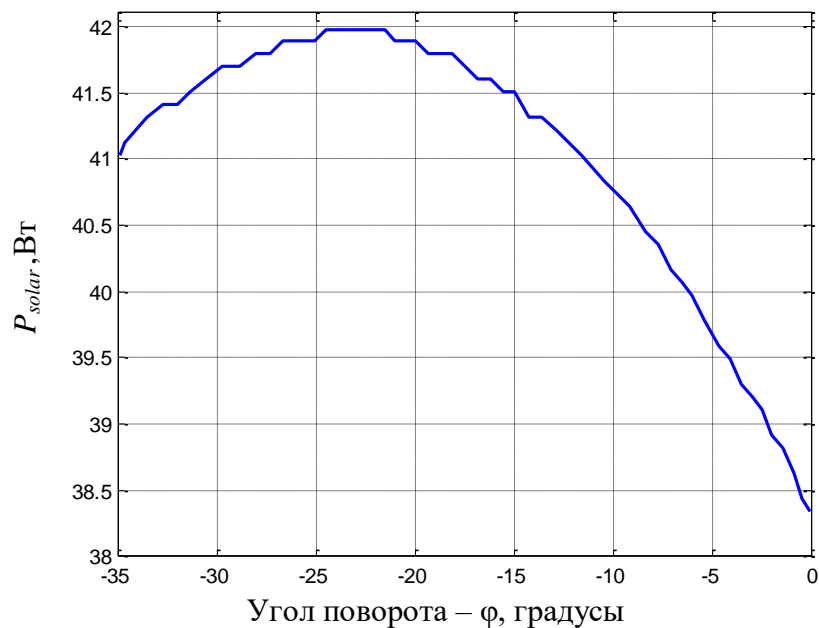


Рисунок 3.20 – График зависимости мощности модуля от угла его поворота

Пиковое значение мощности на рисунке 3.20 соответствует наилучшему с точки зрения энергоэффективности углу поворота модуля – φ_{opt} . На графике видно, что отклонение мощности на 1% от пикового значения достигается при отклонении угла поворота модуля от оптимального значения на 7° . На рисунке 3.18 можно увидеть, что на 7° Солнце перемещается приблизительно за 0,5 часа. Отсюда можно сделать заключение о том, что если установить предел снижения мощности фотоэлектрического модуля за счет дискретности процесса слежения за Солнцем на уровне 1%, то включать систему ориентирования и подворачивать модуль вслед за солнцем нужно не реже, чем каждые полчаса [73]. Это и будет оптимальной периодичностью включения системы ориентирования.

Материалы проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что энергоэффективный метод управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля заключается в формировании заданного угла поворота модуля в соответствии с законом, определяемым формулой (3.4), с периодичностью включения системы ориентирования – 0,5 часа. Для вычисления оптимального угла поворота модуля достаточно данных системного таймера контроллера и географических координат местности. В безоблачную погоду этот метод позволяет исключить использование трекера максимальной мощности, что снижает затраты энергии на работу позиционного привода в процессе трекинга. Предложенный метод энергоэффективного управления позволяет достичь максимальной эффективности использования фотоэлектрического модуля в течении светового дня.

3.2 Теоретическая оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей за счет применения систем ориентирования

Для проведения оценки энергоэффективности фотоэлектрического модуля необходимо воспользоваться методикой расчета глобальной плотности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную плоскость фотоэлектрического модуля в течении светового дня, предложенной в [23, с. 65].

Согласно этой методике глобальная плотность потока солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность модуля – $E_{Г,накл}$, состоит из суммы прямой – $E_{пр,накл}$, диффузной – $E_{дифф,накл}$ и отраженной от земной поверхности – $E_{отр,накл}$ составляющих компонент солнечного излучения.

$$E_{Г,накл} = E_{пр,накл} + E_{дифф,накл} + E_{отр,накл} . \quad (3.19)$$

Для горизонтальной поверхности модуля отраженная от земной поверхности компонента – $E_{отр,накл}$ будет отсутствовать.

Для оценки изменения плотности солнечного излучения, падающего на поверхность модуля в течение светового дня (то есть от восхода до захода Солнца по местному времени) необходимо определить время захода и восхода Солнца [89]. Местное время захода Солнца определим по формуле

$$t_{зах} = \frac{1}{15} \cdot [\arccos(-tg\psi \cdot tg\delta) - (\lambda - \lambda_{ср})] + \Delta t_{декр} - t_{вр} + 12, \quad (3.20)$$

где $\lambda_{ср}$ – долгота среднего меридиана рассматриваемого часового пояса, градусы; $\Delta t_{декр}$ – поправка на декретное время, часы; ψ , λ – широта и долгота рассматриваемой местности, градусы;

Местное время восхода Солнца определим по формуле

$$t_{восх} = t_{зах} - \frac{2}{15} \cdot \arccos(-tg\psi \cdot tg\delta) . \quad (3.21)$$

В дальнейшем, для оценки плотности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность, потребуется вычисление плотности потока солнечного излучения, поступающего на горизонтальную земную поверхность. Глобальная плотность потока излучения – $E_{Г,гор}$ на горизонтальной поверхности состоит из плотности потока прямого излучения – $E_{пр,гор}$ и плотности потока диффузного излучения – $E_{дифф,гор}$.

$$E_{Г,гор} = E_{пр,гор} + E_{дифф,гор} . \quad (3.22)$$

Плотность потока прямого и диффузного солнечного излучения на горизонтальной поверхности определяются на основании угла падения солнечного излучения на горизонтальную поверхность – $\theta_{гор}$ и различных коэффициентов пропускания по методике, предложенной в [89, 90].

Плотность потока прямого излучения на горизонтальной поверхности определяется по следующей формуле

$$E_{пр,гор} = E_0 \cdot \cos \theta_{гор} \cdot \tau_R \cdot \tau_O \cdot \tau_G \cdot \tau_{H2O} \cdot \tau_A \cdot K_{гор}, \quad (3.23)$$

где $E_0=1365,4\pm 1,3$ – солнечная постоянная, Вт/м²; $K_{гор}$ – поправочный коэффициент ($K_{гор}=1,14$ зимой, и $K_{гор}=0,91$ летом); τ_R – коэффициент пропускания, учитывающий рэлеевское рассеяние; τ_A – коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние; τ_O – коэффициент пропускания, учитывающий поглощение солнечного излучения озоном; τ_G – коэффициент пропускания, учитывающий поглощение солнечного излучения газовой смесью; τ_{H2O} – коэффициент пропускания, учитывающий поглощение солнечного излучения парами воды.

Плотность потока диффузного излучения на горизонтальной поверхности определяется по следующей формуле

$$E_{дифф,гор} = E_0 \cdot \cos \theta_{гор} \cdot \tau_O \cdot \tau_G \cdot \tau_{H2O} \cdot \tau_{AA} \cdot \frac{0,5 \cdot (1 - \tau_R) + B_a \cdot (1 - \tau_{AS})}{1 - M + M^{1,02}}, \quad (3.24)$$

где τ_{AA} – коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние; τ_{AS} – коэффициент поглощения, учитывающий рассеяние частицами сухого воздуха; B_a – отношение рассеянного прямого излучения к общему рассеянному излучению.

При этом, угол падения солнечного излучения на горизонтальную поверхность – $\theta_{гор}$ можно рассчитать непосредственно на основании угла высоты Солнца над горизонтом – γ_C по формуле

$$\theta_{гор} = 90^\circ - \gamma_C. \quad (3.25)$$

Участвующие в формулах различные коэффициенты пропускания вычисляются с учетом воздушной массы, через которую проходит световой поток, достигая поверхности земли. Формулы расчета этих коэффициентов в программном пакете Matlab приводятся в приложении В (программа В.1).

Далее на основании угла падения солнечного излучения на наклонную поверхность – $\theta_{\text{накл}}$ и плотности потока прямого излучения на горизонтальной поверхности – $E_{\text{пр,гор}}$ можно определить плотность потока солнечного излучения на наклонной поверхности по формуле

$$E_{\text{пр,накл}} = E_{\text{пр,гор}} \cdot \cos \theta_{\text{накл}} . \quad (3.26)$$

При этом угол падения солнечного излучения на наклонную поверхность – $\theta_{\text{накл}}$, который является углом между вектором s в направлении Солнца и нормальным вектором n плоскости, можно рассчитать на основании углов положения солнца – γ_C и α_C и углов расположения наклонной площадки относительно поверхности земли – γ_E и направления на север – α_E , (Рисунок 3.21).

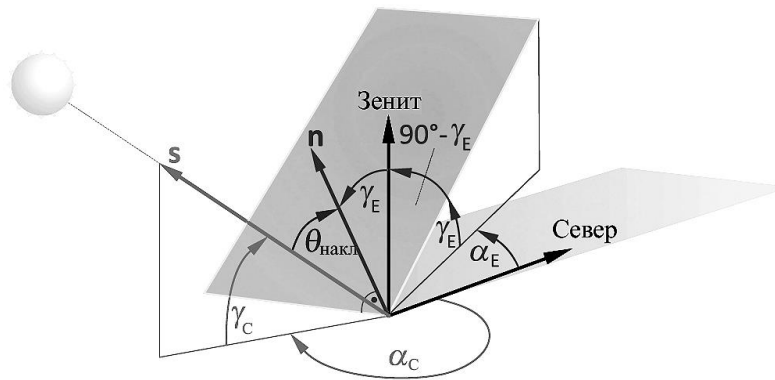


Рисунок 3.21 – Изображение падения солнечных лучей на наклонную площадку

Расчет угла $\theta_{\text{накл}}$ происходит по формуле

$$\theta_{\text{накл}} = \arccos(-\cos \gamma_C \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos(\alpha_C - \alpha_E) + \sin \gamma_C \cdot \cos \gamma_E), \quad (3.27)$$

где γ_E – наклон площадки по отношению к земной поверхности, градусы; α_E – отклонение оси ориентированной поверхности от ориентации на север, градусы.

Используя модель Клюкера, можно рассчитать плотность потока диффузного излучения на наклонной поверхности по формуле

$$E_{\text{дифф,накл}} = E_{\text{дифф,гор}} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E) \cdot \left(1 + F \cdot \sin^3 \frac{\gamma_E}{2} \right) \cdot (1 + F \cdot \cos^2 \theta_{\text{накл}} \cdot \cos^2 \gamma_C), \quad (3.28)$$

где $F = 1 - (E_{\text{дифф,гор}} / E_{\text{Г,гор}})^2$ – коэффициент ясности неба.

Отраженное от поверхности Земли излучение $E_{\text{отр,накл}}$ рассчитывается по следующей формуле с учетом коэффициента Альбеда

$$E_{\text{отр,накл}} = E_{\text{Г,гор}} \cdot \frac{A}{2} \cdot (1 - \cos \gamma_E). \quad (3.29)$$

Расчет энергии, поступающей на поверхность фотоэлектрического модуля, по приведенной выше методике проводился для четырех различных способов ориентации модуля по отношению к потоку солнечного излучения:

– Первый способ подразумевает фиксированное расположение модуля в течении светового дня с неизменным углом наклона – γ_E по отношению к земной поверхности и ориентацией на юг.

– Второй способ подразумевает применение одноосной системы азимутального ориентирования, при которой модуль, наклоненный на фиксированный угол – γ_E по отношению к поверхности земли вращается относительно вертикальной оси. При этом система управления поддерживает значение угла отклонения модуля от ориентации на север – α_E исходя из соотношения – $\alpha_E = \alpha_C + 180^\circ$ для ориентации на наибольший поток излучения.

– Третий способ подразумевает применение одноосной системы ориентирования с наклонной осью, которая при повороте модуля за счет одного привода позволяет одновременно изменять как угол отклонения модуля от ориентации на север – α_E , так и угол наклона модуля по отношению к поверхности земли – γ_E . При этом система управления поддерживает минимальное значение угла $\theta_{\text{накл}}$, который определяется выражением

$$\theta_{накл} = \arccos[\cos \varphi \cdot (\sin \gamma_C \cdot \sin \beta - \cos \gamma_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \beta) - \cos \gamma_C \cdot \sin \alpha_C \cdot \sin \varphi]. \quad (3.30)$$

Поддержание минимального угла $\theta_{накл}$ происходит за счет поворота полудиска на оптимальный угол $\varphi_{опт}$, который вычисляется по нижеследующей формуле, исходя из условия ориентации на наибольший поток солнечного излучения [73]

$$\varphi_{опт} = \arccos \left(\frac{\sin \gamma_C \cdot \sin \beta - \cos \gamma_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \beta}{\sqrt{(\sin \gamma_C \cdot \sin \beta - \cos \gamma_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \beta)^2 + (\cos \gamma_C \cdot \sin \alpha_C)^2}} \right), \quad (3.31)$$

где β – угол наклона плоскости полудиска к земной поверхности (Рисунок 3.2).

– Четвертый способ подразумевает применение двухосной системы азимутального и зенитального ориентирования, при которой модуль может вращаться при помощи двух независимых приводов относительно вертикальной и горизонтальной осей. При этом система управления поддерживает значение угла отклонения модуля от ориентации на север – α_E исходя из соотношения $\alpha_E = \alpha_C + 180^\circ$, а значение угла наклона модуля по отношению к поверхности земли – γ_E в соответствии с формулой $\gamma_E = 90^\circ - \gamma_C$ для ориентации на максимальный поток излучения;

Для проведения расчета использовались следующие исходные данные: широта и долгота местности г. Донецк (широта – $\psi=48^\circ$, долгота – $\lambda=37,8^\circ$), долгота среднего меридиана рассматриваемого часового пояса – $\lambda_{ср}=30^\circ$, часовой пояс – ЧП=3, поправка на декретное время – $\Delta t_{декр}=1$, солнечная постоянная – $E_0=1367 \text{ Вт/м}^2$, коэффициент Альбеда – $A=0,2$.

В результате расчета, для любого выбранного дня в году, можно получить графики зависимости глобальной плотности потока солнечного излучения от времени в диапазоне от $t_{восх}$ до $t_{зах}$ для четырех выше указанных способов ориентации модуля по отношению к потоку солнечного излучения.

Пример такого графика для дня 15 июня при фиксированном значении угла $\gamma_E=48^\circ$, который остается неизменным для первого и второго способов ориентации солнечного модуля, приводится на рисунке 3.22.

Рисунок 3.22 демонстрирует, что плотность солнечной энергии на поверхности ориентируемого модуля существенно выше, чем у жестко закрепленного модуля с ориентацией на юг [91, 92]. Наибольший прирост энергии дает в этом случае, конечно же, двухосная система ориентирования (красная линия на графике), поскольку она постоянно обеспечивает перпендикулярное попадание солнечных лучей на поверхность модуля.

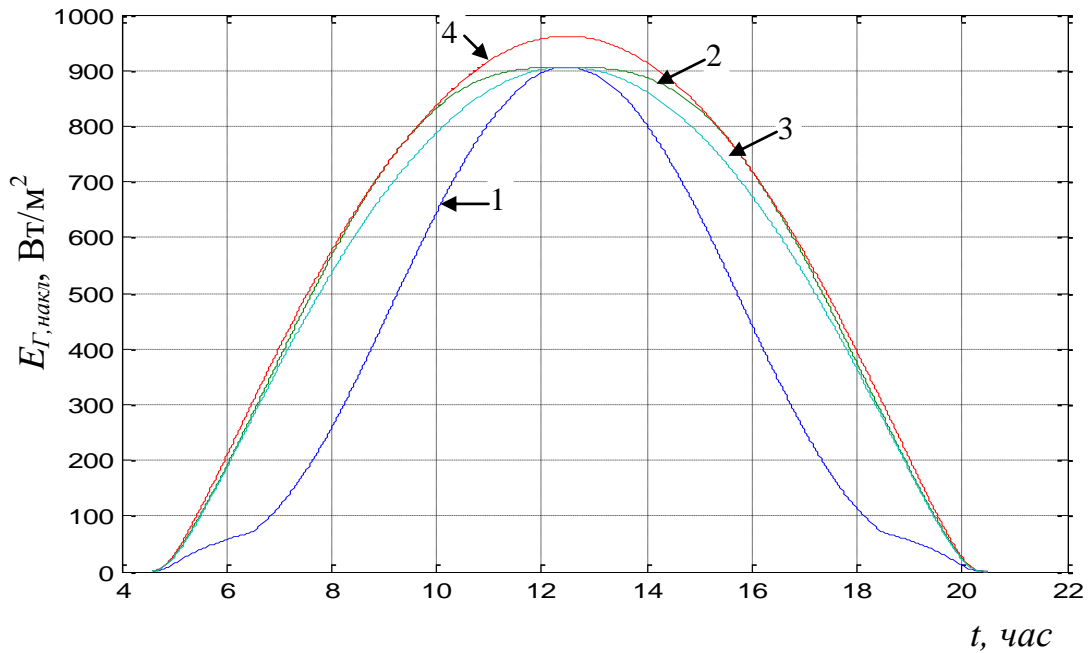


Рисунок 3.22 – Графики зависимости глобальной плотности потока солнечного излучения, поступающего на поверхность модуля, от времени суток для четырех различных способов ориентации: 1 – фиксированная наклонная поверхность, 2 – одноосная азимутально-ориентированная, 3 – одноосная с наклонной осью, 4 – двухосная азимутально и зенитально-ориентированная

Суточное поступление энергии солнечного излучения на 1 м² поверхности фотоэлектрического модуля можно вычислить по формуле

$$W_{Г,накл,сут} = \int_{t_{восх}}^{t_{зах}} E_{Г,накл}(t) dt . \quad (3.32)$$

Для упрощения расчета суточного поступление энергии солнечного излучения можно воспользоваться формулой приближенного расчета значения

интеграла, без существенной потери точности, при условии, что вычисления плотности потока производятся с интервалом в 1 минуту [93]

$$W_{Г,накл,сут} \approx \frac{1}{60} \cdot \sum_{i=1}^n E_{Г,накл}(t_i), \quad (3.33)$$

где n – количество расчетных значений.

Поскольку в течении каждого месяца суточное поступление энергии солнца на поверхность модуля изменяется, целесообразно рассчитать среднемесячное суточное значение энергии на 1 м^2 поверхности модуля по формуле.

$$W_{Г,накл,сут_ср} = 0.001 \cdot \frac{1}{k} \cdot \sum_1^k W_{Г,накл,сут}, \quad (3.34)$$

где k – число дней в месяце; $W_{Г,накл,сут_ср}$ - среднемесячное суточное значение энергии на 1 м^2 поверхности модуля, (кВт·ч/м²)/день.

Программы расчета суточного и среднемесячного суточного поступления энергии солнечного излучения на 1 м^2 поверхности модуля в программном пакете Matlab приведены в приложении В, программы В.2, В.3 соответственно.

Полученные в результате расчета среднемесячные значение суточной энергии, поступающей на поверхность модуля при четырех различных способах ориентации, были сведены в таблицу 3.8 для дальнейшего сравнительного анализа. Значения в скобках в таблице показывают коэффициент прироста энергии относительно фиксированного модуля.

Результаты вычислений, приведенные в таблице 3.8, продемонстрированы в виде столбцовой диаграммы на рисунке 3.23.

Таблица 3.8 – Расчетные среднемесячные значение суточной энергии ($(кВт \cdot ч/м^2)/день$), поступающей на поверхность модуля при четырех различных способах ориентации (при $\gamma_E=48^\circ$ для 1-го и 2-го способов и $\beta=90^\circ - \gamma_E$ для 3-го способа)

Месяц	Январь дни 1÷31	Февраль дни 32÷59	Март дни 60÷90	Апрель дни 91÷120	Май д. 121÷151	Июнь д. 152÷181
$\gamma_{\text{центр}}$	20,7°	28,7°	39,5°	51,4°	60,6°	65,3°
γ_E способы 1 и 2	48°	48°	48°	48°	48°	48°
$W_{\text{фикс_ср}}$	2,0	3,21	4,23	5,49	6,2	6,44
$W_{\text{азим_ср}}$	2,15 (1,08)	3,57 (1,11)	4,96 (1,17)	6,9 (1,26)	8,32 (1,34)	8,97 (1,39)
$W_{\text{нак_ось_ср}}$	2,20 (1,1)	3,67 (1,14)	5,07 (1,2)	6,93 (1,26)	8,16 (1,32)	8,65 (1,34)
$W_{\text{зен_аз_ср}}$	2,32 (1,16)	3,76 (1,17)	5,08 (1,2)	7,0 (1,28)	8,52 (1,37)	9,24 (1,43)
$k \cdot W_{\text{фикс_ср}}$	62	89,9	131,1	164,7	192,2	193,2
$k \cdot W_{\text{азим_ср}}$	66,7	99,9	153,8	207	257,9	269,1
$k \cdot W_{\text{нак_ось_ср}}$	68,2	102,8	157,2	207,9	253	259,5
$k \cdot W_{\text{зен_аз_ср}}$	71,9	105,3	157,5	210	264,1	277,2

Месяц	Июль д. 182÷212	Август д. 213÷243	Сентябрь д. 244÷273	Октябрь д. 274÷304	Ноябрь д. 305÷334	Декабрь д. 335÷365
$\gamma_{\text{центр}}$	63,7°	56,4°	45,6°	34°	23,9°	18,9°
γ_E способы 1 и 2	48°	48°	48°	48°	48°	48°
$W_{\text{фикс_ср}}$	6,36	5,87	4,86	3,44	2,42	1,68
$W_{\text{азим_ср}}$	8,72 (1,37)	7,61 (1,3)	5,87 (1,21)	3,91 (1,14)	2,63 (1,09)	1,79 (1,07)
$W_{\text{нак_ось_ср}}$	8,47 (1,33)	7,56 (1,29)	5,97 (1,23)	4,01 (1,17)	2,71 (1,12)	1,84 (1,1)
$W_{\text{зен_аз_ср}}$	8,96 (1,41)	7,75 (1,32)	5,98 (1,23)	4,05 (1,18)	2,82 (1,16)	1,96 (1,17)
$k \cdot W_{\text{фикс_ср}}$	197,2	182	145,8	106,6	72,6	52,1
$k \cdot W_{\text{азим_ср}}$	270,3	235,9	176,1	121,2	78,9	55,5
$k \cdot W_{\text{нак_ось_ср}}$	262,6	234,4	179,1	124,3	81,3	57
$k \cdot W_{\text{зен_аз_ср}}$	277,8	240,2	179,4	125,5	84,6	60,8

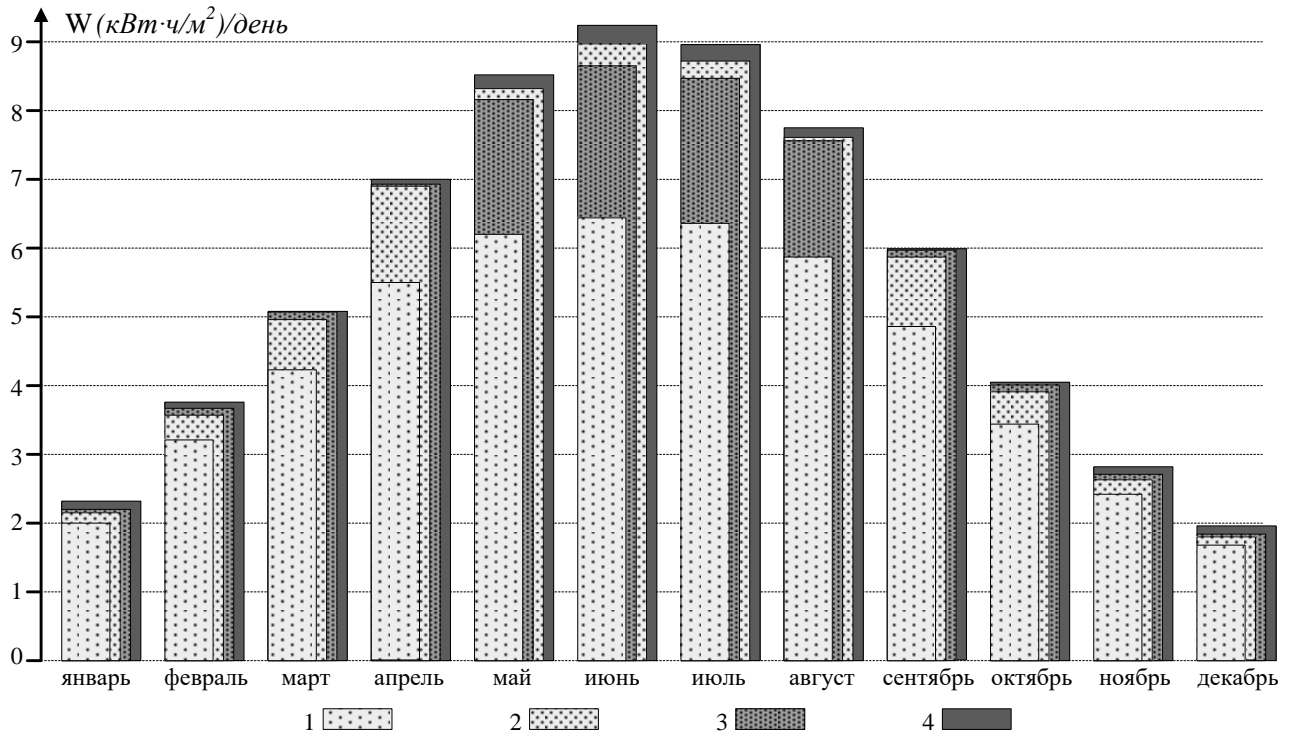


Рисунок 3.23 – Расчетные среднемесячные значение суточной энергии на поверхности модуля (Таблица 3.8) для: 1 – фиксированного модуля, 2 – одноосной азимутальной, 3 – одноосной с наклонной осью, 4 – двухосной систем

Необходимо отметить, что в процессе расчета, для первого и второго способов ориентации, угол наклона модуля по отношению к поверхности земли – γ_E оставался неизменным ($\gamma_E=48^\circ$ на уровне широты местности г. Донецк), а для третьего и четвертого способов угол γ_E изменялся системой управления по приведенным ранее закономерностям.

Угол высоты солнца – $\gamma_{C \text{ центр}}$, приводится в таблице на 15 (центральное) число каждого месяца (для февраля 14 число). Поскольку в течении года угол γ_C существенно изменяется, целесообразно оценить расчетные среднемесячные значение суточной энергии, поступающей на поверхность модуля, для случая когда при 1-ом и 2-ом способах ориентации значение угла γ_E будет устанавливаться один раз в месяц, в соответствии с закономерностью $\gamma_E = 90^\circ - \gamma_{C \text{ центр}}$, а при третьем способе ориентации (для системы с наклонной осью) угол наклона полудиска к земной поверхности – β будет устанавливаться так же один раз в месяц на уровне $\beta = \gamma_{C \text{ центр}}$. Расчетные данные для описанного выше случая сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Расчетные среднемесячные значение суточной энергии ((кВт·ч/м²)/день), поступающей на поверхность модуля при четырех различных способах ориентации (при $\gamma_E = 90^\circ - \gamma_{C \text{ центр}}$ для 1-го и 2-го способов и $\beta = \gamma_{C \text{ центр}}$ для 3-го)

Месяц	Январь дни 1÷31	Февраль дни 32÷59	Март дни 60÷90	Апрель дни 91÷120	Май д. 121÷151	Июнь д. 152÷181
$\gamma_{\text{центр}}$	20,7°	28,7°	39,5°	51,4°	60,6°	65,3°
γ_E способы 1 и 2	69,3°	61,3°	50,5°	38,6°	29,4°	24,7°
$W_{\text{фикс_ср}}$	2,14	3,31	4,24	5,56	6,59	7,1
$W_{\text{азим_ср}}$	2,32 (1,08)	3,73 (1,13)	4,99 (1,18)	6,74 (1,21)	8,0 (1,21)	8,55 (1,2)
$W_{\text{нак_ось_ср}}$	2,32 (1,08)	3,75 (1,14)	5,07 (1,2)	6,98 (1,26)	8,44 (1,28)	9,12 (1,28)
$W_{\text{зен_аз_ср}}$	2,32 (1,08)	3,76 (1,14)	5,08 (1,2)	7,0 (1,26)	8,52 (1,29)	9,24 (1,3)
$k \cdot W_{\text{фикс_ср}}$	66,34	92,7	131,4	166,8	204,3	213
$k \cdot W_{\text{азим_ср}}$	71,92	104,4	154,7	202,2	248	256,5
$k \cdot W_{\text{нак_ось_ср}}$	71,92	105	157,2	209,4	261,6	273,6
$k \cdot W_{\text{зен_аз_ср}}$	71,92	105,3	157,5	210	264,1	277,2

Месяц	Июль д. 182÷212	Август д. 213÷243	Сентябрь д. 244÷273	Октябрь д. 274÷304	Ноябрь д. 305÷334	Декабрь д. 335÷365
$\gamma_{\text{центр}}$	63,7°	56,4°	45,6°	34°	23,9°	18,9°
γ_E способы 1 и 2	26,3°	33,6°	44,4°	56°	66,1°	71,1°
$W_{\text{фикс_ср}}$	6,9	6,07	4,86	3,48	2,55	1,82
$W_{\text{азим_ср}}$	8,33 (1,21)	7,36 (1,21)	5,82 (1,2)	4,0 (1,15)	2,81 (1,1)	1,96 (1,08)
$W_{\text{нак_ось_ср}}$	8,86 (1,28)	7,71 (1,27)	5,97 (1,23)	4,04 (1,16)	2,82 (1,11)	1,96 (1,08)
$W_{\text{зен_аз_ср}}$	8,96 (1,3)	7,75 (1,28)	5,98 (1,23)	4,05 (1,16)	2,82 (1,11)	1,96 (1,08)
$k \cdot W_{\text{фикс_ср}}$	213,9	188,2	145,8	107,9	76,5	56,42
$k \cdot W_{\text{азим_ср}}$	258,2	228,2	174,6	124	84,3	60,76
$k \cdot W_{\text{нак_ось_ср}}$	274,6	239	179,1	125,2	84,6	60,76
$k \cdot W_{\text{зен_аз_ср}}$	277,8	240,2	179,4	125,5	84,6	60,76

Результаты вычислений, приведенные в таблице 3.9, продемонстрированы в виде столбчатой диаграммы на рисунке 3.24.

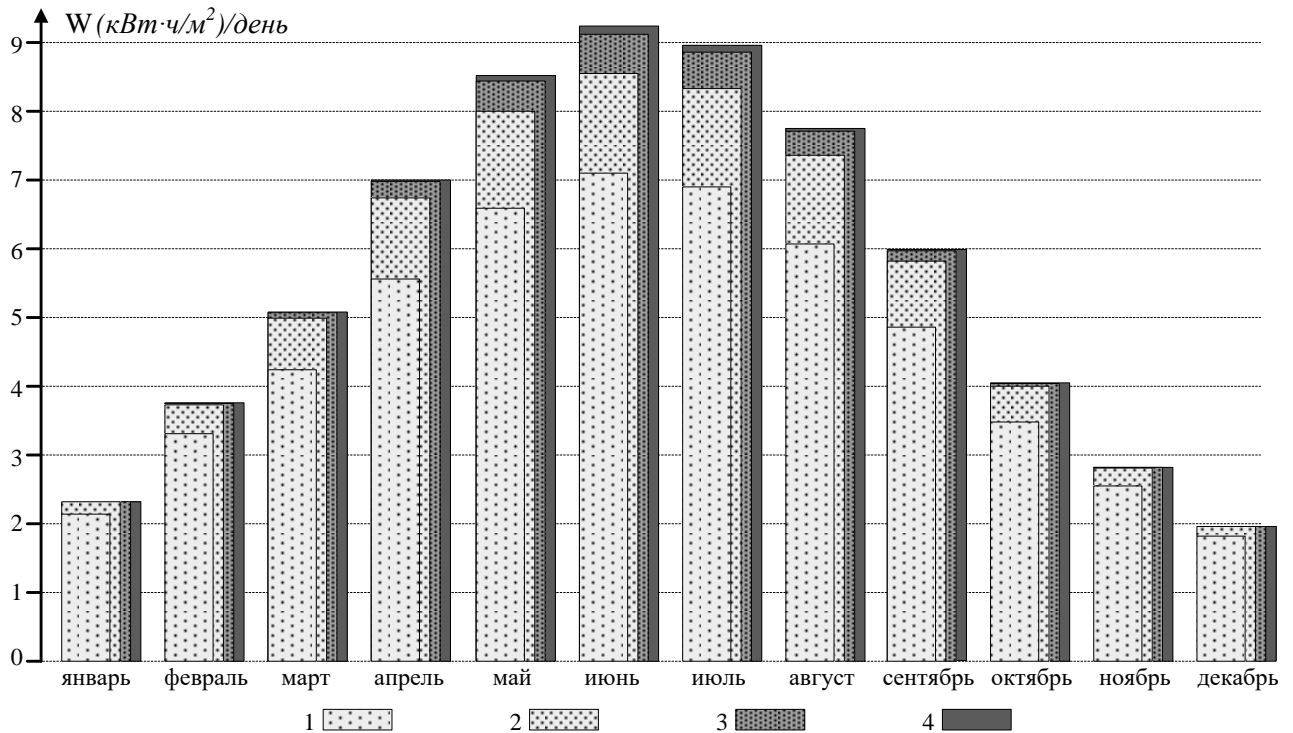


Рисунок 3.24 – Расчетные среднемесячные значение суточной энергии на поверхности модуля (Таблица 3.9) для: 1 – фиксированного модуля, 2 – одноосной азимутальной, 3 – одноосной с наклонной осью, 4 – двухосной систем

Приведенные в таблице 3.9 и на рисунке 3.24 результаты соответствуют тому случаю, когда при нахождении солнца в зените (в полдень) 15-го числа каждого месяца солнечные лучи будут падать строго перпендикулярно поверхности модуля, т.е. $\theta_{накл} = 0^\circ$ для всех систем.

Результирующие годовые значения энергии ($(кВт \cdot ч / м^2) / год$), поступающей на поверхность модуля при четырех различных способах ориентации сведены в таблицу 3.10. В этой таблице кроме годовых значений энергии приводятся также коэффициенты, показывающие кратность увеличения солнечной энергии, поступающей на поверхность модуля, для конкретной системы ориентации. При этом за базовое значение (100 %) принято значение энергии, поступающей на поверхность фиксированно закрепленного модуля, с ориентацией на юг и углом наклона к поверхности земли $\gamma_E = 48^\circ$ (на уровне широты местности $\psi = 48^\circ$).

Таблица 3.10 – Результирующие годовые значения энергии ($(\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2)/\text{год}$), поступающей на поверхность модуля при четырех различных способах ориентации

Способ ориентации	Фиксированный модуль		Азимутальная ориентация		Ориентация с наклонной осью		Двухосная ориентация	
	$W_{\text{фикс}}$ $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ /год	$\frac{W_{\text{фикс}}^*}{W_{\text{фикс}}}$	$W_{\text{азим}}$ $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ /год	$\frac{W_{\text{азим}}}{W_{\text{фикс}}}$	$W_{\text{нак_ось}}$ $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ /год	$\frac{W_{\text{нак_ось}}}{W_{\text{фикс}}}$	$W_{\text{зен_аз}}$ $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ /год	$\frac{W_{\text{зен_аз}}}{W_{\text{фикс}}}$
$\gamma_E=48^\circ$, (сп.1 и 2) $\beta=42^\circ$ (способ 3)	1589,4	-	1992,3	1,25	1987,3	1,25	2054,3	1,29
$\gamma_E^* = 90^\circ - \gamma_{\text{С центр}}$ $\beta = \gamma_{\text{С центр}}$	1663,3	1,05	1967,8	1,24	2042	1,285		

Приведенные в таблице 3.10 расчетные данные показывают, что идеальная с точки зрения энергоэффективности двухосная система ориентирования способна в течении года дать 29 % прироста энергии, поступающей поверхность модуля, по отношению к жестко закрепленному, сориентированному на юг модулю с углом наклона к земной поверхности $\gamma_E=48^\circ$. Одноосная азимутальная (при фиксированном $\gamma_E=48^\circ$) и одноосная с наклонной осью (при фиксированном $\beta=90^\circ - \gamma_E = 42^\circ$) системы ориентирования являются практически равноценными с точки зрения энергоэффективности и способны дать годовой прирост энергии на уровне 25 % по отношению к жестко закрепленному модулю. Одноосная с наклонной осью система ориентирования, с однократно в месяц изменяемым углом наклона полудиска по закону $\beta = \gamma_{\text{С центр}}$, способна дать 28,5 % прироста энергии за год по отношению к жестко закрепленному модулю, т.е эта система по энергоэффективности практически идентична двухосной системе ориентирования. Необходимо отметить, что для системы с наклонной осью однократное в месяц изменение угла наклона полудиска – β , может производиться вручную (без электропривода) при соответствующих конструктивных возможностях установки. И наконец, для фиксировано закрепленного модуля с возможностью однократного в месяц, ручного изменения угла наклона модуля по отношению к поверхности земли по закону $\gamma_E = 90^\circ - \gamma_{\text{С центр}}$, можно добиться 5 % годового прироста энергии по отношению к жестко закрепленному модулю с неизменным углом γ_E .

Необходимо так же отметить, что приведенные в таблицах 3.8, 3.9, 3.10 результаты расчетов предусматривают беспрепятственное попадание солнечных лучей на поверхность модуля, что возможно только в случае абсолютно чистого, безоблачного неба. При наличии облаков показатели среднесуточного значения энергии, поступающей на поверхность модуля, конечно же, могут измениться, но в этом случае теоретический расчет практически невозможен, поскольку плотность солнечного излучения будет зависеть от плотности облачного покрова. Поэтому в условиях облачности возможна только экспериментальная оценка значения суточной энергии, поступающей на поверхность фотоэлектрического модуля с использованием экспериментальной установки.

3.3 Выводы по разделу 3

Проведенные в этом разделе исследования позволили разработать методику энергоэффективного управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля, 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. Разработанная методика позволяет исключить применение трэкера максимальной мощности [94] и снизить тем самым энергозатраты на работу позиционного привода.

В случае чистого неба применение разработанной методики для системы ориентирования с неизменным углом наклона оси вращения позволяет увеличить 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. Приведенные показатели повышения энергоэффективности подтверждают целесообразность применения микропроцессорной системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля на базе программируемого логического контроллера.

РАЗДЕЛ 4

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ
УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

4.1 Рекомендации по практическому применению усовершенствованных систем управления ветрогенераторными установками

По результатам исследований, проведённых в диссертационной работе применительно к системам управления ветрогенераторными установками, были выработаны следующие практические рекомендации.

В устройстве управления ветрогенераторной установкой должно содержаться несколько программ управления, применительно к разным режимам ее работы: пуск, частичная нагрузка генератора, ограничение мощности генератора (полная нагрузка).

В режиме пуска система управления должна формировать управляющие сигналы для позиционного привода pitch-угла лопасти и системы векторного регулирования момента генератора в зависимости от значения текущей быстроходности ветроколеса в соответствии с предложенной в работе временной диаграммой формирования сигналов управления (Рисунок 2.30). Вычисление текущей быстроходности обеспечивается за счет сигналов датчика скорости вращения ветроколеса и датчика скорости ветра. При этом, в случае формирования задания на момент генератора в зависимости от скорости его вращения, в соответствии с формулой (2.36), возможна генерация электроэнергии генератором уже на этапе пуска, начиная с небольших значений быстроходности ($\lambda \geq 0,55$). Выход из программы управления пуском, в случае непосредственного перехода от пускового режима к режиму полной нагрузки, должен инициироваться датчиком скорости генератора при достижении ею заданного значения, это будет означать включение в работу контура регулирования

скорости вращения ветроколеса. При переходе из пускового режима в режим частичной нагрузки никаких дополнительных сигналов не потребуется, контур скорости ветроколеса будет бездействовать, задание на pitch-угол лопастей устанавливается на уровне 0° .

При работе в режиме частичной нагрузки качество работы системы управления ветроустановки определяется в основном качеством работы системы векторного регулирования генератора, которая обычно является встроенной в используемый преобразователь частоты. Корректность работы системы векторного регулирования определяется точностью настройки регулятора потока (для асинхронного генератора) и регуляторов моментобразующей и потокообразующей компонент тока статора. Для правильной настройки параметров упомянутых регуляторов потребуется идентификация параметров генератора (Таблица 2.3). При этом сигнал задания на момент генератора должен формироваться в соответствии с формулой (2.43) в зависимости от текущей скорости вращения генератора.

Следует так же учесть, что при работе в режиме частичной нагрузки реальный коэффициент мощности ветроколеса снижается приблизительно на 3 % по отношению к его максимальному расчетному значению – $c_{pw\ max}$ вследствие проявления эффекта затенения башни.

Корректная работа контура регулирования скорости вращения ветроколеса в режиме ограничения мощности генератора возможна только при условии адаптации дискретного регулятора скорости к нелинейным свойствам ветроколеса. Учет нелинейных свойств ветроколеса, как части объекта регулирования, возможен за счет применения предложенной нейросети, состоящей из 9-и нейронов (Рисунок 2.14), которая воспроизводит зависимость коэффициента мощности ветроколеса от быстроходности и pitch-угла лопасти.

Вследствие неравномерности скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса, по причине проявления эффекта затенения башни, контур скорости ветроколеса целесообразно разделить на три канала. В предложенной трехканальной системе регулирования формирование момента ветроколеса

каждой лопастью будет происходить индивидуально в зависимости от ветровых условий, в которых оказывается лопасть. При определении скорости ветра для каждого сектора плоскости вращения ветроколеса рекомендуется использовать предложенный расчетный метод, основанный на применении нейросети, которая способна на основе момента и pitch-угла лопасти вычислить скорость ветра в каждом секторе. Предложенная нейросеть, изображена на рисунке 2.19 и состоит из 25-и нейронов.

Приведенные выше рекомендации показывают, что для реализации предложенных в работе методов управления ветрогенераторной установкой цифровому устройству управления потребуется выполнять большое количество вычислительных операций по причине расчета выходных значений нескольких десятков нейронов. В связи с этим целесообразно провести оценку длительности выполнения программы регулирования для дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса на базе программируемого логического контроллера.

Для реализации предложенного адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса (Рисунок 2.50) целесообразно оценить, какое время потребуется микропроцессорному контроллеру в реальной системе регулирования для реализации программы регулирования с учетом адаптации регулятора и применения для этого предложенной нейросети (Рисунок 2.14).

Пример программы реализации дискретного ПИ-регулятора, реализованный на языке программирования STEP 7 для программируемого логического контроллера серии SIMATIC S7-300 [95] приведен на рисунке 4.1. Программа ПИ-регулятора соответствует разностному уравнению [96] см. формулу (2.87).

Как показывает рисунок 4.1, программа содержит 17 команд загрузки и пересылки данных (L и T) на каждую из которых, например процессорный модуль контроллера CPU-314C 2DP, затрачивает 2 мкс, и 6 арифметических команд для чисел с плавающей запятой, на каждую из которых процессорный модуль контроллера затрачивает около 6 мкс. Таким образом, для выполнения программы ПИ-регулятора указанный процессорный модуль затратит 70 мкс.

L	#sollwert		L	#ek_1	
L	#ist2		L	#b1	Определение третьего
-R		Расчет ошибки	*R		слагаемого разностного
T	#ek	регулирующего – ek.	T	#t3	уравнения – t3.
L	#yk_1		L	#t2	
L	#a1	Определение первого	+R		Определение
*R		слагаемого разностного	L	#t1	выходного сигнала
T	#t1	уравнения – t1.	+R		регулятора – uk_1
L	#ek		T	#yk_1	
L	#b0	Определение второго	L	#ek	Пересохранение
*R		слагаемого разностного	T	#ek_1	ошибки регулиров. – ek.
T	#t2	уравнения – t2.			

Рисунок 4.1 – Пример реализации программы дискретного ПИ-регулятора на языке программирования STEP 7

Однако, как показывают формулы (2.88) и (2.89), для расчета коэффициентов b_0 и b_1 разностного уравнения нужно постоянно рассчитывать переменный коэффициент k_{w1} , что подразумевает двукратное использование предложенной нейросети (Рисунок 2.51). При этом, количество вычислительных операций с плавающей запятой – m_1 , необходимых для вычисления выходного значения нейросети, изображенной на рисунке 2.14 с использованием выражений (2.27), (2.28) и (2.29), можно определить по формуле [96, с. 63]

$$m_1 = 10 \cdot n_{ex} \cdot n_{N1} + 10 \cdot n_{N1} \cdot n_{N2} + 2 \cdot n_{N2} \cdot n_{N3}, \quad (4.1)$$

где $n_{ex} = 2$ – кол-во входных параметров нейросети, $n_{N1} = 5$ – число нейронов первого слоя, $n_{N2} = 3$ – число нейронов второго слоя, $n_{N3} = 1$ – число нейронов третьего слоя.

При подстановке приведенных численных значений в формулу (4.1) определим, что для расчета выходного значения нейросети потребуется 256 вычислительных операций с плавающей запятой. С учетом того, что одна вычислительная операция занимает около бмкс и требуется двукратный расчет выходного значения нейросети, получим время, затрачиваемое процессором на расчет переменного коэффициента k_{w1} – $t_{расчет} = 3072$ мкс. Добавив к этому времени время выполнения программы ПИ-регулятора (70 мкс) и увеличив суммарное значение на 5 % для учета дополнительных и вспомогательных команд, получим

суммарное время выполнения программы регулирования с учетом адаптации регулятора $t_{\text{прогр. рег}_1} = 3,3$ мс. Т.е. процессору потребуется 3,3 миллисекунды для реализации программы регулирования в случае использования процессорного модуля со средним быстродействием – CPU-314C 2DP серии контроллеров SIMATIC S7-300.

Приведенные расчеты показывают, что суммарное время выполнения программы регулирования с использованием трехслойной нейросети (Рисунок 2.14) – $t_{\text{прогр.рег}_1} = 3,3$ мс существенно ниже (более чем в 10 раз) малой постоянной времени объекта регулирования – $T_{\text{вс}} = 60$ мс. Таким образом, применение предложенного регулятора не нарушает основного правила для дискретных систем регулирования, согласно которому для получения качественного процесса регулирования период дискретности системы должен быть как минимум в десять раз меньше, чем малая постоянная времени объекта регулирования.

Однако, в случае применения методики вычисления скорости ветра в различных секторах плоскости вращения ветроколеса (Рисунок 2.57), потребуется существенно большее число вычислительных операций и время выполнения программы регулирования значительно увеличиться. Для расчета увеличенного времени выполнения программы регулирования определим количество вычислительных операций, необходимое для расчета скорости ветра в различных секторах на основе предложенной двухслойной нейросети, состоящей из 25-и нейронов с функцией тангенс гиперболический в 1-ом слое и 1-ого нейрона с линейной функцией во втором слое (Рисунок 2.19)

$$m_2 = 10 \cdot n_{\text{вх}} \cdot n_{N1} + 2 \cdot n_{N1} \cdot n_{N2}, \quad (4.2)$$

где $n_{\text{вх}} = 2$ – количество входных параметров нейросети, $n_{N1} = 25$ – число нейронов первого слоя, $n_{N2} = 1$ – число нейронов второго слоя.

Расчет по предложенной формуле (4.2) показывает, что для определения выходного значения указанной нейросети потребуется 550 вычислительных операций с плавающей запятой. В соответствии с рисунком 2.57 для вычисления скорости ветра в различных секторах плоскости вращения ветроколеса

потребуется двукратное использование данной нейросети, а также двукратное использование нейросети, изображенной на рисунке 2.14. В этом случае суммарное количество вычислительных операций с плавающей запятой можно определить по формуле

$$m_{\text{выч.}\Sigma} = 2 \cdot m_1 + 2 \cdot m_2. \quad (4.3)$$

После подстановки значений m_1 и m_2 получим 1612 вычислительных операций. С учетом длительности выполнения одной операции с плавающей запятой – бмкс и 5-и процентного увеличения длительности расчетов за счет применения дополнительных команд получим суммарное время вычисления скорости ветра по секторам – $t_{\text{выч. скор. ветра}} = 10,15$ мс. Тогда суммарное время выполнения программы регулирования, соответствующее трехканальной системе регулирования скорости вращения ветроколеса, с учетом времени на вычисление скорости ветра (Рисунок 2.54) можно определить по формуле

$$t_{\text{прогр. рег}_2} = 3 \cdot (t_{\text{прогр. рег}_1} + t_{\text{выч. скор. ветра}}). \quad (4.4)$$

После подстановки численных значений в формулу (4.4) получим суммарное время выполнения программы регулирования $t_{\text{прогр. рег}_2} = 40,35$ мс.

В этом случае нарушается упомянутое ранее правило для дискретных систем регулирования, согласно которому для получения качественного процесса регулирования период дискретности системы должен быть как минимум в десять раз меньше, чем малая постоянная времени объекта регулирования $T_{ws} = 60$ мс.

Таким образом, для реализации трехканальной системы регулирования скорости вращения ветроколеса с вычислением скорости ветра для разных секторов ветроколеса на базе программируемого логического контроллера потребуется процессор с более высокой скоростью выполнения вычислительных операций, чем процессорный модуль CPU-314C 2DP.

При этом, если использовать правило, устанавливающее максимальное значение периода дискретности на уровне одной десятой от постоянной времени объекта регулирования – $T_{ws}/10$, то можно вычислить максимальную длительность

выполнения операции с плавающей запятой для управляющего контроллера по формуле

$$t_{\text{выч.опер.мах}} = \frac{T_{ws}}{10 \cdot m_{\Sigma}}, \quad (4.5)$$

где m_{Σ} – суммарное количество выполняемых операций с плавающей запятой, которое в свою очередь может быть определено по формуле

$$m_{\Sigma} = 3 \cdot (2 \cdot m_1 + m_{\text{рег}} + m_{\text{выч.}\Sigma}), \quad (4.6)$$

где $m_{\text{рег}}$ – количество вычислительных операций при выполнении программы, реализующей разностное уравнение регулятора скорости ветроколеса (Рисунок 4.1).

Таким образом, совместное использование адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса и расчетного метода определения скорости ветра потребует, в соответствии с формулой (4.6) и рисунками 2.51 и 2.57, как минимум 2147 вычислительных операций с плавающей запятой на один канал регулирования с учетом выполнения программы дискретного ПИ-регулятора. Соответственно для трехканальной системы регулирования потребуется практически 6441 вычислительная операция с плавающей запятой без учета вспомогательных команд. При подстановке в формулу (4.5) значения $m_{\Sigma}=6441$ получим $t_{\text{выч.опер.мах}}=0,93$ мкс.

Таким образом, результаты работы позволяют определить требуемое максимальное значение длительности выполнения операций с плавающей запятой для управляющего контроллера при выполнении программы регулирования. В настоящее время ведущие производители программируемых логических контроллеров уже выпускают изделия с требуемой длительностью выполнения операций с плавающей запятой.

Приведенные выкладки и вычисления подтверждают необходимость контроля времени выполнения программы регулирования в дискретном контуре регулирования скорости вращения ветроколеса с учетом скорости выполнения вычислительных операций модулем центрального процессора.

4.2 Рекомендации по практическому применению систем управления ориентированием фотоэлектрических модулей

В ходе исследований было установлено, что при использовании одноосной системы ориентирования с наклонной осью вычисление наилучшего угла поворота модуля относительно южного направления – φ_{opt} должно производиться по формуле

$$\varphi_{opt} = \arccos \left(\frac{\sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta}{\sqrt{(\sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta)^2 + (\cos \alpha_c \cdot \sin \gamma_c)^2}} \right). \quad (4.7)$$

Таким образом, для расчета наилучшего угла поворота модуля необходимо вычислить углы положения Солнца – γ_c и α_c , в соответствии с алгоритмом определения солнечной позиции (SPA), а также необходимо знать угол наклона полудиска системы ориентирования к земной поверхности – β .

Исследования показали, что при формировании заданного угла поворота модуля в соответствии с формулой (4.7), плотность солнечной энергии на поверхности модуля будет практически максимальной (Рисунки 3.18 и 3.19). Этот факт позволяет отказаться от сканирования небосвода в поисках максимального потока энергии в случае ясного неба. Исключение режима трекера максимальной мощности позволяет снизить энергозатраты на работу позиционного привода поворота модуля.

Результаты измерения плотности солнечной энергии в процессе поворота модуля позволили установить, что при получасовой периодичности включения системы ориентирования, снижение плотности потока солнечной энергии на поверхности модуля не превысит 1 % по отношению к максимальному значению. Поэтому рекомендуемой оптимальной периодичностью включения системы ориентирования является интервал 0,5 часа.

Следует отметить, что при проектировании позиционного привода важно учитывать способ формирования сигнала обратной связи по положению. Если необходимая для этого информация о скорости вращения двигателя поворота

передается через аналоговый канал, то необходимо учитывать точность работы аналого-цифрового преобразователя в контроллере. Желательно, чтобы точность работы АЦП была не ниже 1 %, чтобы в процессе позиционирования не накапливалась значительная ошибка по положению. Для устранения накапливающегося рассогласования между рассчитанным и реальным углом поворота модуля, по причине неточности АЦП, целесообразно, при достижении центрального конечного выключателя (направление на юг), в программе управления предусмотреть присвоение фактическому углу поворота модуля значения 0°. Это позволит обнулить накапливающуюся ошибку позиционирования.

Установлено, что при работе позиционного привода целесообразно использовать совместно с П-регулятором положения звено предупредения, которое вычисляет производную от сигнала задатчика положения, и в начальные моменты позиционирования эффективно формирует сигнал задания на скорость привода поворота. Такая комбинация позволяет улучшить динамику привода при отработке сигнала задатчика положения, что отражается в снижении динамической ошибки позиционирования.

Теоретические исследования, проведенные в предыдущем разделе, позволили установить, что применение одноосной системы ориентирования с наклонной осью способно увеличить годовую энергоэффективность фотоэлектрического модуля на 28,5 % по сравнению с фиксировано закрепленным модулем с ориентацией на юг, в случае чистого неба. Этот показатель приближается к показателю двухосной системы ориентирования – 29 %. Реальное повышение энергоэффективности в течении года будет зависеть от соотношения ясных и облачных дней в конкретном регионе.

Для сопоставления теоретических и экспериментальных результатов исследований целесообразно провести практическую оценку повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля на экспериментальной установке за счет применения системы ориентирования с наклонной осью при отсутствии облачности в условиях чистого неба.

Практическая оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля за счет применения системы ориентирования с наклонной осью проводилась на открытой площадке при ясном безоблачном небе 10 июня 2021 года с 7-00 утра до 18-00 вечера. При этом плотность мощности солнечного излучения для фиксированного и ориентированного положений модуля измерялась за счет применения измерительного цикла (Рисунок 3.8). Периодичность запуска измерительного цикла определялась периодом работы тактового генератора (Рисунок 3.9). В данном эксперименте был установлен период тактового генератора – 5 минут, т.е. в течении часа проводилось 12 измерительных циклов. В ходе эксперимента система управления ориентированием функционировала в соответствии со структурной схемой, изображённой на рисунке 3.4. При этом плотность мощности солнечной энергии, поступающей на поверхность фотоэлектрического модуля, определялась на основании выходного сигнала датчика тока, поступающего на АЦП контроллера. Для пересчета значения тока короткого замыкания фотоэлектрического модуля в плотность мощности солнечного излучения использовалась формула (3.18). Для определения коэффициента пересчета использовалось значение тока короткого замыкания модуля при стандартных условиях – $I_{кз.N}$ из таблицы 4.1, содержащей паспортные данные применяемого фотоэлектрического модуля SM-2.5-18.

Таблица 4.1 – Паспортные данные фотоэлектрического модуля SM-2.5-18

Напряжение в точке максимальной мощности при стандартных условиях – U_{MPPN}	Ток в точке максимальной мощности при стандартных условиях – I_{MPPN}	Напряжение холостого хода при стандартных условиях – $U_{xx.N}$	Ток короткого замыкания при стандартных условиях – $I_{кз.N}$	Максимальная мощность при стандартных условиях
18 В	2,5 А	23,3 В	2,72 А	45 Вт

Определенное в соответствии с формулой (3.18) значение коэффициента пересчета равняется 368. Пересчитанные значения плотности мощности солнечной энергии для фиксированного модуля – $E_{solar}(\varphi=0^\circ)$ и ориентированного модуля – $E_{solar}(\varphi_{onm})$ сохранялись в соответствующие блоки данных (Рисунок 3.10).

На рисунке 4.2 приведен график изменения во времени плотности мощности солнечной энергии для фиксированного модуля – $E_{solar}(\varphi=0^\circ)$ и ориентированного модуля – $E_{solar}(\varphi_{onm})$, полученный в ходе эксперимента.

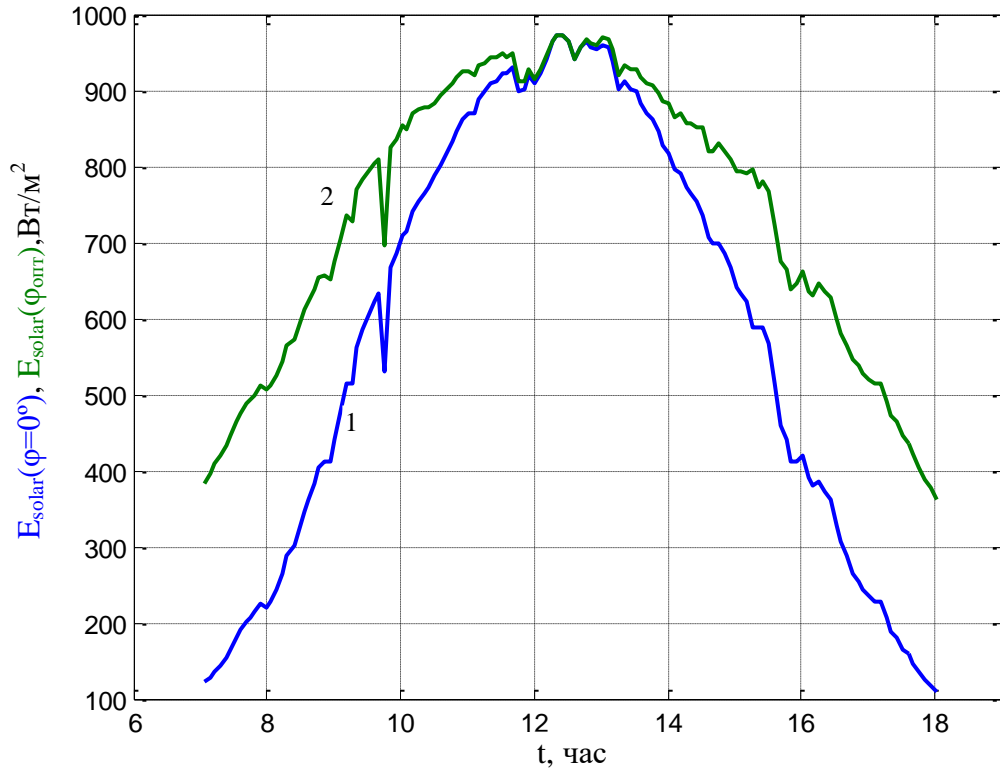


Рисунок 4.2 – График изменения плотности мощности солнечной энергии для: 1 – фиксированного модуля $E_{solar}(\varphi=0^\circ)$, 2 – ориентированного модуля $E_{solar}(\varphi_{onm})$

На основании полученных графиков по аналогии с формулой (3.33) можно определить суммарное поступление энергии солнечного излучения на поверхность, фиксированного и ориентированного модулей за исследуемый период, скорректировав формулу (3.33) с учетом того, что измерения проводились каждые 5 минут

$$W_{Г,накл} \approx \frac{1}{12} \cdot \sum_{i=1}^n E_{Г,накл}(t_i). \quad (4.8)$$

Расчеты, проведенные по формуле (4.8) на основании полученных экспериментальных данных (Приложение В, Таблица В.1) за исследуемый период времени для фиксированного и ориентированного положений модуля дали

следующие результаты: $W_{Г, \text{накл, фикс}}=6,4$ кВт·ч/м² и $W_{Г, \text{накл, ориент}}=8,16$ кВт·ч/м², что соответствует увеличению энергоэффективности на 27,5%.

Аналогичные теоретические расчеты суммарного поступления энергии солнечного излучения на поверхность фиксированного и ориентированного модулей за тот же исследуемый период времени, проведенные в соответствии с формулами (3.19 – 3.29), (Приложение В, Программа В.2) дали следующие результаты: $W_{Г, \text{накл, фикс, теория}}=6,21$ кВт·ч/м² и $W_{Г, \text{накл, ориент, теория}}=7,93$ кВт·ч/м², что соответствует увеличению энергоэффективности на 27,8%.

4.3 Выводы по разделу 4

В ходе проведенных исследований установлено, что для режима частичной нагрузки ветрогенераторной установки большое значение имеет правильность настройки регуляторов в системе векторного регулирования момента генератора, что требует точной идентификации параметров генератора.

Поскольку в режиме ограничения мощности ветрогенераторной установки система управления должна учитывать нелинейные свойства ветроколеса и вычислять скорость ветра для лопастей, это предполагает применение предложенных нейросетей, задействующих большое количество вычислительных операций. Поэтому для решения поставленных задач важно выбирать управляющий контроллер с достаточным быстродействием, которое обеспечивает определяемое по формуле (4.5) требуемое время выполнения вычислительных операций с плавающей запятой. Такой подход позволяет соблюдать установленные правила для выбора периода дискретности системы управления.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенного метода управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля с наклонной осью и демонстрируют соответствие теоретических и экспериментальных данных при расчетах суммарного поступления энергии солнечного излучения на поверхность, фиксированного и ориентированного модулей с высокой степенью точности.

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГ	– асинхронный генератор;
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь;
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии;
ВЭС	– ветровая электростанция;
ВЭУ	– ветровая энергетическая установка;
КПД	– коэффициент полезного действия;
КЗ	– короткозамкнутый;
МВ	– местное время;
ПИ	– пропорционально-интегральный (регулятор);
РМВ	– реальное местное время;
СМВ	– среднее местное время;
СГ	– синхронный генератор;
ТММ	– точка максимальной мощности;
ФЭМ	– фотоэлектрический модуль;
ЦАП	– цифро-аналоговый преобразователь;
ЧП	– часовой пояс;
ЭДС	– электродвижущая сила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franquesa M. Kleine Windräder Berechnung und Konstruktion/ Franquesa M. – Weisbaden und Berlin: Udo Pfriemer Buchverlag, 1989. – 175с.
2. Burton T. Wind Energy Handbook/ Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E. – West Sussex: Wiley, 2011. – 742с.
3. Hau E. Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit/ Hau E. – Berlin: Springer, 2016. – 997 p.
4. Gasch R., Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb/ Gasch R., Twele J. – Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007. – 565 p.
5. Heier S. Windkraftanlagen, Systemauslegung, Netzintegration und Regelung/ Heier S. – Weisbaden: Springer, 2018. – 542 p.
6. Rekioua D. Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control / Rekioua D. – London: Springer, 2014. – 202 p.
7. Wu B. Power conversion and control of wind energy systems/ Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouros S. – Hoboken: Wiley, 2011. – 453 p.
8. Colin A. Wind Turbines: Theory and Practice / Colin A. – Cambridge: University Press, 2020. – 322 p.
9. Васьков А.Г. Ветроэнергетика: учебное пособие/ Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В. – Москва: Издательство МЭИ, 2016. – 384 с.
10. Aissaoui A. Wind Turbines: Design, Control and Applications / Aissaoui A., Tahour A. – New Delhi: Woodhead Publishing, 2016. – 345 p
11. Bianchi F.D. Wind Turbine Control System, Principles, Modelling and Gain Scheduling Design/ Bianchi F.D., Battista H., Mantz R.J. – London: Springer-Verlag, 2007. – 205 p.
12. Blaabjerg F. Power Electronics for Modern Wind Turbines/ Blaabjerg F., Chen Z. – Denmark: Institute of Energy Technology Aalborg University, 2006. – 60с.
13. Kawabe I. Output Maximization of Wind Generation System Using Sensorless Controlled IPMSG / Kawabe I., Morimoto S., Sanada M. // Osaka prefecture university. – Sakai, Japan, 2008. – No. (C) 18560281. – P. 28–37.

14. Bezza M. Sensorless MPPT fuzzy controller for DFIG wind turbine / M. Bezza, B.EL. Moussaoui, A. Fakkar // Energy Procedia. – Marocco, 2012. – №18. – P. 339–348.
15. Zhang Z. Encoderless Model Predictive Control of Back-to-Back Converter Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Systems / Zhang Z., Hackl C., Wang F., Kennel R. // Technische Universitat München. – Munich, Germany, 2013. – p. 47–56.
16. Hwas A. Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller / Hwas A., Katebi R. // Industrial Control Centre, University of Strathclyde. – Glasgow, 2011. P. 241–246.
17. Kimura N. Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Generation using Synchronous Rectifier / Kimura N., Koya T., Nakatani K., Morizane T // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010. – Osaka, Japan, 2010. – p. 12-8 – 12-12.
18. Geyler M. Regelung von drehzahlvariablen Windenergieanlagen [Electronic resource]: / Geyler M., Caselitz P. // Institut für Solare Energieversorgungstechnik. – Kassel, 2008. – 27с. – Режим доступа <http://www.iset.uni-kassel.de/abt/FB-E/papers/at0745.pdf>
19. Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy System/ Munteanu. I., Bratcu A., Cutululis N., Ceanga E. – London: Springer-Verlag, 2008. – 283с.
20. Stiebler M. Wind Energy Systems for Electric Power Generation/ Stiebler M. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 193с.
21. Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии. Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. – Магдебург: Изд-во ун-та им. Отто фон Герике, 2010. – 209с.
22. Mertens K. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice / Mertens K., Roth G. – West Sussex: Wiley, 2014. – 294 p.
23. Куашнинг Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Технология, расчеты, моделирование/ Куашнинг Ф. – Астана: Фолиант, 2013. – 429 с.

24. Precup R. Solar Photovoltaic Power Plants, Advanced Control and Optimization Techniques/Precup R., Kamal T., Hassan S. – Singapore: Springer, 2019 – 250p.
25. Messenger R. Photovoltaic systems engineering / Messenger R., Abtahi A. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 536 p.
26. Hanus B. Planungs und Installations-anleitungen für Photovoltaikanlagen / Hanus B. – Poing: Franzis Verlag, 2009. – 237 p.
27. Wesselak V. Handbuch Regenerative Energietechnik / Wesselak V., Schabbach T., Link T. – Weisbaden: Springer, 2017. – 943 p.
28. Wesselak V. Photovoltaik: wie Sonne zu Strom wird / Wesselak V. Voswinckel S. – Berlin: Springer, 2016. – 135 p.
29. Fuentes-Morales R. Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review / Fuentes-Morales R., Diaz-Ponce A., Pena-Cruz M., Rodrigo P., Valentin-Coronado L., Martell-Chavez F., Pineda-Arellano C.// Solar Energy. – Elsevier, 2020. – № 212. P. 203–219.
30. Awasthi A. Review on sun tracking technology in solar PV system / Awasthi A., Shukla A., Manohar M., Dondariya C., Shukla K., Porwal D., Richhariya G. // Energy Reports. – Elsevier, 2020. – № 6. P. 392–405.
31. Козин В. С. Підвищення аеродинамічної ефективності роботи вітроустановок: автореферат дисертації канд. техн. наук: 05.07.01/ В. С. Козін. – Киев: Национальный авиационный университет, 2001. – 13с.
32. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik/ Riefenstahl U. – Leipzig: Teubner Stuttgart, 2000. – P. 401.
33. Китаева М. В. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Китаева М В. – Томск, 2014. – 139 с.
34. Охорзина А.В. Экономичная солнечная энергоустановка для удаленных потребителей: дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / Охорзина А.В. – Томск, 2017. – 108 с.

35. Аржанов К.В. Двухкоординатный следящий шаговый электропривод солнечных установок / К.В. Аржанов // Сб. трудов 2 Всероссийской научной конференции «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-его поколения». – Чебоксары, 22–24 мая, 2014. – С. 117–120.
36. Аржанов К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Аржанов К.В. – Томск, 2016. – 178 с.
37. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока / Чернышев А.Ю. Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
38. Rekioua D. Hybrid Renewable Energy Systems / Rekioua D. – London: Springer, 2020. – 250 p.
39. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / Кашкаров А.П. – Саратов: Профобразование, 2017. – 144 с.
40. Лукутин Б. В. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие / Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 92 с.
41. Амерханов Р. А. Солнечные фотоэлектрические станции: монография/ Амерханов Р. А., Григораш О. В., Самородов И. Б., Цыганков Б. К., Воробьев Е. С.. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 205 с.
42. Quaschnig V. Renewable Energy and Climate Change / Quaschnig V. – West Sussex: Wiley, 2019. – 338 p.
43. Duffie J. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / Duffie J., Beckman W., Blair N. – West Sussex: Wiley, 2020. – 928 p.
44. Bhatia S. Advanced Renewable Energy Systems / Bhatia S. – New Delhi: Woodhead Publishing, 2014. – 743 p.

45. Ding Y. Data Science for Wind Energy / Ding Y. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 400 p.
46. Дорохов О.В. Зниження динамічних перевантажень з метою підвищення надійності асинхронних генераторів вітроелектроагрегатів, які працюють паралельно з мережею: автореферат дисертації канд. техн. наук: 05.09.01/ Дорохов О. В.; Харківський політехнічний інститут. – Харків, 2005 – 22с.
47. 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.
48. Черников В.Г. Отчет по научно-исследовательской работе Д–12–07 «Оптимізація режимів роботи вітрогенераторних установок із застосуванням нейро-адаптивного регулятора потужності та системи векторного регулювання моменту асинхронного генератору»/ Черников В.Г., Сивокобиленко В.Ф., Старостін С.С., Старостіна В.М., Передерій А.В. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – № гос. регистрации 0107U001481. – 268 с.
49. Sorensen J. General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines / Sorensen J. – London: Springer, 2016. – 194 p.
50. Patan K. Robust and Fault-tolerant Control. Neural-Network-Based Solutions / Patan K. – Cham: Springer, 2019. – 209 p.
51. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие / Яхьяева Г.Э. – Москва: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2020. – 315 с.
52. Черников В.Г. Электромеханическая модель ротора ветроустановки в квазистационарных режимах работы / Черников В.Г. // Научно-прикладной журнал «Відновлювальна енергетика». – Киев: ІВЕ НАН України, 2007. – вып. №2 (9). – С. 51–54.

53. Кан К.А. Нейронные сети. Эволюция / Кан К.А. – Москва: SelfPub, 2018 – 288 с.

54. Горожанина Е.И. Нейронные сети: учебное пособие / Горожанина Е.И. – Самара: ФГБОУ ВО ПГУТИ, 2017 – 84 с.

55. Бураков М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учебное пособие / Бураков М. В. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2013. – 284 с.

56. 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. – Выпуск №66 – С. 211–213.

57. 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.

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

59. Черников В.Г. Стабилизация выходной мощности ветрогенераторных установок с асинхронным генератором средствами системы регулирования / Черников В.Г. // Материалы 6-ой международной научно-технической конференции «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем». – Донецк, 21–24 мая 2013. – С. 265–272.

60. Рак А.Н. Расширение функциональных возможностей и повышение эффективности комбинированных судовых пропульсивных установок / Рак А.Н., Капанадзе Г.А., Черников В.Г. // Материалы 2-ой международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития». – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 99–105.

61. 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. – Выпуск №67 – С. 21–26.

62. Черников В.Г. Исследование режима частичной нагрузки ветрогенератора на экспериментальном стенде / Черников В.Г., Яцык Д.А. // Тезисы докладов 28-ой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ, 2022. – С. 976.

63. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / Анучин А.С. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

64. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Калачев Ю.Н. – Санкт Петербург: Издательство компании ЭФО, 2013. – 63 с.

65. Калашников В.И. Сравнительная характеристика способов частотного регулирования асинхронного электропривода / Калашников В.И., Черников В.Г., Горбунов А.А. // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – вып. №1(19). – С. 29–33.

66. Quang N.P. Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen/ Quang N.P., Dittrich J. A. – Renningen Malmsheim: Expert Verlag, 1999. – 259с.

67. Кудинов Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 308 с.

68. 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 Кременчуцкого национального университета «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук, 2014. – №2(26). – С. 78–84.

69. 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.

70. Ощепков А. Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB : учебное пособие для вузов / А.Ю. Ощепков. – Санкт_Петербург : Лань, 2021. – 208 с.

71. Lutz H. Taschenbuch der Regelungstechnik/ Lutz H., Wendt W. – Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2007. – 1356 p.

72. Нос. О.В. Теория автоматического управления. Теория управления особыми линейными и нелинейными непрерывными системами: учебное пособие / О.В. Нос. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 166 с.

73. 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.

74. 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. – Выпуск №3(26) – С. 29–40.

75. Лившиц Ю.Е. Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами : учебно-методическое пособие / Ю. Е. Лившиц, В. И. Лакин, Ю. И. Монич. – Минск : БНТУ, 2014. – Ч. 1. – 206 с.

76. Бергер Г. Автоматизация на STEP 7 в LAD и FBD-формах: SIMATIC S7–300/400 программируемые контроллеры / Бергер Г. – Эрланген: Publicis Publishing, 2012.

77. Максимычев О.И. Программирование логических контроллеров (PLC) / Максимычев О.И., Либенко А.В., Виноградов В.А. – Москва: Изд-во МАДИ, 2016. – 188 с.

78. Романов В.П. Методика автоматного программирования при создании управляющих программ для программируемых логических контроллеров S7

фирмы Siemens: учебное пособие / Романов В.П. – Новокузнецк: ЕВРАЗ, 2011. – 43 с.

79. Berger H. Automating with SIMATIC S7–1500. Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional / Berger H. – Erlangen: Publicis Publishing, 2014. – 831 p.

80. Русанов В.В. Микропроцессорные устройства и системы: учебное пособие / Русанов В.В., Шевелёв М.Ю. – Томск, 2012. – 184 с.

81. Валов, А. В. Микропроцессоры и их применение в системах управления: учебное пособие / А.В. Валов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 58 с.

82. Нежметдинов Р. А. Принципы и методологические основы построения программных систем логического управления технологическим оборудованием: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Нежметдинов Р. А. – Москва, 2020. – 250 с.

83. Родыгин А.В. Электронные и микропроцессорные устройства: учебное пособие / А.В. Родыгин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 75 с.

84. Беклемишев Д. Н. Микропроцессорные средства и системы / Беклемишев Д. Н., Орлов А. Н., Переверзев А. Л., Попов М. Г., Горячев А. В., Кононова А. И. – Москва: МИЭТ, 2013. – 290 с.

85. SIMATIC S7–300 CPU 31xC [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/12996906/S7300_CPU_31XC_2006-12_r.pdf, свободный.

86. Белик А.Г. Проектирование и архитектура программных систем / Белик А.Г., Цыганенко В.Н. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 96 с.

87. Сальников И.И. Микропроцессорные системы: учебное пособие / Сальников И.И. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технолог. ун-та, 2013. – 129 с.

88. Романов В.П. Преобразователь частоты MICROMASTER 440: Учебно-методическое пособие / Романов В.П. – Новокузнецк: НОУ "РЦПП "Евраз – Сибирь", 2010. – 42 с.

89. Елистратов В. В. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учебное пособие/ Елистратов В.В., Аронова Е.С. –СПб.: Изд. политехн. ун-та, 2012. – 165 с.

90. Bird R. E. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces/ Bird R. E. – Solar Energy Research Institut, 1981. – 238 p.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Müller J. Regeln mit SIMATIC – Praxisbuch für Regelungen mit SIMATIC S7/ Müller J., Neumann F., Pfeiffer B – Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2004, 142 p.

96. 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. – С. 54–64.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА И ВЕТРОКОЛЕСА

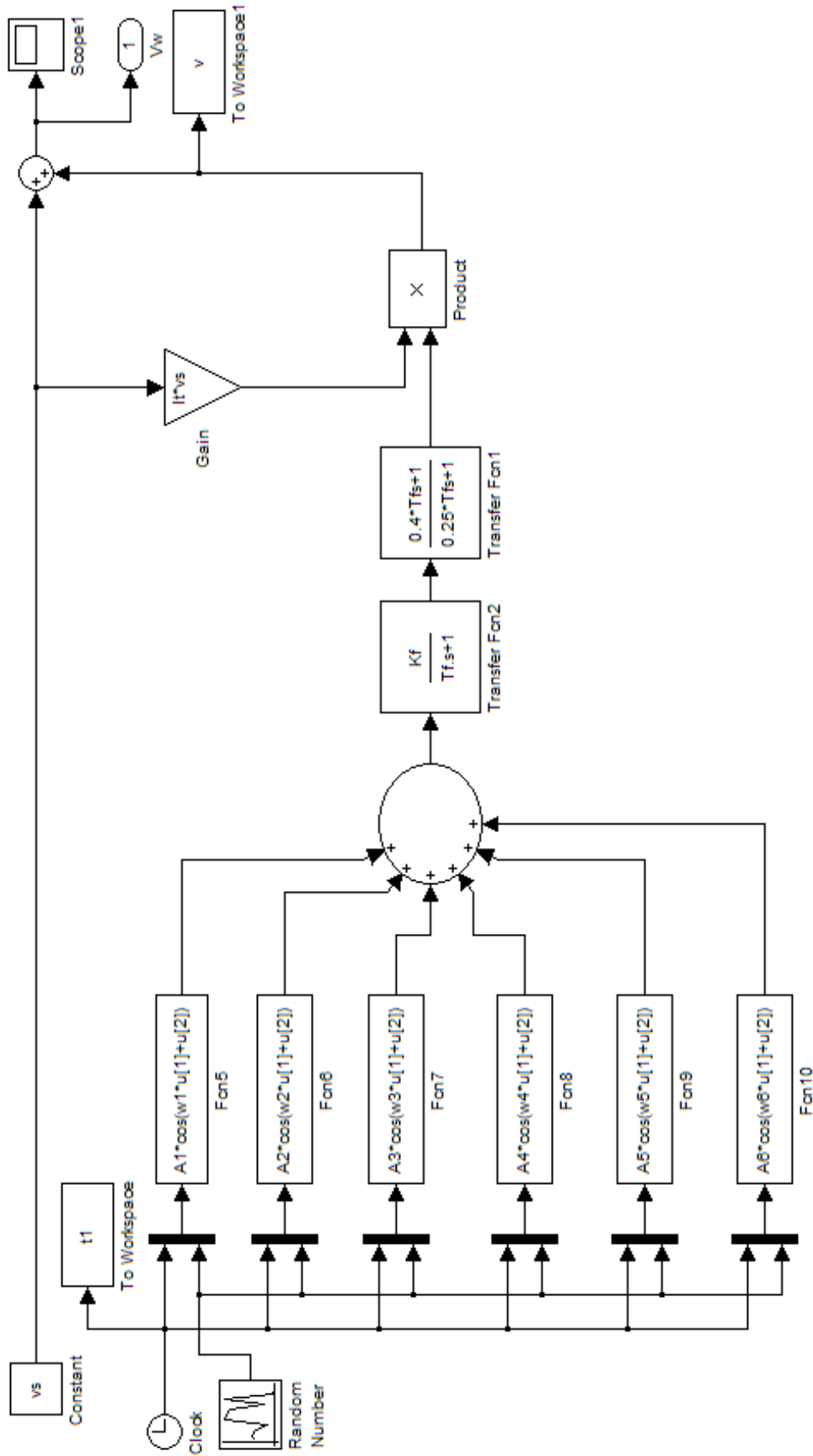


Рисунок А.1 – Реализация спектральной модели ветра Ван дер Ховена в программном пакете Matlab

Программа А.1 – Текст программы инициализации параметров для спектральной модели ветра Ван дер Ховена в программном пакете Matlab

```

% Параметры спектральной модели ветра Ван дер Ховена
vs=10; h=30; z0=0.01; Ts=600;
It=1/(log(h/z0))
sigma=It*vs
Lt=150
% Задание набора частот для косинусоид
f1=0.001;w1=2*pi*f1;
f2=0.004;w2=2*pi*f2;
f3=0.01;w3=2*pi*f3;
f4=0.04;w4=2*pi*f4;
f5=0.1;w5=2*pi*f5;
f6=0.4;w6=2*pi*f6;
f7=1;w7=2*pi*f7;
% Расчет набора амплитуд для косинусоид
Svv1=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f1*Lt/vs)^1.67)
Svv2=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f2*Lt/vs)^1.67)
Svv3=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f3*Lt/vs)^1.67)
Svv4=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f4*Lt/vs)^1.67)
Svv5=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f5*Lt/vs)^1.67)
Svv6=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f6*Lt/vs)^1.67)
Svv7=(4*(sigma^2)*Lt/vs)/((1+6*f7*Lt/vs)^1.67)
A1=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv1+Svv2)*(w2-w1));
A2=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv2+Svv3)*(w3-w2));
A3=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv3+Svv4)*(w4-w3));
A4=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv4+Svv5)*(w5-w4));
A5=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv5+Svv6)*(w6-w5));
A6=(2/pi)*sqrt(0.5*(Svv6+Svv7)*(w7-w6));
% Расчет параметров формирующего фильтра
Tf=Lt/vs;
Kf=sqrt(2*pi*Tf/(5.4*Ts));

```

Программа А.2 – Текст программы Windrad.m для расчета зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ при фиксированном значении pitch-угла лопасти в программном пакете Matlab

```
% расчетная быстроходность ветроколеса
ld=5
% число лопастей ветроколеса
z=3
% диаметр ветроколеса
D=17
% действующий радиус ветроколеса
r=(D*0.72)/2
% оптимальный угол атаки в градусах
alopt_grad=6
% оптимальный угол атаки в радианах
alopt=(alopt_grad*2*pi)/360
% коэффициент приводной силы лопасти при оптимальном угле атаки
Caopt=0.96
% оптимальный угол притекания в радианах
betaopt=(2/3)*atan(1/(ld*0.72))
% оптимальный угол притекания в градусах
betaopt_grad=(betaopt*360)/(2*pi)
% оптимальный установочный угол в радианах
jopt=betaopt-alopt
% оптимальный установочный угол в градусах
jopt_grad=(jopt*360)/(2*pi)
% оптимальная ширина лопасти в метрах на расстоянии действ. радиуса
topt=8*pi*r*(1-cos(betaopt))/(z*Caopt)
% значения угла атаки в градусах
al_grad=[-3.5 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
18 19 20 21 22]
% значения коэффициента приводной силы на основании характеристик
лопасти для профиля NASA4412
Ca=[0.05 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.58 0.68 0.77 0.875 0.95 1.05 1.13
1.22 1.29 1.37 1.44 1.51 1.57 1.63 1.68 1.72 1.58 1.53 1.5 1.45 1.4]
% значения коэффициента гладкости лопасти - ε на основании
характеристик лопасти для профиля NASA4412
e=[8 16 30 43 53 65 73 81 86 87.5 88 87.5 86 81 77 71 66 60 54 48 41
33 14 11 8 6 4]
% угол притекания в градусах
beta_grad=(jopt_grad+pitch)+al_grad
% угол притекания в радианах
beta=(beta_grad*2*pi)/360
% характеристика очертания лопасти
v=(topt*Ca*z)/r
% коэффициент торможения потока в направлении скорости ветра
a=1./(1+(v.*cos(beta))./(8*pi.*(sin(beta)).^2))
% коэффициент торможения потока в направлении плоскости вращения
ветроколеса
b=1./(1-v./(8*pi.*cos(beta)))
% текущая быстроходность ветроколеса
```



```

lo=a./(0.72.*b.*tan(beta))
% коэффициент мощности ветроколеса с учетом вихревых потерь
Cp1=(4*(lo.*0.72).^2).*a.*(b-1)
% потери вследствие конечного значения коэффициента гладкости - ε
nf=(1-(cot(beta)./e))./(1+(tan(beta)./e))
% потери вследствие конечного числа лопастей ветроколеса
nz=(1-(1.39.*sin((2.*atan(1./lo))/3))/z).^2
% результирующий коэффициент мощности ветроколеса с учетом всех потерь
Cp=Cp1.*nf.*nz
% построение зависимости коэффициента мощности ветроколеса от
быстроходности Cp=f(λ)
pitch=(pitch.*lo)./lo; plot3(pitch,lo,Cp)

```

Программа А.3 – Программа RunWindrad.m расчета зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и pitch-угла в пакете Matlab

<pre> pitch=0 run('Windrad') pitch0=pitch; Cp0=Cp; lo0=lo; hold on;grid on; pitch=2 run('Windrad') pitch2=pitch; Cp2=Cp; lo2=lo; pitch=3 run('Windrad') pitch3=pitch; Cp3=Cp; lo3=lo; pitch=5 run('Windrad') pitch5=pitch; Cp5=Cp; lo5=lo; pitch=7 run('Windrad') pitch7=pitch; Cp7=Cp; lo7=lo; pitch=10 run('Windrad') pitch10=pitch; Cp10=Cp; lo10=lo; pitch=15 run('Windrad') pitch15=pitch; Cp15=Cp; </pre>	<pre> lo15=lo; pitch=20 run('Windrad') pitch20=pitch; Cp20=Cp; lo20=lo; pitch=25 run('Windrad') pitch25=pitch; Cp25=Cp; lo25=lo; pitch=30 run('Windrad') pitch30=pitch; Cp30=Cp; lo30=lo; pitch=35 run('Windrad') Cp35=Cp; pitch35=pitch; lo35=lo; pitch=40 run('Windrad') Cp40=Cp; pitch40=pitch; lo40=lo; X=[pitch0;pitch2;pitch3;pitch5; pitch7;pitch10;pitch15;pitch20; pitch25;pitch30;pitch35;pitch40]; Y=[lo0;lo2;lo3;lo5;lo7;lo10;lo15; lo20;lo25;lo30;lo35;lo40]; Z=[Cp0;Cp2;Cp3;Cp5;Cp7;Cp10;Cp15; Cp20;Cp25;Cp30;Cp35;Cp40]; surf(X,Y,Z) </pre>
---	--

Программа А.4 – Текст программы тренировки нейросети TrainNetz.m в пакете Matlab, которая воспроизводит зависимость коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ и pitch-угла, на основе соответствующих значений указанных величин, полученных в программе RunWindrad

```
% входной массив тренировочных данных
p = [lo0 lo2 lo3 lo5 lo7 lo10 lo15 lo20 lo25 lo30 lo35 lo40;pitch0
pitch2 pitch3 pitch5 pitch7 pitch10 pitch15 pitch20 pitch25 pitch30
pitch35 pitch40];
% выходной массив тренировочных данных
t = [Cp0 Cp2 Cp3 Cp5 Cp7 Cp10 Cp15 Cp20 Cp25 Cp30 Cp35 Cp40];
% процедура тренировки нейросети
net=newff(minmax(p), [5,3,1], {'tansig', 'tansig', 'purelin'}, 'trainlm')
;
net.trainParam.show = 100;
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.goal = 1e-5;
[net,tr]=train(net,p,t);
n=sim(net,p);
% графическое отображение полученных зависимостей
pitch=[pitch0 pitch2 pitch3 pitch5 pitch7 pitch10 pitch15 pitch20
pitch25 pitch30 pitch35 pitch40];
lo=[lo0 lo2 lo3 lo5 lo7 lo10 lo15 lo20 lo25 lo30 lo35 lo40];
Cp=[Cp0 Cp2 Cp3 Cp5 Cp7 Cp10 Cp15 Cp20 Cp25 Cp30 Cp35 Cp40];
figure(2);plot3(pitch,lo,n,'r')
hold on;grid on;
figure(2);plot3(pitch,lo,Cp,'b')
```

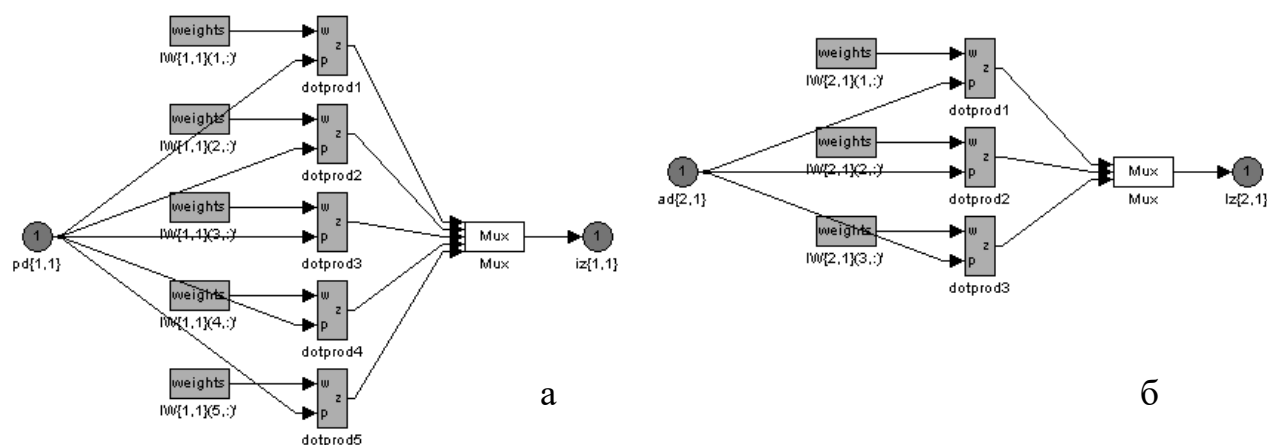


Рисунок А.2 – Структура слоев нейросети, полученная после применения команды gensim(net), а – внутренняя структура первого слоя из 5-и нейронов, б– внутренняя структура второго слоя из 3-ех нейронов

Программа А.5 – Текст программы Windrad1.m для расчета зависимости скорости ветра от момента ветроколеса при фиксированном значении pitch-угла лопасти в программном пакете Matlab

```

% расчетная быстроходность ветроколеса
ld=5
% число лопастей ветроколеса
z=3
% диаметр ветроколеса
D=17
% действующий радиус ветроколеса
r=(D*0.72)/2
% оптимальный угол атаки в градусах
alopt_grad=6
% оптимальный угол атаки в радианах
alopt=(alopt_grad*2*pi)/360
% коэффициент приводной силы лопасти при оптимальном угле атаки
Caopt=0.96
% оптимальный угол притекания в радианах
betaopt=(2/3)*atan(1/(ld*0.72))
% оптимальный угол притекания в градусах
betaopt_grad=(betaopt*360)/(2*pi)
% оптимальный установочный угол в радианах
jopt=betaopt-alopt
% оптимальный установочный угол в градусах
jopt_grad=(jopt*360)/(2*pi)
% оптимальная ширина лопасти в метрах на расстоянии действ. радиуса
topt=8*pi*r*(1-cos(betaopt))/(z*Caopt)
% значения угла атаки в градусах
al_grad=[-3.5 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
18 19 20 21 22]
% значения коэффициента приводной силы на основании характеристик
лопасти для профиля НАСА4412
Ca=[0.05 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.58 0.68 0.77 0.875 0.95 1.05 1.13
1.22 1.29 1.37 1.44 1.51 1.57 1.63 1.68 1.72 1.58 1.53 1.5 1.45 1.4]
% значения коэффициента гладкости лопасти - ε на основании
характеристик лопасти для профиля НАСА4412
e=[8 16 30 43 53 65 73 81 86 87.5 88 87.5 86 81 77 71 66 60 54 48 41
33 14 11 8 6 4]
% угол притекания в градусах
beta_grad=(jopt_grad+pitch)+al_grad
% угол притекания в радианах
beta=(beta_grad*2*pi)/360
% характеристика очертания лопасти
v=(topt*Ca*z)/r
% коэффициент торможения потока в направлении скорости ветра
a=1./(1+(v.*cos(beta))./(8*pi.*(sin(beta)).^2))
% коэффициент торможения потока в направлении плоскости вращения
ветроколеса
b=1./(1-v./(8*pi.*cos(beta)))
% текущая быстроходность ветроколеса

```

```

lo=a./(0.72.*b.*tan(beta))
% коэффициент мощности ветроколеса с учетом вихревых потерь
Cp1=(4*(lo.*0.72).^2).*a.*(b-1)
% потери вследствие конечного значения коэффициента гладкости - ε
nf=(1-(cot(beta)./e))./(1+(tan(beta)./e))
% потери вследствие конечного числа лопастей ветроколеса
nz=(1-(1.39.*sin((2.*atan(1./lo))/3))/z).^2
% результирующий коэффициент мощности ветроколеса с учетом всех потерь
Cp=Cp1.*nf.*nz
pitch=(pitch.*lo)./lo
% расчет скорости ветра и момента ветроколеса при текущих значениях
быстроходности и коэффициента мощности ветроколеса
f=lo./lo
Ur=23*f
R=8.5*f
wg=157*f
D=D*f
Vw=(wg.*R).(lo.*Ur)
Mw=0.49.*Cp.*(D.^2).(Vw.^3)./wg
% построение графической зависимости скорости ветра от момента
ветроколеса
figure(1),plot(lo,Cp); hold on, grid on
figure(2),plot(Mw,Vw); hold on, grid on

```

Программа А.6 – Текст программы RunWindrad1.m для расчета зависимости скорости ветра от момента ветроколеса и pitch-угла лопасти в пакете Matlab

```

pitch=0;
run('Windrad1');
pitch0=pitch;
Mw0=Mw; Vw0=Vw;
plot(Vw0,Mw0);hold on;grid on;
pitch=1;
run('Windrad1');
pitch1=pitch;
Mw1=Mw; Vw1=Vw;
plot(Vw1,Mw1);hold on;grid on;
pitch=2;
run('Windrad1');
pitch2=pitch;
Mw2=Mw; Vw2=Vw;
plot(Vw2,Mw2);hold on;grid on;
pitch=3;
run('Windrad1');
pitch3=pitch;
Mw3=Mw; Vw3=Vw;
plot(Vw3,Mw3);hold on;grid on;
...
(аналогично для pitch-углов от
4 до 18 градусов)

```

```

...
pitch=19;
run('Windrad1');
pitch19=pitch;
Mw19=Mw; Vw19=Vw;
plot(Vw19,Mw19);hold on;grid on;
pitch=20;
run('Windrad1');
pitch20=pitch;
Mw20=Mw; Vw20=Vw;
plot(Vw20,Mw20);hold on;grid on;
X=[pitch0;pitch1;pitch2;pitch3;
pitch4;pitch5;pitch6;pitch7;pitch8;
pitch9;pitch10;pitch11;pitch12;
pitch13;pitch14;pitch15;pitch16;
pitch17;pitch18;pitch19;pitch20];
Y=[Mw0;Mw1;Mw2;Mw3;Mw4;Mw5;Mw6;Mw7;
Mw8;Mw9;Mw10;Mw11;Mw12;Mw13;Mw14;
Mw15;Mw16;Mw17;Mw18;Mw19;Mw20];
Z=[Vw0;Vw1;Vw2;Vw3;Vw4;Vw5;Vw6;Vw7;
Vw8;Vw9;Vw10;Vw11;Vw12;Vw13;Vw14;
Vw15;Vw16;Vw17;Vw18;Vw19;Vw20];
figure(3); surf(X,Y,Z);

```

Программа А.7 – Текст программы тренировки нейросети TrainNetzpitch.m в пакете Matlab, которая воспроизводит зависимость скорости ветра от момента ветроколеса и pitch-угла лопасти, на основе соответствующих значений указанных величин, полученных в программе RunWindrad1

```
% входной массив тренировочных данных
p = [Mw1 Mw3 Mw5 Mw7 Mw9 Mw11 Mw13 Mw15 Mw17 Mw19;pitch1 pitch3
pitch5 pitch7 pitch9 pitch11 pitch13 pitch15 pitch17 pitch19];
% выходной массив тренировочных данных
t = [Vw1 Vw3 Vw5 Vw7 Vw9 Vw11 Vw13 Vw15 Vw17 Vw19];
% процедура тренировки нейросети
net=newff(minmax(p), [25,1], {'tansig', 'purelin'}, 'trainlm');
net.trainParam.show = 100;
net.trainParam.epochs = 2000;
net.trainParam.goal = 1e-5;
[net, tr]=train(net,p,t);
n=sim(net,p);
% графическое отображение полученных зависимостей
Vw=[Vw1 Vw3 Vw5 Vw7 Vw9 Vw11 Vw13 Vw15 Vw17 Vw19];
Mw=[Mw1 Mw3 Mw5 Mw7 Mw9 Mw11 Mw13 Mw15 Mw17 Mw19];
pitch=[pitch1 pitch3 pitch5 pitch7 pitch9 pitch11 pitch13 pitch15
pitch17 pitch19];
figure(5);plot3(pitch,Mw,n,'r')
hold on;grid on;
figure(5);plot3(pitch,Mw,Vw,'b')
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

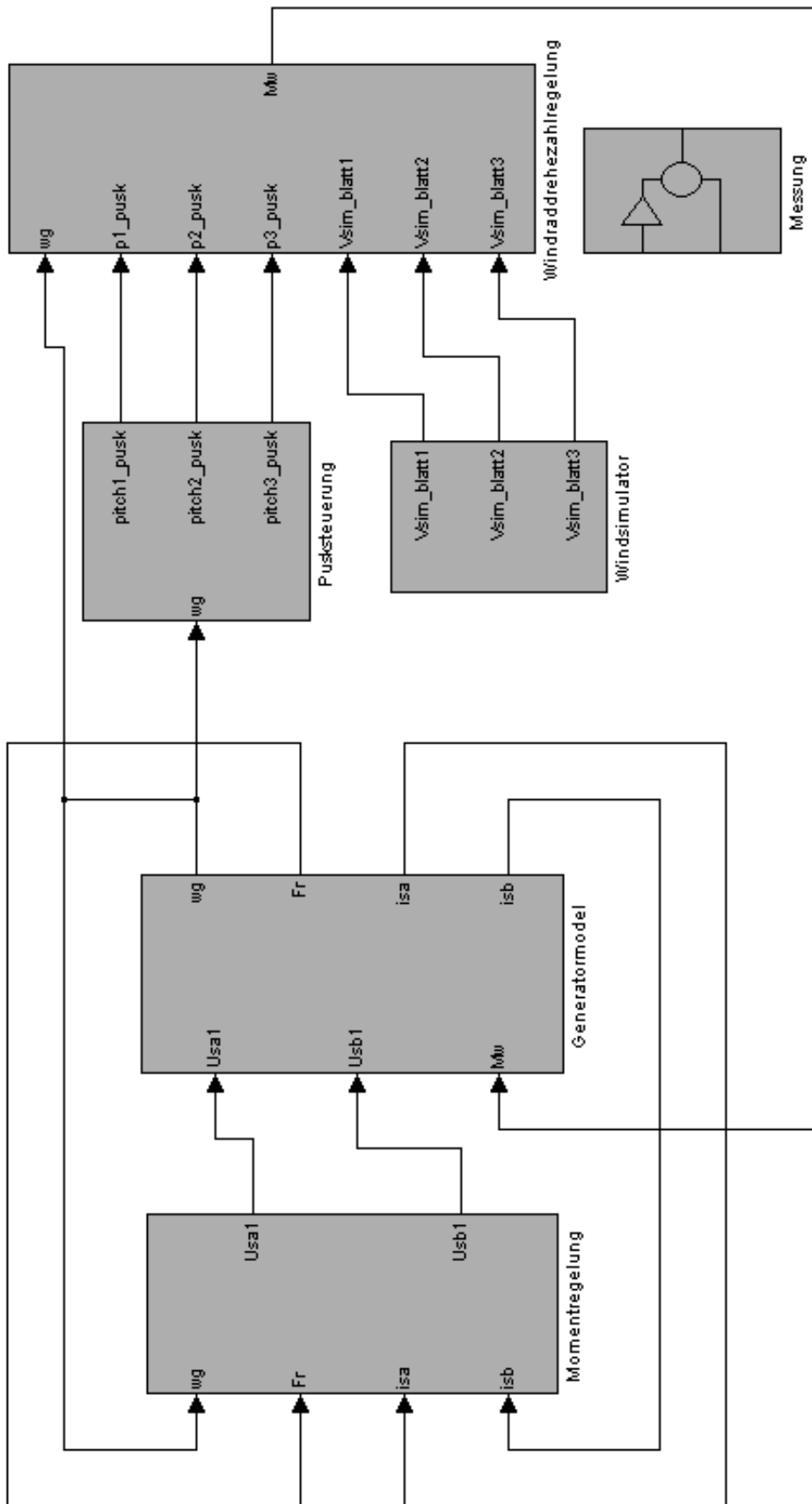
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ВЕТРОУСТАНОВКИ

Рисунок Б.1 – Математическая модель двухконтурной системы регулирования ветрогенераторной установки в программном пакете Matlab

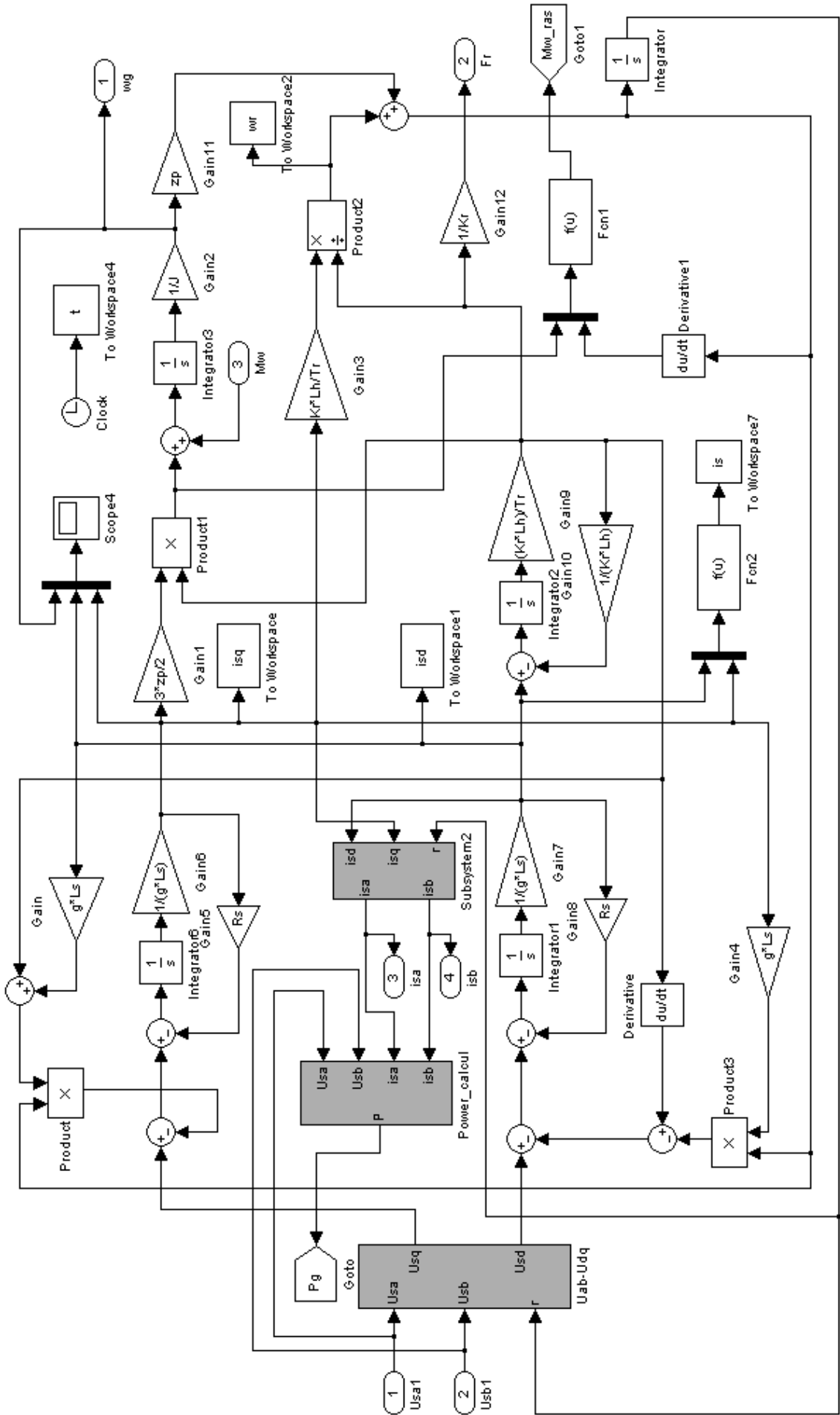


Рисунок Б.2 – Внутренняя структура подсистемы "Generatormodel" – модели генератора во вращающейся системе координат d-q

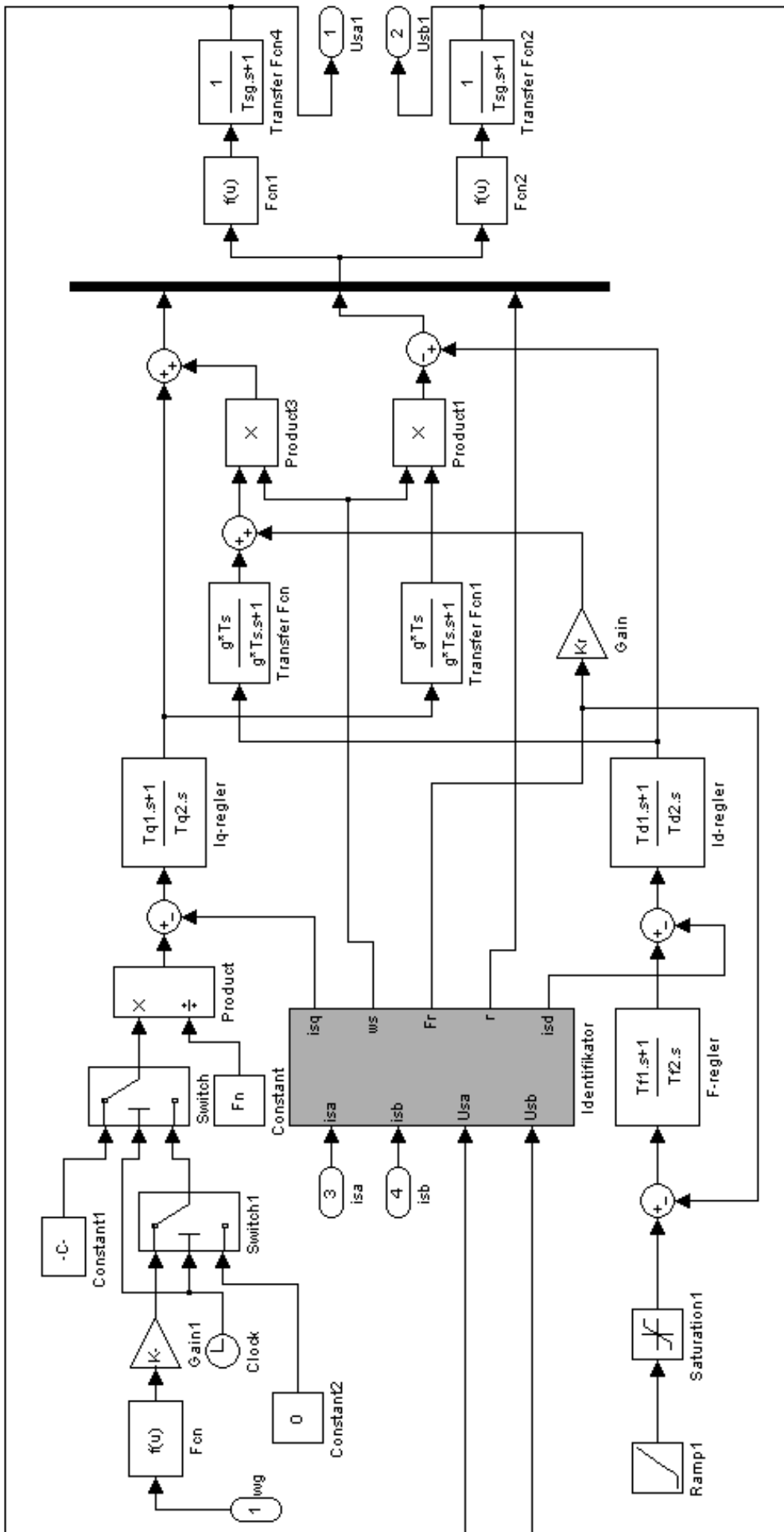


Рисунок Б.3 – Внутренняя структура подсистемы "Моментregelung" – векторное регулирование момента генератора

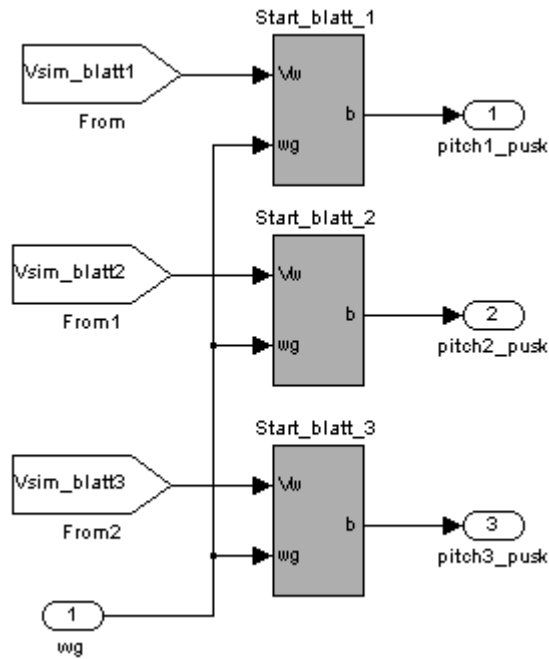


Рисунок Б.5 – Внутренняя структура подсистемы управления пуском "Pusksteuerung"

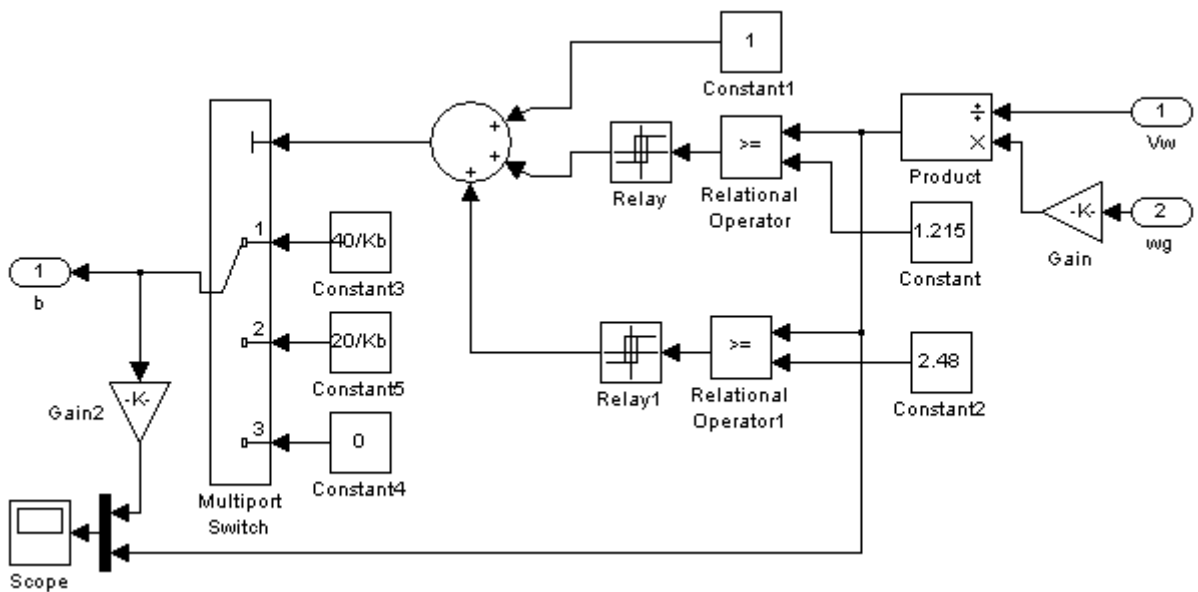


Рисунок Б.6 – Внутренняя структура подсистемы "Start_blatt_1", которая организует трёхступенчатое изменение pitch-угла лопасти в процессе пуска в зависимости от значения текущей быстроходности

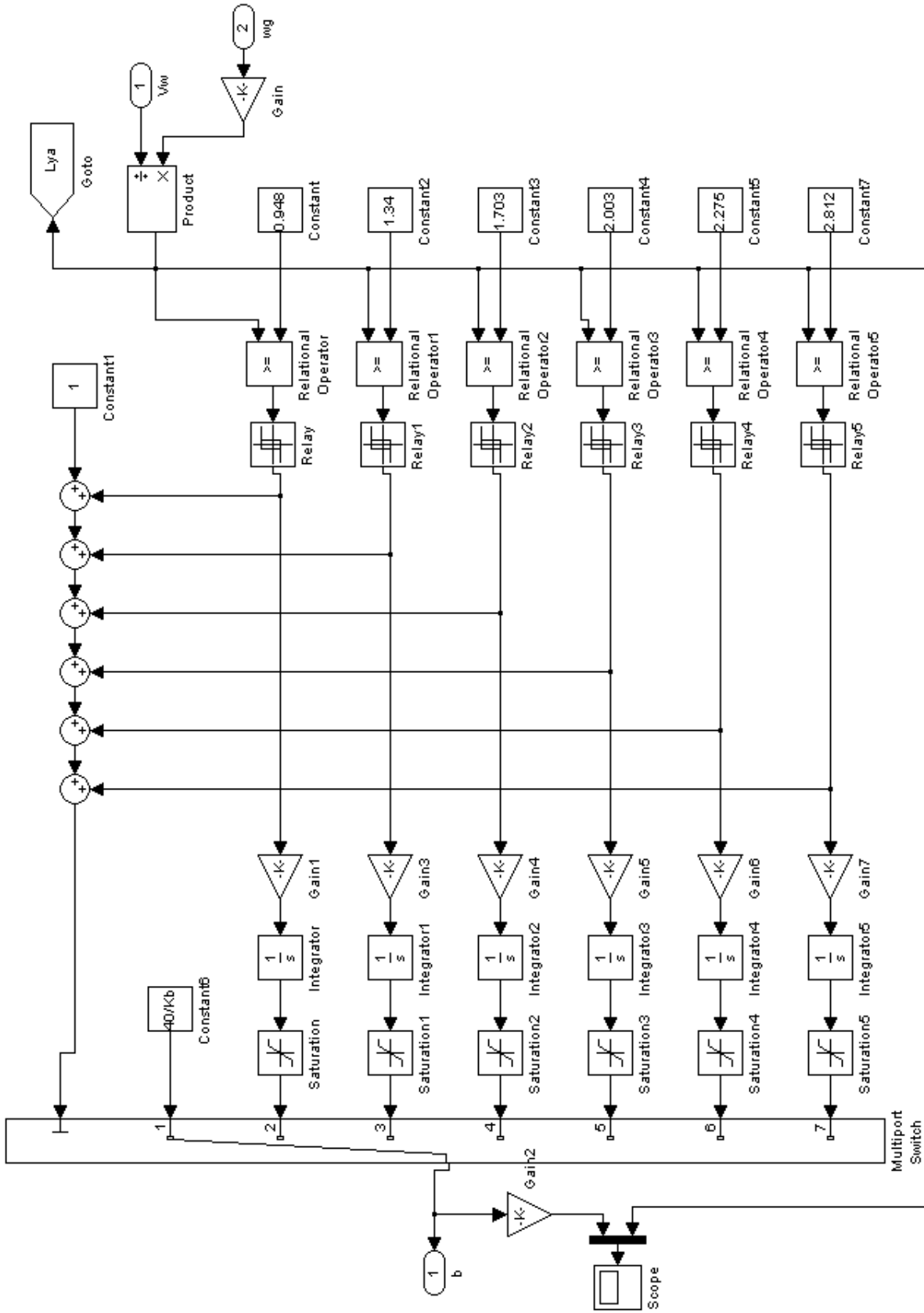


Рисунок Б.7 – Внутренняя структура подсистемы "Start_blat_1", которая организует семиступенчатое изменение pitch-угла лопасти в процессе пуска в зависимости от значения текущей быстроходности

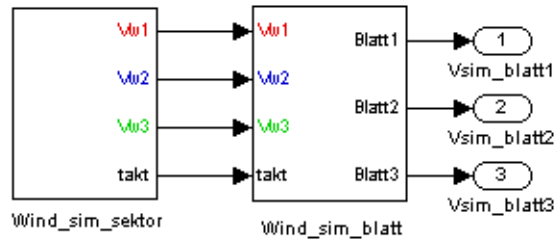


Рисунок Б.8 – Внутренняя структура подсистемы "Windsimulator"

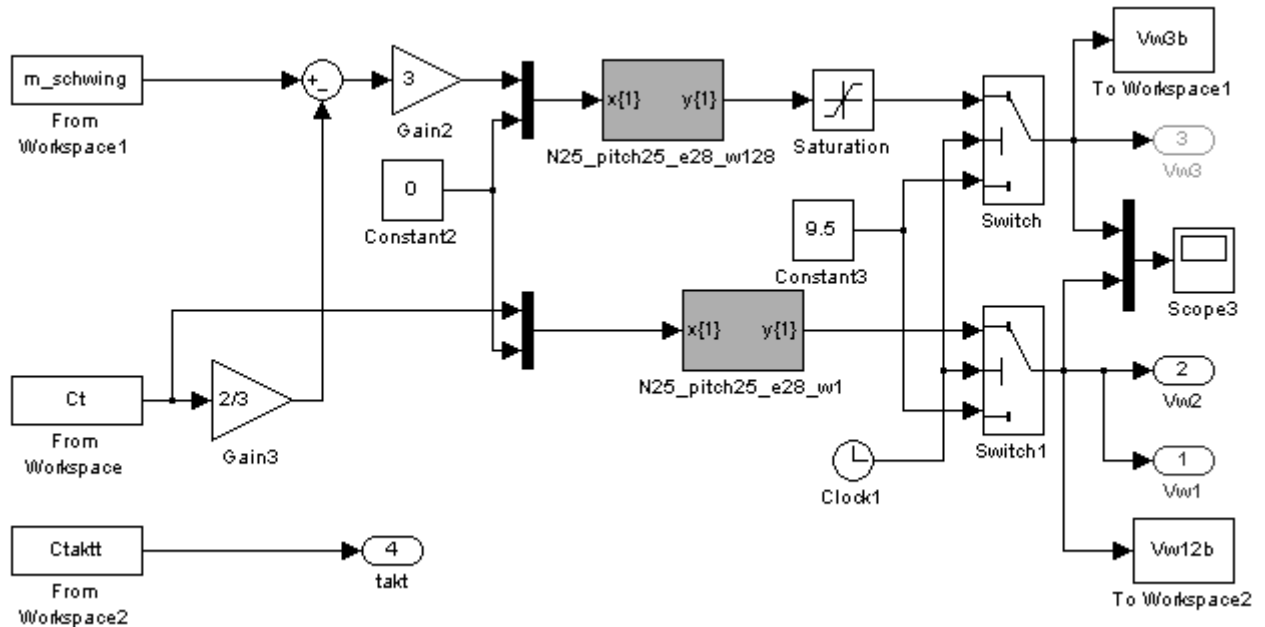


Рисунок Б.9 – Внутренняя структура подсистемы "Wind_Sim_Sektor" для имитации поведения скорости ветра в разных секторах вращения с учетом эффекта затенения

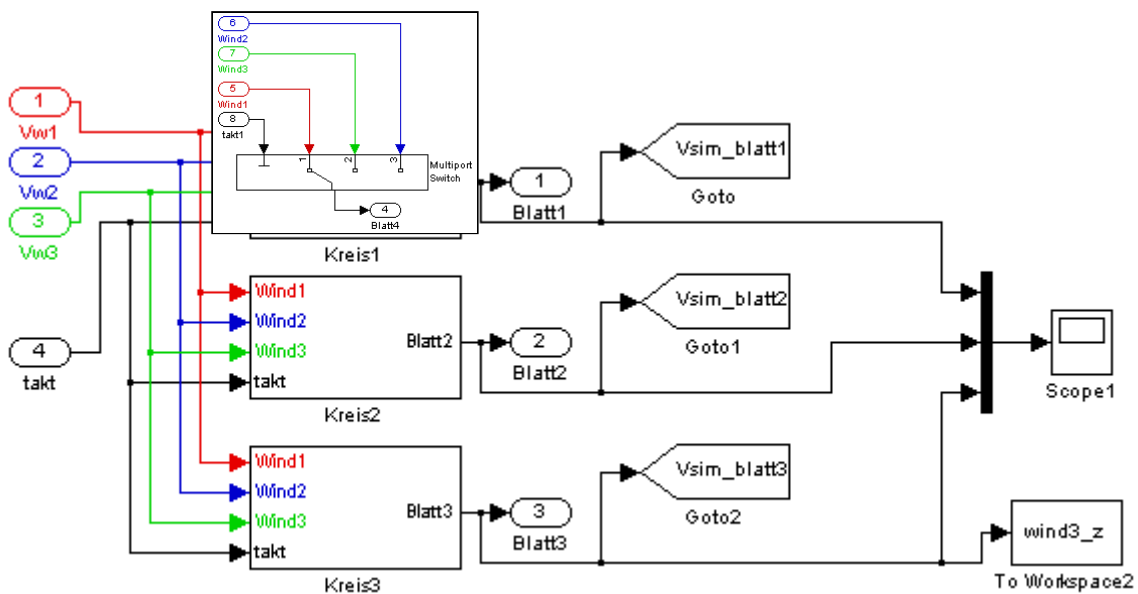


Рисунок Б.10 – Внутренняя структура подсистем "Wind_Sim_Blatt" и «Kreis» для распределения скорости ветра по лопастям с учетом неравномерности скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса вследствие эффекта затенения башни

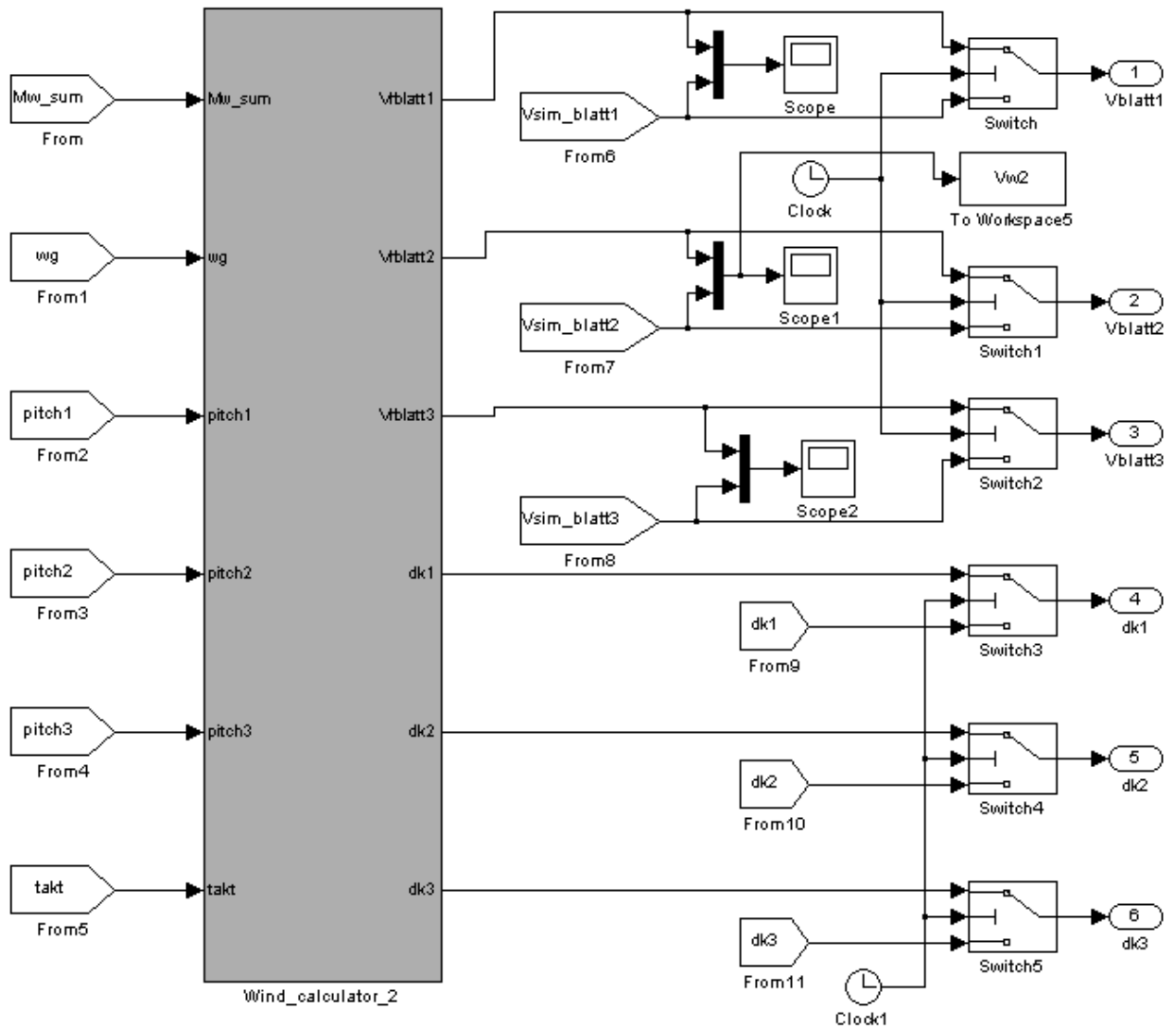


Рисунок Б.12 – Внутренняя структура подсистемы "Wind_calculator", которая вычисляет скорости ветра для лопастей в различных секторах вращения, а так же долевые коэффициенты регулятора скорости вращения ветроколеса

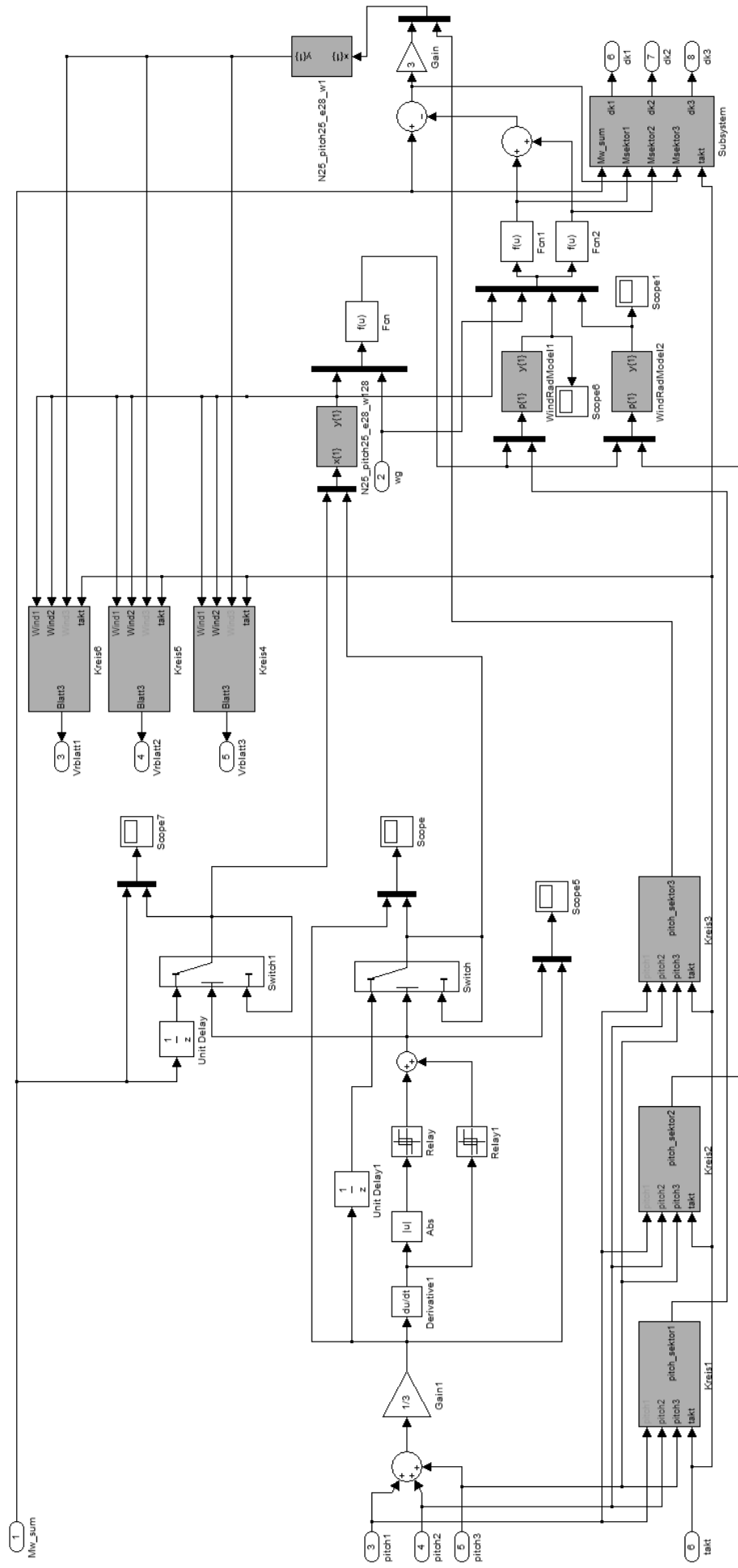


Рисунок Б.13 – Внутренняя структура подсистемы "Wind_calculator_2", которая вычисляет скорости ветра для лопастей в различных секторах вращения, а так же долевые коэффициенты регулятора скорости вращения ветроколеса

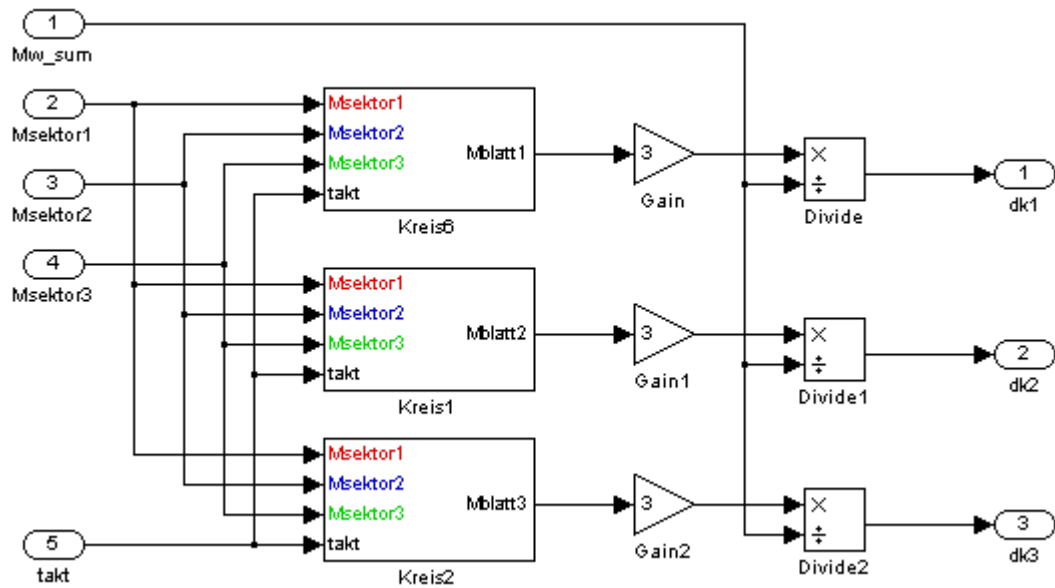


Рисунок Б.14 – Внутренняя структура блока "Subsystem" для определения долевых коэффициентов регулятора скорости вращения ветроколеса

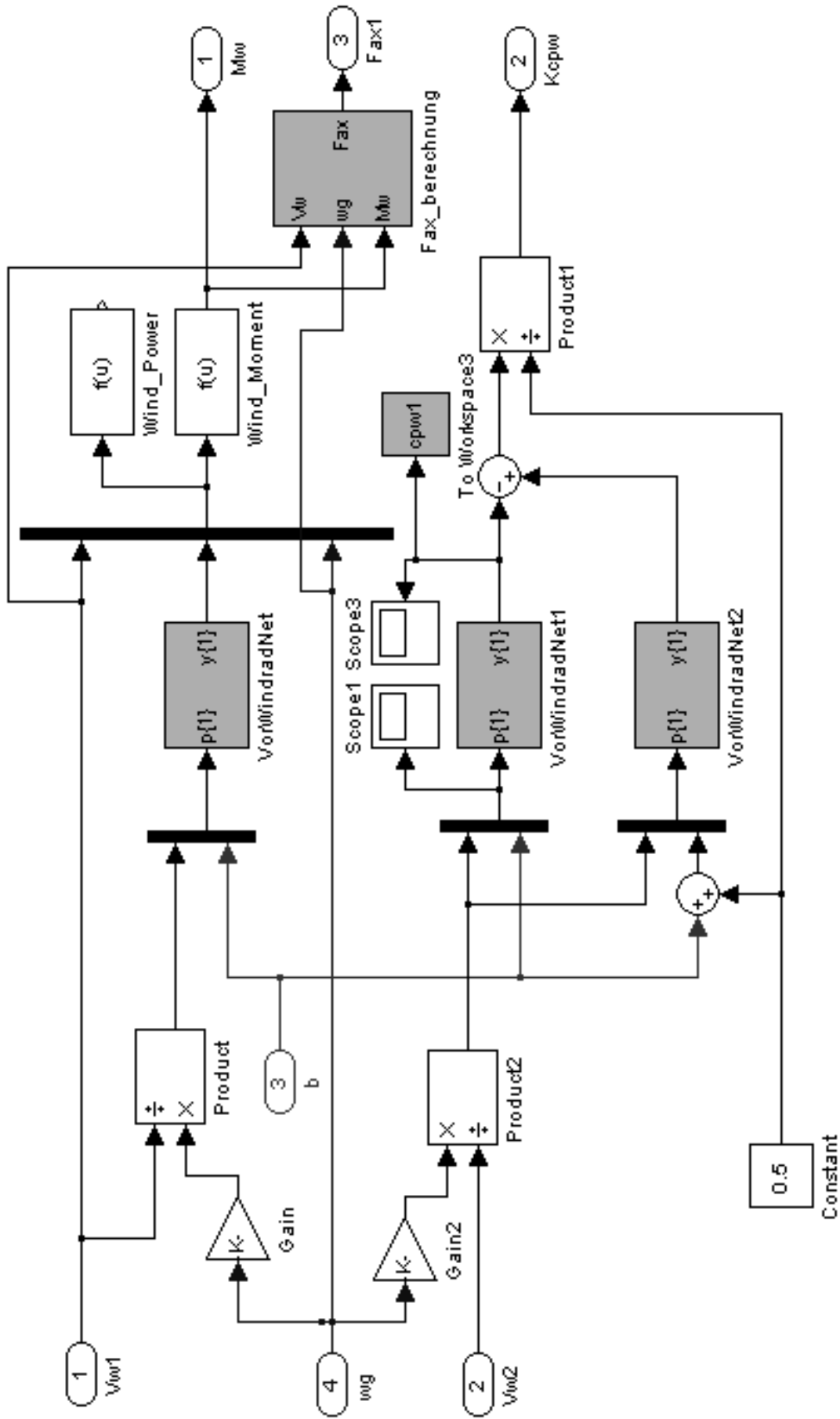


Рисунок Б.16 – Внутренняя структура подсистемы "Windradmodel" для определения рабочих параметров ветроколеса (момента, аксиального усилия, коэффициента - K_{w1})

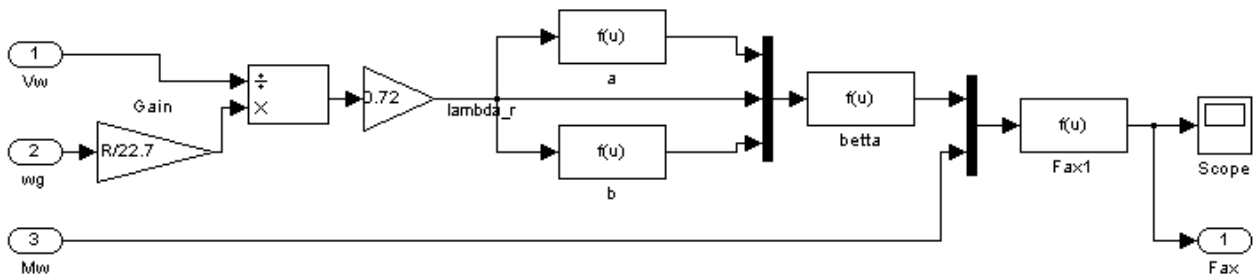


Рисунок Б.17 – Внутренняя структура подсистемы "Fax_berechnung" для расчета аксиального усилия, которое действует на фрагмент лопасти на расстоянии действующего радиуса от центра вращения ветроколеса

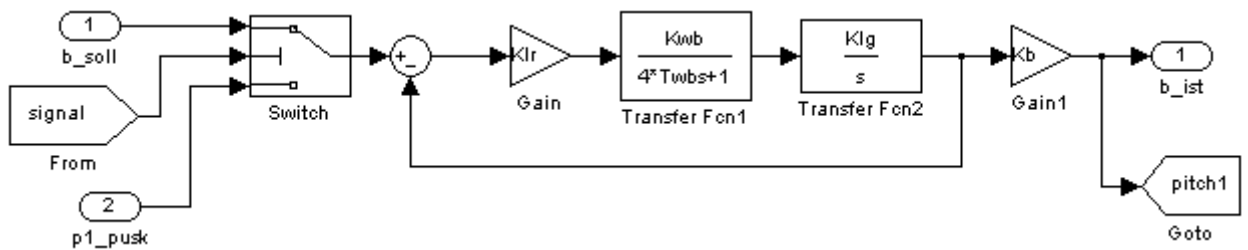


Рисунок Б.18 – Внутренняя структура подсистемы "pitch_regelung" для регулирования pitch-угла посредством позиционного привода с возможностью переключения задания с блока управления пуском на регулятор скорости

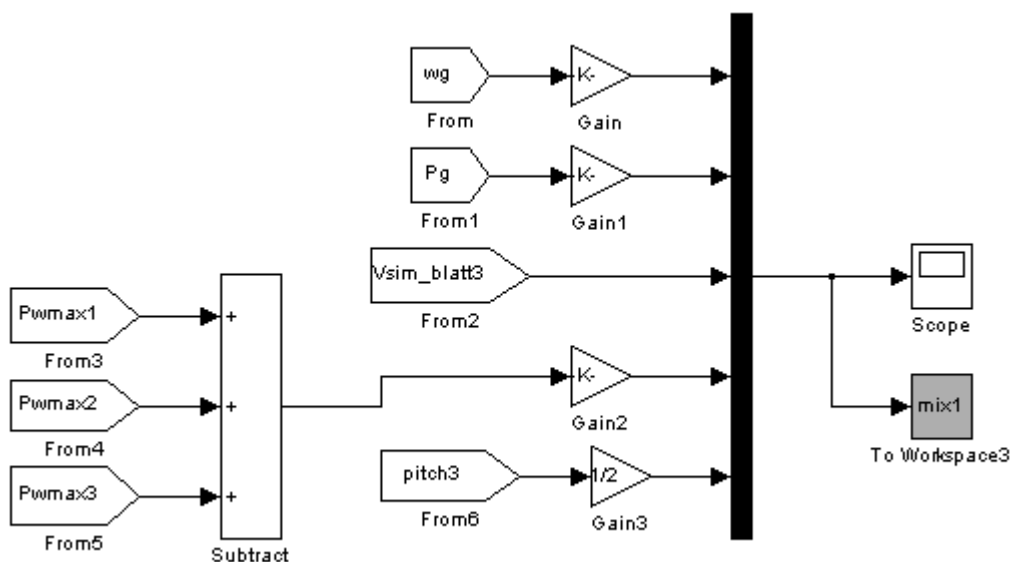


Рисунок Б.19 – Внутренняя структура подсистемы "Messung" для регистрации результатов моделирования

Программа Б.1 – Текст программы инициализации параметров математической модели двухконтурной системы регулирования ветрогенераторной установки в программном пакете Matlab

```

% Паспортные данные генератора
Pn=110000;
Un=380;
In=194;
n=1513;
cosf=0.86;
sinf=0.51;
fn=50;
zp=2;
Jm=2.2;
% Расчетные номинальные параметры генератора
wn=n*6.28/60
Fn=Isdn*Lh
Mn=Pn/wn
% Параметры модели генератора
Isdn=sqrt(2)*In*sqrt(1-cosf)
Isqn=sqrt(2*((In)^2)-(Isdn^2))
wrn=-2*3.14*(fn-(zp*n/60))
Tr=Isqn/(wrn*Isdn)
Xg=(sinf-(cosf*Isdn/Isqn))*Un/(sqrt(3)*In)
Xh=((sqrt(2)*Un)/(sqrt(3)*Isdn))-Xg
Rs=(wrn*Isdn*Xh)/(6.28*fn*Isqn)
g=Xg/Xh
Ts=Xh/(6.28*fn*Rs)
Kr=1
Lh=Xh/(6.28*fn)
Ls=(Xh+Xg)/(6.28*fn)
% Параметры ветроколеса
K=0.35;
ur=22.7;
R=8.5;
cpwmax=0.47;
Mb=160;
Jl=3*Mb*((0.44*R)^2);
J=Jm+(Jl/(u^2))
% Параметры регуляторов для системы векторного регулирования момента генератора
Tsg=0.001;
Tq1=g*Ts;
Tq2=2*Tsg/Rs;
Td1=g*Ts;
Td2=2*Tsg/Rs;
Tf1=Tr;
Tf2=4*Tsg*Lh;
Tw1=8*Tsg;
Tw2=3*32*Tsg*Tsg/J;
% Параметры блока идентификации обратных связей

```

```

Tsi=0.001
Tko=(8*(Tsi^2))/(g*Ts*Rs)
Tkr=(8*(Tsi^2))*((g*Ts/(2*Tsi))-1)/(g*Ts)
% Параметры контура регулирования pitch-угла
Twb=0.005;
Kwb=0.00152;
Klg=10000;
Klr=0.8/(8*Twb*Kwb*Klg)
Ts1=0.05;
Kb=0.036;
D=17;
Vw=8;
wg=100;
% Параметры регулятора скорости вращения ветроколеса
Treg=4*Ts1
Vso2=Kb*0.49*(D^2)
To2=8*(Ts1^2)*Vso2/J
T=0.020

```

Программа Б.2 - Инициализация параметров математической модели для оценки эффективности работы ветроустановки в режиме частичной нагрузки

```

% Параметры модели для ветроустановки Vestas 112
R=55; ur=104; ld=5;
J=21100000; kw=3790000
срmax=0.482; wn=1.07

```


ПРИЛОЖЕНИЕ В

СЛОВО УПРАВЛЕНИЯ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ MICROMASTER 440, ПРОГРАММЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ, ДАННЫЕ РЕГИСТРАЦИИ ПЛОТНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

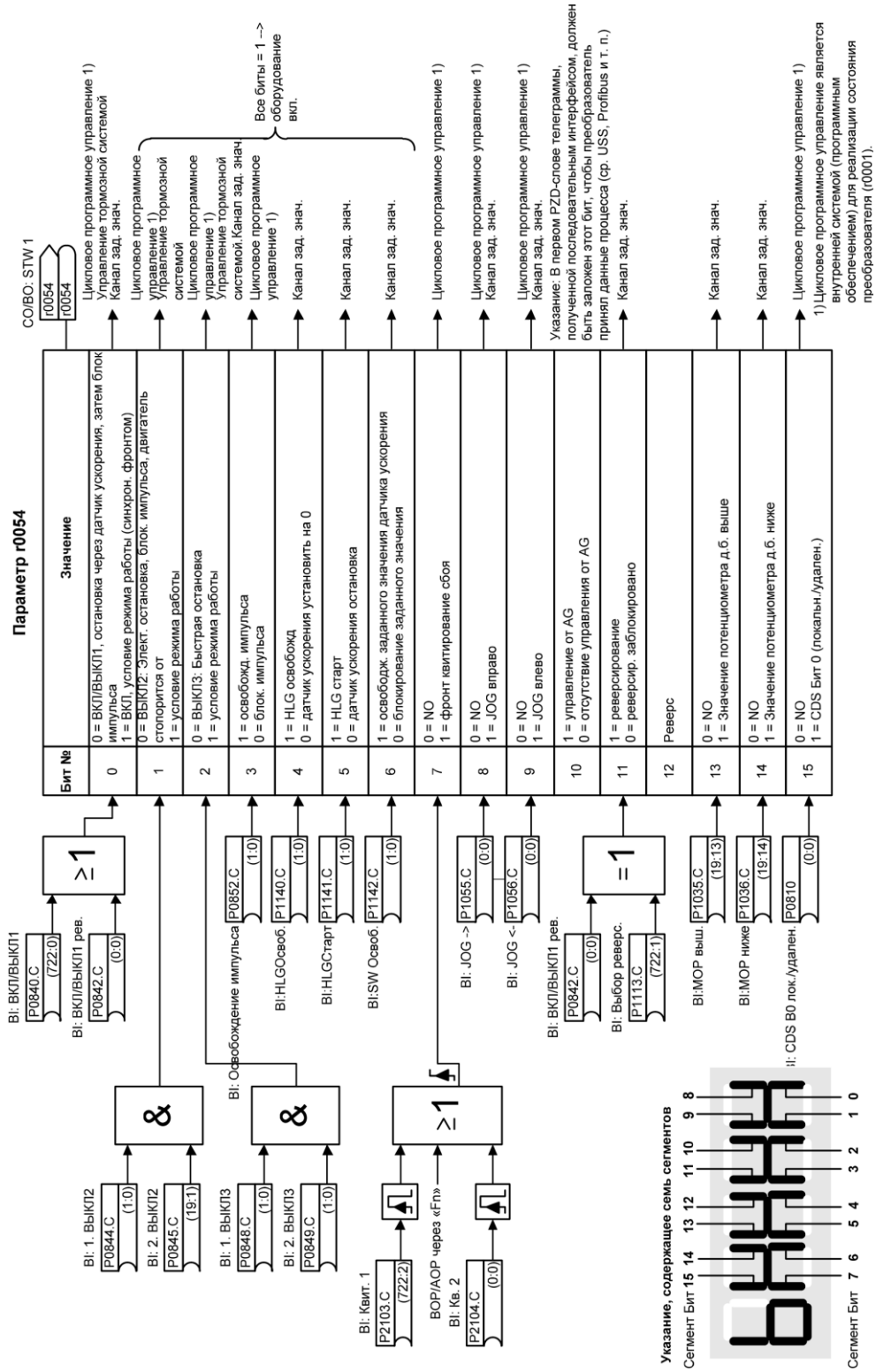


Рисунок В.1 – Слово управления преобразователя частоты Micromaster 440

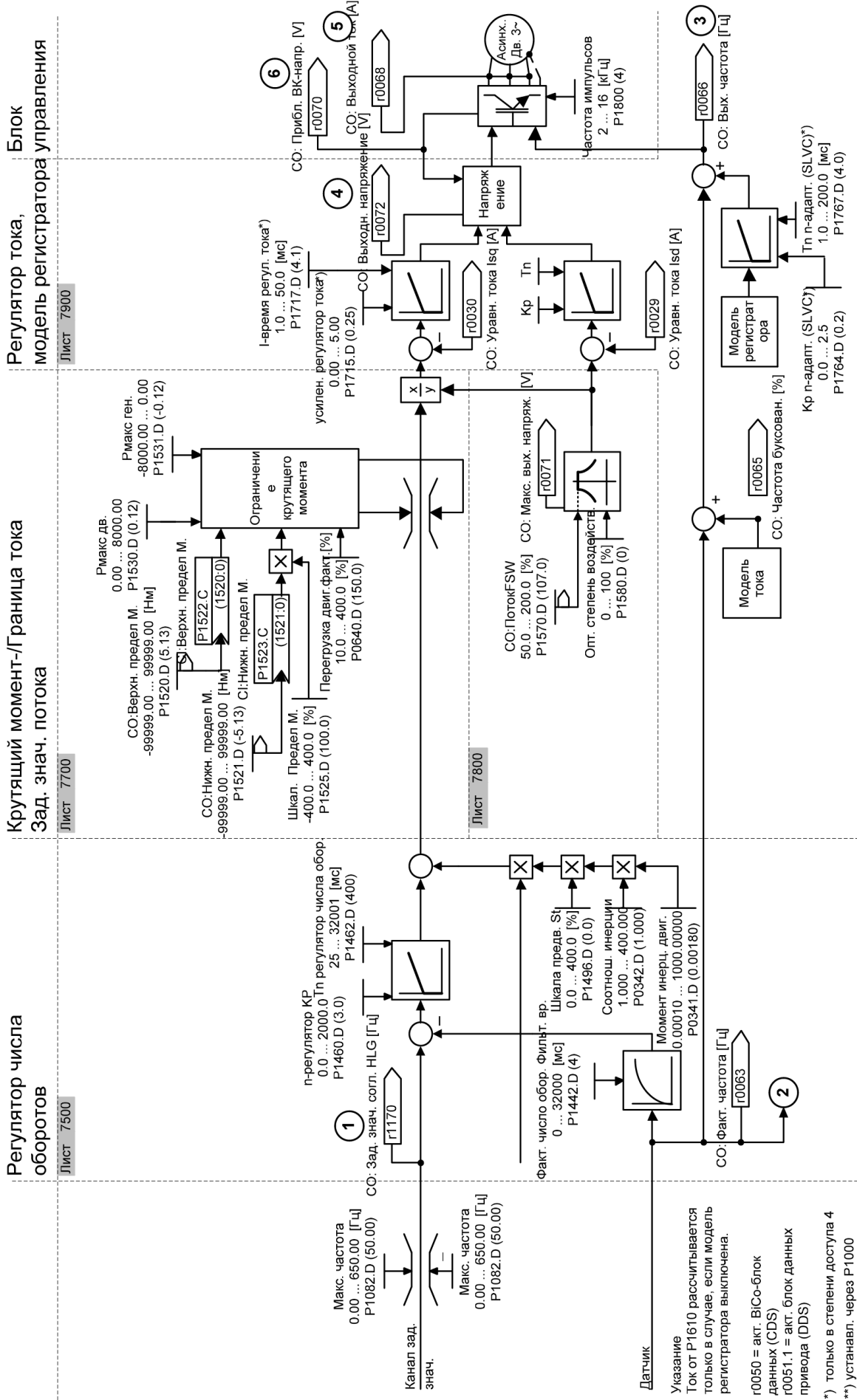


Рисунок В.2 – Структурная схема системы регулирования скорости преобразователя частоты Micromaster 440

*) только в степени доступа 4
**) установка через P1000

Программа В.1 – Текст программы расчета различных коэффициентов пропускания солнечного излучения в программном пакете Matlab

```

Mi=1/(costetaz+0.15*(93.885-tetaz)^(-1.25));%воздушная масса
Mi1=Mi*991.8/1013;%корректировка по высоте местности
%коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеяние
tR=exp((-0.0903*(Mi1^0.84))*(1+Mi1-(Mi1^(1.01))));
alpha=0.0314;
TA=1.832*alpha;
%коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние
tA=exp(-(TA^0.873)*(1+TA-TA^0.7088)*Mi)^0.9108;
dO=0.32;
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света озоном
tO=1-0.1611*dO*Mi*((1+139.48*dO*Mi)^(-0.3035))-
-0.002715*dO*Mi*((1+0.044*dO*Mi+0.0003*((dO*Mi)^2))^(-1));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света газовой
смесью
tg=exp(-0.0127*(Mi1^0.26));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света парами
воды
tH2O=1-2.4959*dH2O*Mi*((1+79.034*dH2O*Mi)^0.6828+6.385*dH2O*Mi)^
^(-1));
Kdiff=1.05;
Ba=0.5*(1+costetaz);
%учет аэрозольного рассеяния
tAA=1-0.1*(1-Mi+Mi^1.06)*(1-tA);
%учет рассеяния частицами сухого воздуха
tAS=tA/tAA;

```

Программа В.2 – Текст программы расчета суточного поступления энергии солнечного излучения на 1 м^2 поверхности фотоэлектрического модуля в пакете Matlab

```

clc
clear all
close all
phi=48.002778;%широта
lambda=37.805278;%долгота;
lambdasr=30;%долгота среднего меридиана рассматриваемого часового
пояса
leapyear=1; %0=365 дней в году; 1=366 дней в году
timezone=3; %часовой пояс
deltatdekr=1;
komegas=15;
E0=1367; %Солнечная постоянная
A=0.2;%альбедо
day=166;

Kgor=0.91 %Для лета 0.91, для зимы 1.14
dH2O=1.3 %Для лета 1.3, для зимы 3
k=1

%Учет номера дня в году
J=360*day/(365+leapyear);
%Солнечное склонение
delta=0.3948-23.2559*cos((J+9.1)*pi/180)-
0.3915*cos((2*J+5.4)*pi/180)-0.1764*cos((3*J+26)*pi/180); %В
градусах
%Уравнение времени
TE=0.0066+7.3525*cos((J+85.9)*pi/180)+9.9359*cos((2*J+108.9)*pi/180)
+0.3387*cos((3*J+105.2)*pi/180); %в минутах
%Время захода
tmzah=1/komegas*(acos(-tan(phi*pi/180)*tan(delta*pi/180))*180/pi-
(lambda-lambdasr))+deltatdekr-TE/60+12; %в часах
%Продолжительность светового дня
TS=2/komegas*acos(-tan(phi*pi/180)*tan(delta*pi/180))*180/pi; %в
часах
%время восхода
tmvosh=tmzah-TS;%в часах
Ye=48
beta=90-Ye;

tmvosh=tmvosh*3600;%перевод в секунды
tmzah=tmzah*3600;%перевод в секунды
i=0;

EGG=[0,0];
for k=1:1:4
for MV=tmvosh:60:tmzah %60 секунд - шаг изменения параметра времени
i=i+1;

```

```

%среднее местное время
SMV=MV/3600-timezone+4*lambda/60;%в часах
%Реальное местное время
RMV=SMV+TE/60;%в часах
%Часовой угол
omega=(12-RMV)*15;
%угол высоты Солнца

ys=asin(cos(omega*pi/180)*cos(phi*pi/180)*cos(delta*pi/180)+sin(phi*
pi/180)*sin(delta*pi/180))*180/pi
%Азимут солнца
if RMV <= 12
    as=180-acos((sin(ys*pi/180)*sin(phi*pi/180)-
sin(delta*pi/180))/(cos(ys*pi/180)*cos(phi*pi/180)))*180/pi
elseif RMV > 12
    as=180+acos((sin(ys*pi/180)*sin(phi*pi/180)-
sin(delta*pi/180))/(cos(ys*pi/180)*cos(phi*pi/180)))*180/pi
end

if k ~= 4
%выбор типа ориентирования
if k == 1 %Фиксированная
ae=0;
ye=Ye;
elseif k == 2
ae=(as+180);%Одноосная азимутальная
ye=Ye;
elseif k == 3
ae=as+180;%Двухосная
ye=90-ys;
end

%угол падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность
tetaz=90-ys;
%косинус угла падения солнечных лучей на горизонтальную
поверхность
costetaz=cos(tetaz*pi/180);
%угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность
tetag=acos(-cos(ys*pi/180)*sin(ye*pi/180)*cos((as-
ae)*pi/180)+sin(ys*pi/180)*cos(ye*pi/180))*180/pi;%в градусах

if tetag >= 90;
tetag1=90;
else
tetag1=tetag;
end

Mi=1/(costetaz+0.15*(93.885-tetaz)^(-1.25));%воздушная масса
Mil=Mi*991.8/1013;%корректировка по высоте местности
%коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеяние
tR=exp((-0.0903*(Mil^0.84))*(1+Mil-(Mil^(1.01))));
alpha=0.0314;
TA=1.832*alpha;

```

```

%коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние
tA=exp(-(TA^0.873)*(1+TA-TA^0.7088)*Mi)^0.9108;
dO=0.32;
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света озоном
tO=1-0.1611*dO*Mi*((1+139.48*dO*Mi)^(-0.3035))-
0.002715*dO*Mi*((1+0.044*dO*Mi+0.0003*((dO*Mi)^2))^(-1));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света газовой
смесью
tg=exp(-0.0127*(Mi1^0.26));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света парами
ВОДЫ
tH2O=1-
2.4959*dH2O*Mi*((1+79.034*dH2O*Mi)^0.6828+6.385*dH2O*Mi)^(-1);

Kdiff=1.05;
Ba=0.5*(1+costetaz);
%учет аэрозольного рассеяния
tAA=1-0.1*(1-Mi+Mi^1.06)*(1-tA);
%учет рассеяния частицами сухого воздуха
tAS=tA/tAA;

%плотность прямого излучения на горизонтальную поверхность
Eprhor=E0*costetaz*tR*tO*tg*tH2O*tA*Kgor;
%плотность диффузионного излучения на горизонтальную поверхность
Ediffhor=E0*costetaz*tO*tg*tH2O*tAA*(0.5*(1-tR)+Ba*(1-tAS))/(1-
Mi+Mi^1.02)*Kdiff;
%суммарная плотность излучения на горизонтальную поверхность
EGhor=Eprhor+Ediffhor;

%плотность прямого излучения на наклонной поверхности
Eprnakl=Eprhor*cos(tetagl*pi/180);

%коэффициент ясности неба
F=1-(Ediffhor/EGhor)^2;
%плотность диффузионного излучения на наклонную поверхность
Ediffnakl=Ediffhor*1/2*(1+cos(ye*pi/180))*(1+F*sin(ye*pi/180/2)^3)*(
1+F*cos(tetagl*pi/180)^2*cos(ys*pi/180)^3);

%плотность отраженной энергии на наклонную поверхность
Eotrnakl=EGhor*A*1/2*(1-cos(ye*pi/180));
%Суммарная плотность энергии на наклонную поверхность
EGG(k,i)=Eprnakl+Ediffnakl+Eotrnakl;
%текущее время
t(k,i)=MV/3600;%в часах
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

elseif k == 4 %с наклонной сью

d=sin(ys*pi/180)*sin(beta*pi/180)-
cos(ys*pi/180)*cos(as*pi/180)*cos(beta*pi/180)
q=cos(ys*pi/180)*sin(as*pi/180)

```

```

cosphim=d/sqrt(d*d+q*q);
sinphim=-q/sqrt(d*d+q*q);
%угол падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность
tetaz=90-ys;
%косинус угла падения солнечных лучей на горизонтальную
поверхность
costetaz=cos(tetaz*pi/180);
%угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность

costetag=cosphim*d-q*sinphim;
cosye=cosphim*sin(beta*pi/180);
ye=acos(cosye);

Mi=1/(costetaz+0.15*(93.885-tetaz)^(-1.25));%воздушная масса
Mi1=Mi*991.8/1013;%корректировка по высоте местности
%коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеяние
tR=exp((-0.0903*(Mi1^0.84))*(1+Mi1-(Mi1^(1.01))));
alpha=0.0314;
TA=1.832*alpha;
%коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние
tA=exp(-(TA^0.873)*(1+TA-TA^0.7088)*Mi)^0.9108;
dO=0.32;
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света озоном
tO=1-0.1611*dO*Mi*((1+139.48*dO*Mi)^(-0.3035))-
0.002715*dO*Mi*((1+0.044*dO*Mi+0.0003*((dO*Mi)^2))^(-1));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света газовой
смесью
tg=exp(-0.0127*(Mi1^0.26));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света парами
воды
tH2O=1-
2.4959*dH2O*Mi*((1+79.034*dH2O*Mi)^0.6828+6.385*dH2O*Mi)^(-1);

Kdiff=1.05;
Ba=0.5*(1+costetaz);
%учет аэрозольного рассеяния
tAA=1-0.1*(1-Mi+Mi^1.06)*(1-tA);
%учет рассеяния частицами сухого воздуха
tAS=tA/tAA;

%плотность прямого излучения на горизонтальную поверхность
Eprhor=E0*costetaz*tR*tO*tg*tH2O*tA*Kgor;
%плотность диффузионного излучения на горизонтальную поверхность
Ediffhor=E0*costetaz*tO*tg*tH2O*tAA*(0.5*(1-tR)+Ba*(1-tAS))/(1-
Mi+Mi^1.02)*Kdiff;
%суммарная плотность излучения на горизонтальную поверхность
EGhor=Eprhor+Ediffhor;

%плотность прямого излучения на наклонной поверхности
Eprnakl=Eprhor*costetag;

%коэффициент ясности неба

```

```

F=1-(Ediffhor/EGhor)^2;
%плотность диффузионного излучения на наклонную поверхность

Ediffnakl=Ediffhor*1/2*(1+cos(ye))*(1+F*(sin(ye/2))^3)*(1+F*(costeta
g^2)*cos(ys*pi/180)^3);

%плотность отраженной энергии на наклонную поверхность
Eotrnakl=EGhor*A*1/2*(1-cos(ye));
%Сумарная плотность энергии на наклонную поверхность
EGG(k,i)=Eprnakl+Ediffnakl+Eotrnakl;

%текущее время
t(k,i)=MV/3600;%в часах
end
ys1(k,i)=ys;

end;
i=i+1;
end;

%энергия поступившая на 1 м^2 фиксированной панели
Wfix=sum(EGG(1,:))/60
%энергия поступившая на 1 м^2 азимутально-ориентированной панели
Wazimut=sum(EGG(2,:))/60
%энергия поступившая на 1 м^2 азимутально-зенитальной
ориентированной
%панели (двухосная)
Wzenit_azimut=sum(EGG(3,:))/60
%энергия поступившая на 1 м^2 ориентированной панели с наклонной
осью
Wgibrid=sum(EGG(4,:))/60

figure(1)
plot(t(1,:),EGG(1,:),t(2,:),EGG(2,:),t(3,:),EGG(3,:),t(4,:),EGG(4,:))
)
grid on;
figure(2)
plot(t(1,:),ys1(1,:))
grid on

```

Программа В.3 – Текст программы расчета среднемесячного суточного поступления энергии солнечного излучения на 1 м² поверхности фотоэлектрического модуля в пакете Matlab

```

clc
clear all
close all
phi=48.002778;%широта
lambda=37.805278;%долгота;
lambdasr=30;%долгота среднего меридиана рассматриваемого часового
пояса
leapyear=1; %0=365 дней в году; 1=366 дней в году
timezone=3; %часовой пояс
deltatdekr=1;
komegas=15;
E0=1367; %Солнечная постоянная
A=0.2;%альбедо
firstday=152;%Первый день
lastday=181;%Последний день

Kgor=0.91 %Для лета 0.91, для зимы 1.14
dN20=1.3 %Для лета 1.3, для зимы 3

D=0;
for day=firstday:1:lastday

D=D+1; %Счетчик дней

%Учет номера дня в году
J=360*day/(365+leapyear);
%Солнечное склонение
delta=0.3948-23.2559*cos((J+9.1)*pi/180)-
0.3915*cos((2*J+5.4)*pi/180)-0.1764*cos((3*J+26)*pi/180); %В
градусах
%Уравнение времени
TE=0.0066+7.3525*cos((J+85.9)*pi/180)+9.9359*cos((2*J+108.9)*pi/180)
+0.3387*cos((3*J+105.2)*pi/180); %в минутах
%Время захода
tmzah=1/komegas*(acos(-tan(phi*pi/180)*tan(delta*pi/180))*180/pi-
(lambda-lambdasr))+deltatdekr-TE/60+12; %в часах
%Продолжительность светового дня
TS=2/komegas*acos(-tan(phi*pi/180)*tan(delta*pi/180))*180/pi; %в
часах
%время восхода
tmvosh=tmzah-TS;%в часах
Ye=24.74
beta=90-Ye;

tmvosh=tmvosh*3600;%перевод в секунды
tmzah=tmzah*3600;%перевод в секунды

```

```

i=0;
for k=1:1:4
for MV=tmvosh:60:tmzah %60 секунд - шаг изменения параметра времени
    i=i+1;
    %среднее местное время
    SMV=MV/3600-timezone+4*lambda/60;%в часах
    %Реальное местное время
    RMV=SMV+TE/60;%в часах
    %Часовой угол
    omega=(12-RMV)*15;
    %угол высоты Солнца

ys=asin(cos(omega*pi/180)*cos(phi*pi/180)*cos(delta*pi/180)+sin(phi*
pi/180)*sin(delta*pi/180))*180/pi;
    %Азимут солнца
    if RMV <= 12
        as=180-acos((sin(ys*pi/180)*sin(phi*pi/180)-
sin(delta*pi/180))/(cos(ys*pi/180)*cos(phi*pi/180)))*180/pi;
    elseif RMV > 12
        as=180+acos((sin(ys*pi/180)*sin(phi*pi/180)-
sin(delta*pi/180))/(cos(ys*pi/180)*cos(phi*pi/180)))*180/pi;
    end

    if k ~= 4
    %выбор типа ориентирования
    if k == 1 %Фиксированная
        ae=0;
        ye=Ye;
    elseif k == 2
        ae=(as+180);%Одноосная азимутальная
        ye=Ye;
    elseif k == 3
        ae=as+180;%Двухосная
        ye=90-ys;
    end

    %угол падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность
    tetaz=90-ys;
    %косинус угла падения солнечных лучей на горизонтальную
поверхность
    costetaz=cos(tetaz*pi/180);
    %угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность
    tetag=acos(-cos(ys*pi/180)*sin(ye*pi/180)*cos((as-
ae)*pi/180)+sin(ys*pi/180)*cos(ye*pi/180))*180/pi;%в градусах

    if tetag >= 90;
        tetag1=90;
    else
        tetag1=tetag;
    end

Mi=1/(costetaz+0.15*(93.885-tetaz)^(-1.25));%воздушная масса
Mil=Mi*991.8/1013;%корректировка по высоте местности

```



```

%коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеяние
tR=exp((-0.0903*(Mi1^0.84))*(1+Mi1-(Mi1^(1.01))));
alpha=0.0314;
TA=1.832*alpha;
%коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние
tA=exp(-(TA^0.873)*(1+TA-TA^0.7088)*Mi)^0.9108;
dO=0.32;
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света озоном
tO=1-0.1611*dO*Mi*((1+139.48*dO*Mi)^(-0.3035))-
0.002715*dO*Mi*((1+0.044*dO*Mi+0.0003*((dO*Mi)^2))^(-1));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света газовой
смесью
tg=exp(-0.0127*(Mi1^0.26));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света парами
Воды
tH2O=1-
2.4959*dH2O*Mi*((1+79.034*dH2O*Mi)^0.6828+6.385*dH2O*Mi)^(-1);

Kdiff=1.05;
Ba=0.5*(1+costetaz);
%учет аэрозольного рассеяния
tAA=1-0.1*(1-Mi+Mi^1.06)*(1-tA);
%учет рассеяния частицами сухого воздуха
tAS=tA/tAA;

%плотность прямого излучения на горизонтальную поверхность
Eprhor=E0*costetaz*tR*tO*tg*tH2O*tA*Kgor;
%плотность диффузионного излучения на горизонтальную поверхность
Ediffhor=E0*costetaz*tO*tg*tH2O*tAA*(0.5*(1-tR)+Ba*(1-tAS))/(1-
Mi+Mi^1.02)*Kdiff;
%суммарная плотность излучения на горизонтальную поверхность
EGhor=Eprhor+Ediffhor;

%плотность прямого излучения на наклонной поверхности
Eprnakl=Eprhor*cos(tetag1*pi/180);

%коэффициент ясности неба
F=1-(Ediffhor/EGhor)^2;
%плотность диффузионного излучения на наклонную поверхность

Ediffnakl=Ediffhor*1/2*(1+cos(ye*pi/180))*(1+F*sin(ye*pi/180/2)^3)*
(1+F*cos(tetag*pi/180)^2*cos(ys*pi/180)^3);

%плотность отраженной энергии на наклонную поверхность
Eotrnakl=EGhor*A*1/2*(1-cos(ye*pi/180));
%Сумарная плотность энергии на наклонную поверхность
EGG(k,i)=Eprnakl+Ediffnakl+Eotrnakl;
%текущее время
t(k,i)=MV/3600;%в часах

%%%%%%%%%
elseif k == 4 % с наклонной осью

```

```

d=sin(ys*pi/180)*sin(beta*pi/180)-
cos(ys*pi/180)*cos(as*pi/180)*cos(beta*pi/180)
q=cos(ys*pi/180)*sin(as*pi/180)

cosphim=d/sqrt(d*d+q*q);
sinphim=-q/sqrt(d*d+q*q);

%угол падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность
tetaz=90-ys;
%косинус угла падения солнечных лучей на горизонтальную
поверхность
costetaz=cos(tetaz*pi/180);
%угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность

costetag=cosphim*d-q*sinphim;
cosye=cosphim*sin(beta*pi/180);
ye=acos(cosye);

Mi=1/(costetaz+0.15*(93.885-tetaz)^(-1.25));%воздушная масса
Mil=Mil*991.8/1013;%корректировка по высоте местности
%коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеяние
tR=exp((-0.0903*(Mil^0.84))*(1+Mil-(Mil^(1.01))));
alpha=0.0314;
TA=1.832*alpha;
%коэффициент пропускания, учитывающий аэрозольное рассеяние
tA=exp(-(TA^0.873)*(1+TA-TA^0.7088)*Mi)^0.9108;
dO=0.32;
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света озоном
tO=1-0.1611*dO*Mil*((1+139.48*dO*Mil)^(-0.3035))-
0.002715*dO*Mil*((1+0.044*dO*Mil+0.0003*((dO*Mil)^2))^(-1));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света газовой
смесью
tg=exp(-0.0127*(Mil^0.26));
%коэффициент пропускания, учитывающий поглощение света парами
воды
tH2O=1-
2.4959*dH2O*Mil*((1+79.034*dH2O*Mil)^0.6828+6.385*dH2O*Mil)^(-1);

Kdiff=1.05;
Ba=0.5*(1+costetaz);
%учет аэрозольного рассеяния
tAA=1-0.1*(1-Mil+Mil^1.06)*(1-tA);
%учет рассеяния частицами сухого воздуха
tAS=tA/tAA;

%плотность прямого излучения на горизонтальную поверхность
Eprhor=E0*costetaz*tR*tO*tg*tH2O*tA*Kgor;
%плотность диффузионного излучения на горизонтальную поверхность
Ediffhor=E0*costetaz*tO*tg*tH2O*tAA*(0.5*(1-tR)+Ba*(1-tAS))/(1-
Mil+Mil^1.02)*Kdiff;
%суммарная плотность излучения на горизонтальную поверхность
EGhor=Eprhor+Ediffhor;

```

```

%плотность прямого излучения на наклонной поверхности
Eprnakl=Eprhor*costetag;

%коэффициент ясности неба
F=1-(Ediffhor/EGhor)^2;
%плотность диффузионного излучения на наклонную поверхность

Ediffnakl=Ediffhor*1/2*(1+cos(γe))*(1+F*(sin(γe/2))^3)*(1+F*(costeta
g^2)*cos(γs*pi/180)^3);

%плотность отраженной энергии на наклонную поверхность
Eotrnakl=EGhor*A*1/2*(1-cos(γe));
%Сумарная плотность энергии на наклонную поверхность
EGG(k,i)=Eprnakl+Ediffnakl+Eotrnakl;

%текущее время
t(k,i)=MV/3600;%в часах
end
ys1(k,i)=ys;

end;
i=i+1;
end;

%энергия поступившая на 1 м^2 фиксированной панели
Wfix(D)=sum(EGG(1,:))/60;
%энергия поступившая на 1 м^2 азимутально ориентированной панели
Wazimut(D)=sum(EGG(2,:))/60;
%энергия поступившая на 1 м^2 азимутально-зенитально ориентированной
панели
Wazimut_zenit(D)=sum(EGG(3,:))/60;
%энергия поступившая на 1 м^2 ориентированной панели с наклонной
осью
Wgibrid(D)=sum(EGG(4,:))/60;

end

%Энергия средняя за месяц
WfixMiddle=sum(Wfix(:))/(lastday-firstday+1)
WazimutMiddle=sum(Wazimut(:))/(lastday-firstday+1)
Wazimut_zenitMiddle=sum(Wazimut_zenit(:))/(lastday-firstday+1)
WgibridMiddle=sum(Wgibrid(:))/(lastday-firstday+1)

figure(1)
plot(Wfix(:))
grid on

figure(2)
plot(Wazimut(:))
grid on
figure(3)

```

```
plot(Wazimut_zenit(:))  
grid on
```

```
figure(4)  
plot(Wgibrid(:))  
grid on
```

Таблица В.1 – Результаты регистрации параметров фиксированного и ориентированного фотоэлектрического модуля в процессе измерения (10.06.2021)

№ изм. цикла	Время измерения (час)	Ток КЗ фиксированного модуля (А)	Плотность солнечной энергии фиксированного модуля (Вт/м ²)	Ток КЗ ориентированного модуля (А)	Плотность солнечной энергии ориентированного модуля (Вт/м ²)
1	2	3	4	5	6
1	7,06	0,33	121,44	1,04	383,06
2	7,14	0,35	128,8	1,07	395,57
3	7,22	0,37	136,16	1,11	408,08
4	7,3	0,39	143,52	1,14	418,53
5	7,38	0,42	154,56	1,18	433,69
6	7,46	0,45	165,6	1,21	446,79
7	7,54	0,49	180,32	1,26	463,57
8	7,6	0,52	191,36	1,29	475,64
9	7,68	0,55	202,4	1,33	487,71
10	7,74	0,56	206,08	1,34	492,42
11	7,82	0,58	213,44	1,36	499,78
12	7,9	0,61	224,48	1,39	510,82
13	7,98	0,60	220,8	1,38	506,11
14	8,05	0,62	228,16	1,39	512,44
15	8,13	0,66	242,88	1,43	525,1
16	8,22	0,72	264,96	1,48	544,09
17	8,3	0,78	287,04	1,53	564,11
18	8,42	0,82	301,76	1,56	572,65
19	8,55	0,94	345,92	1,66	610,63
20	8,62	0,98	360,64	1,69	621,23
21	8,7	1,04	382,72	1,74	639,19
22	8,78	1,1	404,8	1,78	655,09
23	8,87	1,12	412,16	1,78	656,27
24	8,95	1,12	412,16	1,77	651,12
25	9,02	1,2	441,6	1,83	674,38
26	9,1	1,3	478,4	1,92	705
27	9,18	1,4	515,2	2,00	735,62
28	9,27	1,4	515,2	1,98	727,38
29	9,35	1,53	563,04	2,09	769,04
30	9,43	1,59	585,12	2,13	783,91
31	9,52	1,64	603,52	2,16	794,07
32	9,6	1,69	621,92	2,19	805,26
33	9,68	1,72	632,96	2,20	809,09

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6
34	9,77	1,44	529,92	1,89	696,78
35	9,85	1,81	666,08	2,24	825,73
36	9,93	1,86	684,48	2,27	835,89
37	10,02	1,93	710,24	2,32	853,41
38	10,1	1,94	713,92	2,31	849,88
39	10,18	2,01	739,68	2,36	868,43
40	10,27	2,05	754,4	2,37	873,88
41	10,35	2,08	765,44	2,39	878,74
42	10,43	2,1	772,8	2,39	878,89
43	10,52	2,14	787,52	2,40	883,31
44	10,6	2,18	802,24	2,43	892,88
45	10,68	2,22	816,96	2,45	900,39
46	10,77	2,26	831,68	2,47	907,9
47	10,85	2,3	846,4	2,49	916,44
48	10,93	2,34	861,12	2,51	923,95
49	11,02	2,36	868,48	2,51	925,13
50	11,1	2,36	868,48	2,50	918,95
51	11,18	2,41	886,88	2,54	933,23
52	11,27	2,44	897,92	2,54	936,03
53	11,35	2,47	908,96	2,56	942,95
54	11,43	2,48	912,64	2,56	942,51
55	11,52	2,51	923,68	2,58	948,4
56	11,6	2,51	923,68	2,57	944,28
57	11,68	2,53	931,04	2,58	948,55
58	11,77	2,44	897,92	2,48	911,31
59	11,85	2,45	901,6	2,48	912,93
60	11,93	2,5	920	2,52	928,24
61	12,02	2,47	908,96	2,48	914,11
62	12,1	2,51	923,68	2,52	926,77
63	12,18	2,56	942,08	2,57	945,17
64	12,27	2,62	964,16	2,62	965,19
65	12,35	2,64	971,52	2,64	971,52
66	12,43	2,64	971,52	2,64	971,52
67	12,52	2,62	964,16	2,62	964,16
68	12,6	2,56	942,08	2,56	942,08
69	12,68	2,6	956,8	2,60	957,83
70	12,77	2,62	964,16	2,63	967,25
71	12,85	2,6	956,8	2,61	960,92
72	12,93	2,59	953,12	2,60	958,27

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6
73	13,02	2,61	960,48	2,63	968,72
74	13,1	2,6	956,8	2,63	968,13
75	13,18	2,55	938,4	2,59	952,82
76	13,27	2,45	901,6	2,50	920,14
77	13,35	2,48	912,64	2,54	933,24
78	13,43	2,45	901,6	2,52	926,32
79	13,52	2,44	897,92	2,52	928,82
80	13,6	2,4	883,2	2,50	918,22
81	13,68	2,36	868,48	2,47	908,65
82	13,77	2,34	861,12	2,47	907,47
83	13,85	2,3	846,4	2,43	895,84
84	13,93	2,25	828	2,41	885,68
85	14,02	2,22	816,96	2,40	881,85
86	14,1	2,16	794,88	2,35	864,92
87	14,18	2,15	791,2	2,36	868,45
88	14,27	2,1	772,8	2,33	857,26
89	14,35	2,08	765,44	2,33	856,08
90	14,43	2,05	754,4	2,32	852,25
91	14,52	2	736	2,32	852,39
92	14,6	1,92	706,56	2,23	818,83
93	14,68	1,9	699,2	2,23	820,74
94	14,77	1,9	699,2	2,25	828,98
95	14,85	1,86	684,48	2,23	820,44
96	14,93	1,81	666,08	2,20	809,25
97	15,02	1,74	640,32	2,16	793,79
98	15,1	1,72	632,96	2,16	793,64
99	15,18	1,69	621,92	2,15	789,81
100	15,27	1,6	588,8	2,17	796,86
101	15,35	1,6	588,8	2,10	772,14
102	15,43	1,6	588,8	2,12	780,38
103	15,52	1,54	566,72	2,09	767,57
104	15,6	1,4	515,2	1,96	721,2
105	15,68	1,25	460	1,83	674,24
106	15,77	1,2	441,6	1,80	664,08
107	15,85	1,12	412,16	1,74	638,76
108	15,93	1,12	412,16	1,76	645,97
109	16,02	1,14	419,52	1,79	660,54
110	16,1	1,06	390,08	1,73	636,25
111	16,18	1,03	379,04	1,71	630,36

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6
112	16,27	1,05	386,4	1,75	644,93
113	16,35	1,01	371,68	1,72	634,33
114	16,43	0,98	360,64	1,70	627,41
115	16,52	0,89	327,52	1,63	599,44
116	16,6	0,83	305,44	1,58	580,45
117	16,68	0,78	287,04	1,54	565,14
118	16,77	0,72	264,96	1,48	546,15
119	16,85	0,69	253,92	1,46	537,17
120	16,93	0,66	242,88	1,43	527,16
121	17,02	0,64	235,52	1,42	520,83
122	17,1	0,62	228,16	1,40	514,5
123	17,18	0,62	228,16	1,40	514,5
124	17,27	0,56	206,08	1,34	491,39
125	17,35	0,51	187,68	1,29	472,99
126	17,43	0,49	180,32	1,26	463,57
127	17,52	0,45	165,6	1,21	445,76
128	17,6	0,43	158,24	1,18	435,31
129	17,68	0,4	147,2	1,14	421,18
130	17,77	0,37	136,16	1,10	403,96
131	17,85	0,34	125,12	1,06	388,8
132	17,93	0,32	117,76	1,03	377,32
133	18,02	0,3	110,4	0,99	362,75

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ
 ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ
 STEP 7

SIMATIC Solar_32\SIMATIC 21.04.2022 11:59:58
 300(1)\CPU 314C-2 DP\...\OB1 - <offline>

OB1 - <offline>

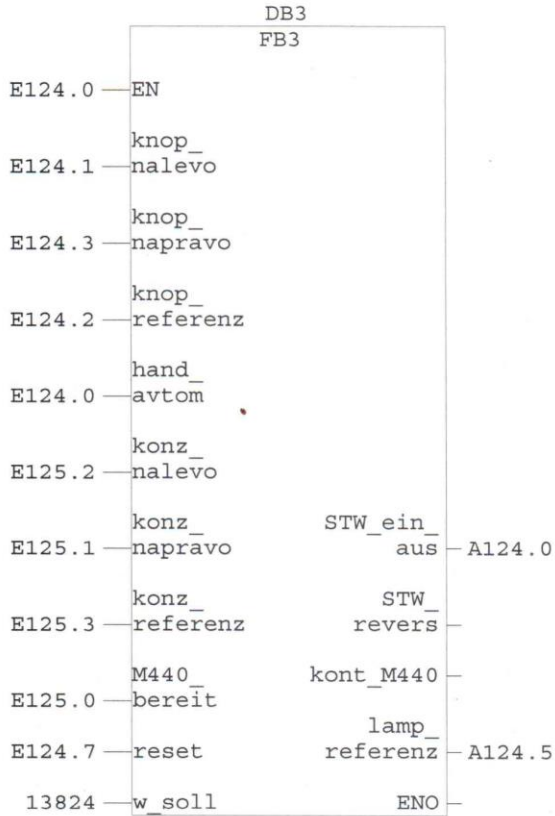
""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
 20.10.2021 15:02:31
Interface: 15.02.1996 16:51:12
Langen (Baustein / Code / Daten): 01048 00918 00028

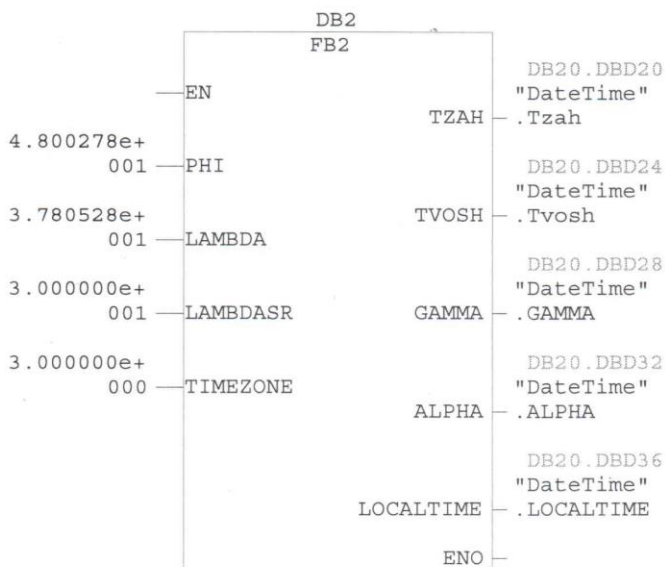
Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
TEMP		0.0	
OB1_EV_CLASS	Byte	0.0	Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
OB1_SCAN_1	Byte	1.0	1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
OB1_PRIORITY	Byte	2.0	Priority of OB Execution
OB1_OB_NUMBR	Byte	3.0	1 (Organization block 1, OB1)
OB1_RESERVED_1	Byte	4.0	Reserved for system
OB1_RESERVED_2	Byte	5.0	Reserved for system
OB1_PREV_CYCLE	Int	6.0	Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
OB1_MIN_CYCLE	Int	8.0	Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_MAX_CYCLE	Int	10.0	Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_DATE_TIME	Date_And_Time	12.0	Date and time OB1 started

OB1 – блок главного программного цикла

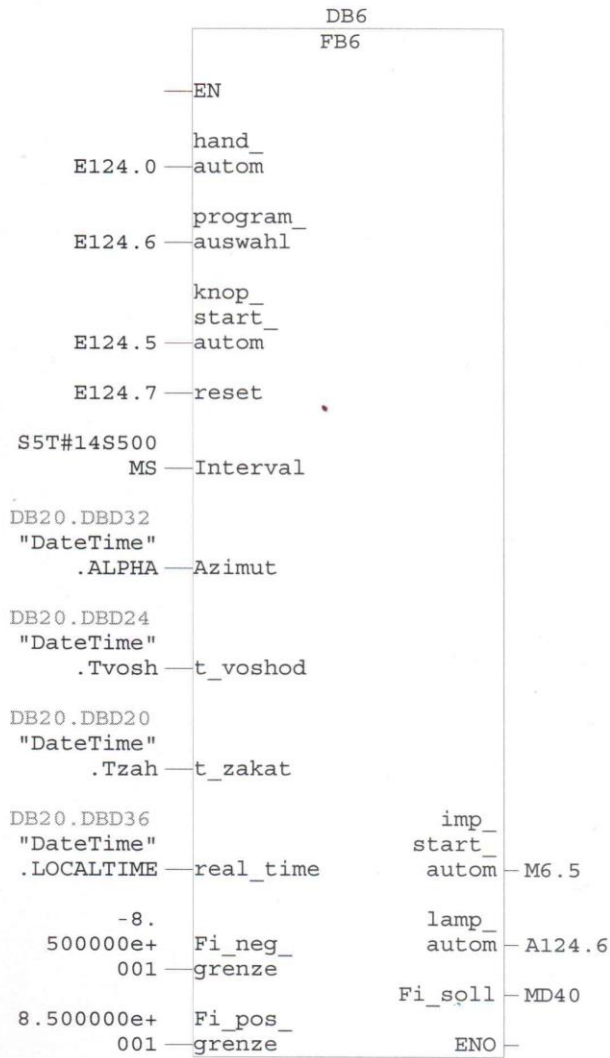
Netzwerk: 1 Ручное управление



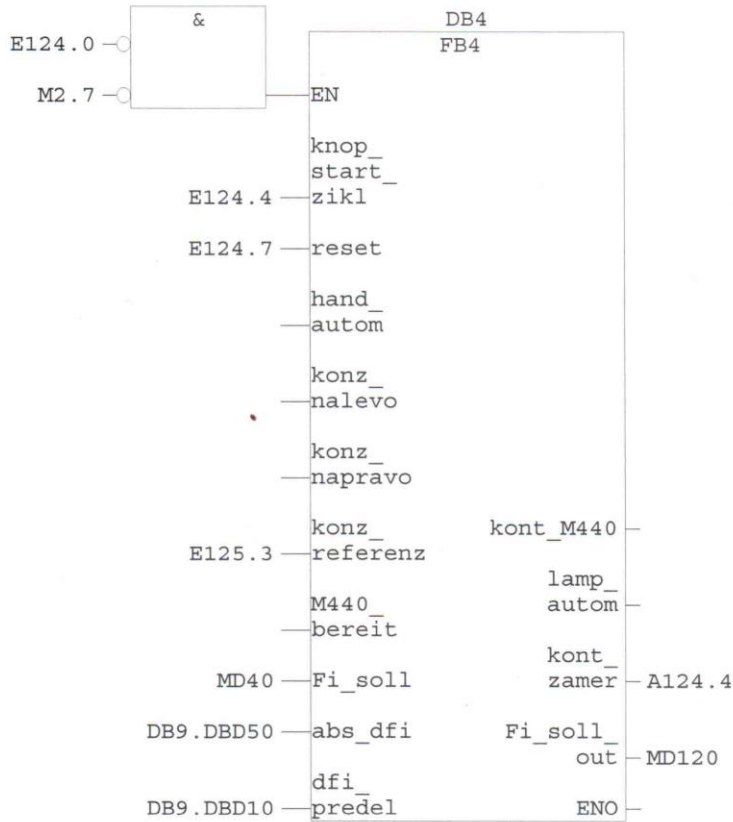
Netzwerk: 2 Расчет зенита и азимута по времени системного таймера



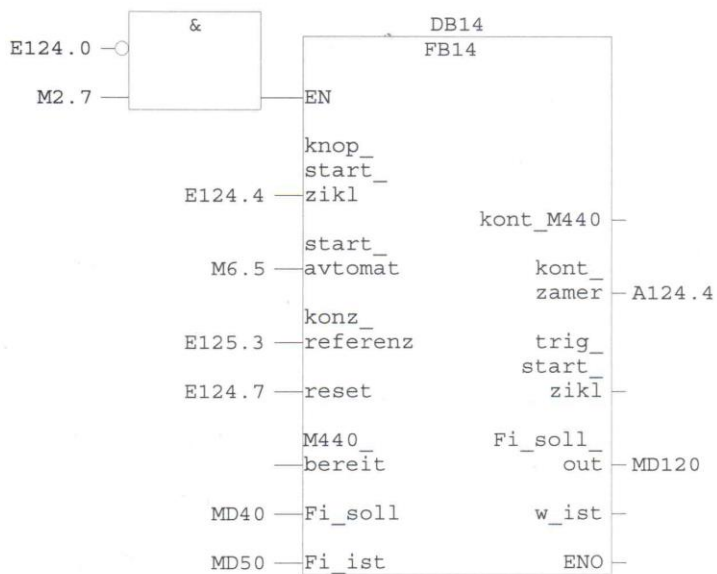
Netzwerk: 3 Формирование Fi_soll в автоматическом и полуавтоматическом реж.



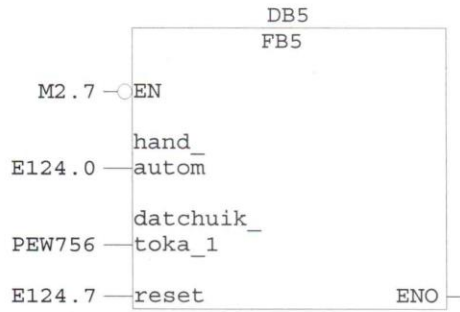
Netzwerk: 4 Полуавтоматический цикл



Netzwerk: 5 Управление измерительным циклом в режиме поиска максимума



Netzwerk: 6 Регистрация измерений



OB35 – блок обработки циклических прерываний по времени

SIMATIC

Solar_32\SIMATIC

21.04.2022 12:16:55

300(1)\CPU 314C-2 DP\...\OB35 - <offline>

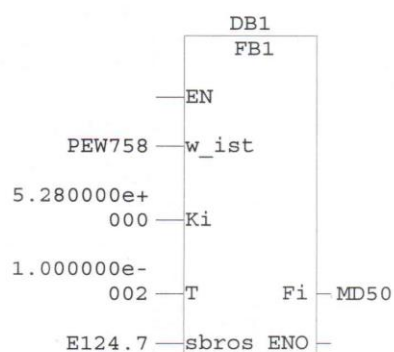
OB35 - <offline>

"CYC_INT5" Cyclic Interrupt 5
Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
 Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 20.10.2021 15:34:46
 Interface: 15.02.1996 16:51:11
Langen (Baustein / Code / Daten): 00922 00786 00026

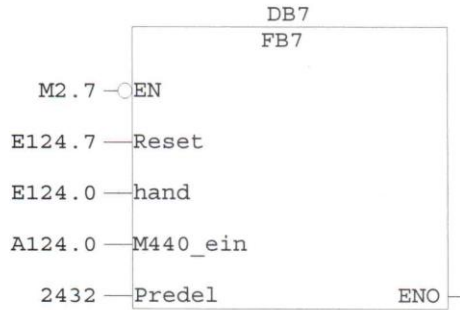
Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
TEMP		0.0	
OB35_EV_CLASS	Byte	0.0	Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
OB35_STRT_INF	Byte	1.0	16#36 (OB 35 has started)
OB35_PRIORITY	Byte	2.0	Priority of OB Execution
OB35_OB_NUMBR	Byte	3.0	35 (Organization block 35, OB35)
OB35_RESERVED_1	Byte	4.0	Reserved for system
OB35_RESERVED_2	Byte	5.0	Reserved for system
OB35_PHASE_OFFSET	Word	6.0	Phase offset (msec)
OB35_RESERVED_3	Int	8.0	Reserved for system
OB35_EXC_FREQ	Int	10.0	Frequency of execution (msec)
OB35_DATE_TIME	Date_And_Time	12.0	Date and time OB35 started

Baustein: OB35 "Cyclic Interrupt"

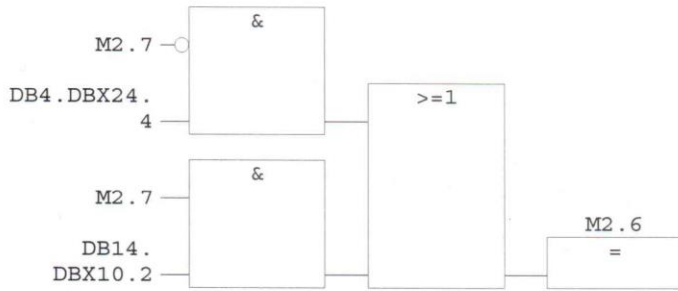
Netzwerk: 1 Определение угла поворота модуля



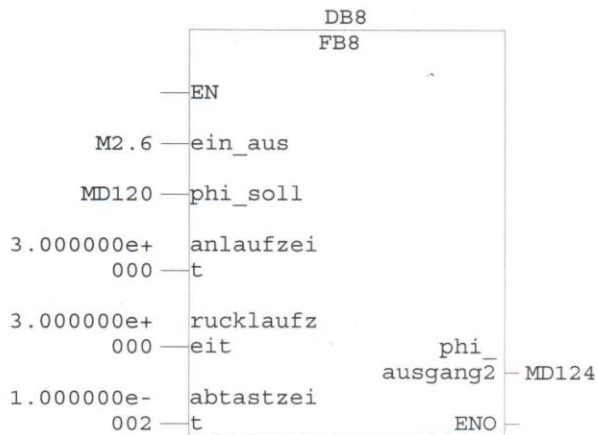
Netzwerk: 2 Определение графика изменения скорости по точкам



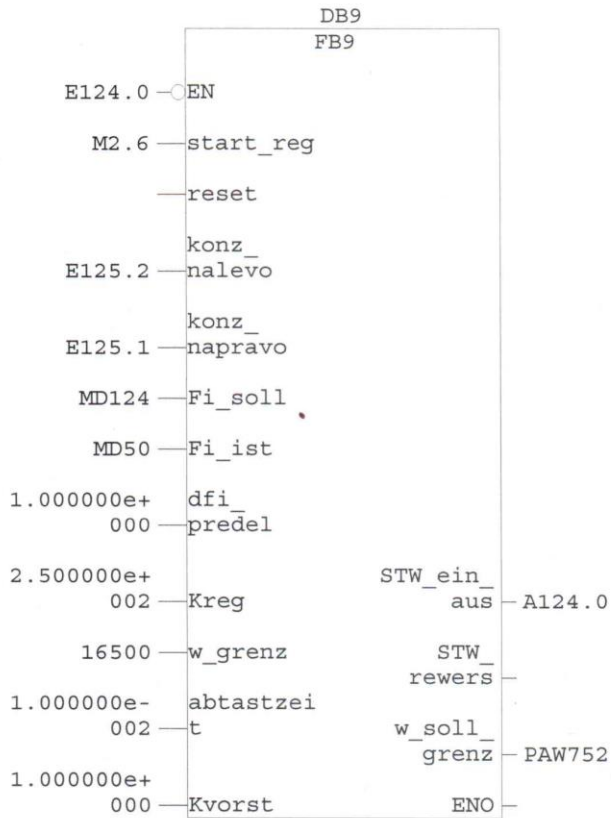
Netzwerk: 3 Выбор способа регистрации плотности солнечной энергии E_solar



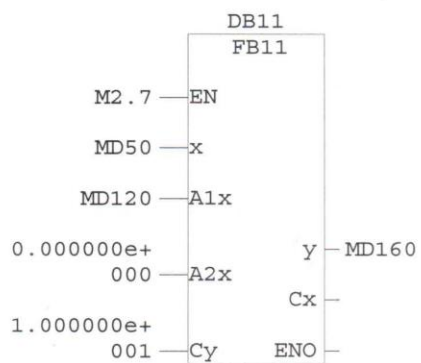
Netzwerk: 4 Задатчик угла поворота модуля



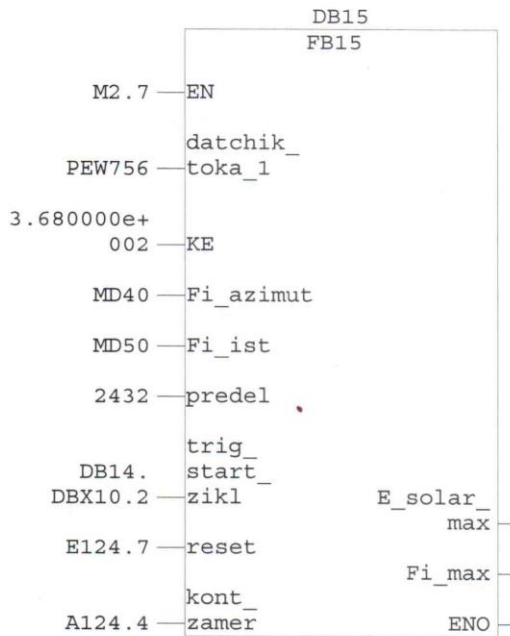
Netzwerk: 5 Регулятор положения



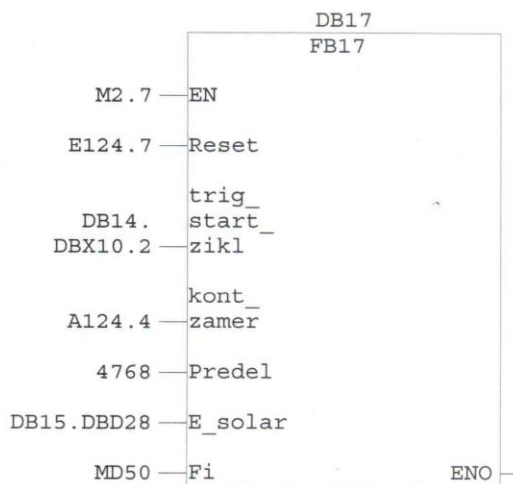
Netzwerk: 6 Порабола



Netzwerk: 7 Регистрация измерений



Netzwerk: 8 Запись E_solar и Fi_ist каждые 20ms за один поворот модуля



FB1 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
21.05.2021 17:41:34
Interface: 20.04.2021 09:45:32
Langen (Baustein / Code / Daten): 00446 00304 00004

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
w_ist	Int	0.0	0	
Ki	Real	2.0	0.000000e+000	
T	Real	6.0	0.000000e+000	
sbro	Bool	10.0	FALSE	
OUT		0.0		
Fi	Real	12.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
w	Real	16.0	0.000000e+000	
Fi_n1	Real	20.0	0.000000e+000	
pusk	Bool	24.0	FALSE	
w_ist_2	Int	26.0	0	
TEMP		0.0		
w1	Real	0.0		

Baustein: FB1 вычисление текущего угла

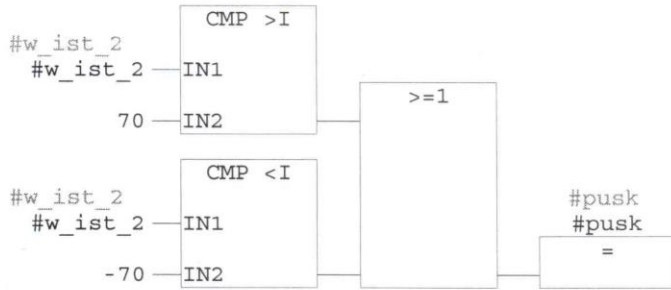
Netzwerk: 1 Прием и обработка реальной скорости привода
--

```

L   #w_ist   #w_ist
L   13824
-I
T   #w_ist_2 #w_ist_2
T   MW      30

```

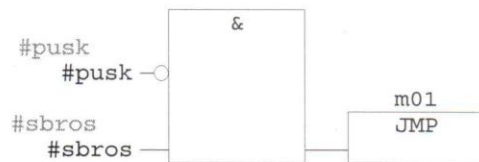
Netzwerk: 2 формирование сигнала пуск



Netzwerk: 3 обнуление угла



Netzwerk: 4 Проверка необходимости обработки блока



Netzwerk: 5 перевод скорости из INT в рад/сек

```

L   #w_ist_2      #w_ist_2
ITD
DTR
T   #w1           #w1
L   1.047000e+001
*R
L   1.382400e+004
/R
L   -1.000000e+000
*R
T   #w            #w

```

Netzwerk: 6 цифровой интегратор

```

L      #w      #w
L      #T      #T
*R
L      #Ki      #Ki
*R
L      #Fi_n1  #Fi_n1
+R
T      #Fi_n1  #Fi_n1
T      #Fi      #Fi

```

Netzwerk: 7 Фиксация угла достижения конечника референц. движение по часовой

```

U      M      1.7
SPB   m04
L      DB9.DBD  44
L      0.000000e+000
<R
=      M      1.0
U      M      1.0
U      DB4.DBX  24.3
UN     E      125.3
FP     M      1.1
=      M      1.2
S      M      1.6
UN     M      1.2
SPB   m02
L      -5.500000e+000
T      #Fi_n1      #Fi_n1
L      #Fi      #Fi
T      MD      10
m02: UN  DB4.DBX  24.3
R      M      1.6
m04: NOP  0

```

Netzwerk: 8 Фиксация угла достижения конечника референц. движ против часовой

```

U      M      1.6
SPB   m01
L      DB9.DBD  44
L      0.000000e+000
>R
=      M      1.3
U      M      1.3
U      DB4.DBX  24.3
UN     E      125.3
FP     M      1.4
=      M      1.5
S      M      1.7
UN     M      1.5
SPB   m03
L      6.500000e+000
T      #Fi_n1      #Fi_n1
L      #Fi      #Fi
T      MD      14
m03: UN  DB4.DBX  24.3
R      M      1.7
SPA   m01

```

Netzwerk: 9	обнуление
-------------	-----------

m00:	L	0.000000e+000		
	T	#Fi_n1	#Fi_n1	
	T	#Fi	#Fi	
m01:	NOP	0		

FB2 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
10.06.2020 21:24:36
Interface: 28.04.2020 19:34:09
Langen (Baustein / Code / Daten): 01260 01044 00104

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
PHI	Real	0.0	0.000000e+000	
LAMBDA	Real	4.0	0.000000e+000	
LAMBDA SR	Real	8.0	0.000000e+000	
TIMEZONE	Real	12.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
TZAH	Real	16.0	0.000000e+000	
TVOSH	Real	20.0	0.000000e+000	
GAMMA	Real	24.0	0.000000e+000	
ALPHA	Real	28.0	0.000000e+000	
LOCALTIME	Real	32.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
TEMP		0.0		
EDay	Int	0.0		
NBDays	Int	2.0		Число дней в году
NBDay	Int	4.0		Порядковый номер дня в году
PHIR	Real	6.0		
J	Real	10.0		
TEMP1	Real	14.0		
TEMP2	Real	18.0		
TEMP3	Real	22.0		
DELTA	Real	26.0		
TEMP4	Real	30.0		
TEMP5	Real	34.0		
TEMP6	Real	38.0		
TVR	Real	42.0		
TEMP7	Real	46.0		
TEMP8	Real	50.0		
TEMP9	Real	54.0		
TEMP10	Real	58.0		
SMV	Real	62.0		
RMW	Real	66.0		
OMEGA	Real	70.0		
TEMP11	Real	74.0		SIN DELTA
TEMP12	Real	78.0		SIN PHIR

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
TEMP13	Real	82.0		
TEMP14	Real	86.0		COS PHIR
TEMP15	Real	90.0		COS GAMMA
TEMP16	Real	94.0		

Baustein: FB2 Вычисление углов положения Солнца и времени восхода и заката

Netzwerk: 1 Вызов функции DayTime

```
CALL FC      1
NOP         0
```

Netzwerk: 2 Число дней в году

```
L      "DateTime".Year  DB20.DBW8
L      4
MOD
U      ==0
L      366
T      #NBDays          #NBDays      -- Число дней в году
L      1
T      #EDay            #EDay
SPB    A00
L      365
T      #NBDays          #NBDays      -- Число дней в году
L      0
T      #EDay            #EDay
A00:  NOP              0
```

Netzwerk: 3 Определение порядкового номера дня в году

```
//Январь
L      1
L      "DateTime".Month  DB20.DBW10
==I
L      0
SPB    A02
//Февраль
L      2
L      "DateTime".Month  DB20.DBW10
==I
L      31
SPB    A02
//Март
L      3
L      "DateTime".Month  DB20.DBW10
==I
L      59
SPB    A01
//Апрель
L      4
L      "DateTime".Month  DB20.DBW10
==I
```

```

L      90
SPB   A01
//Май
L      5
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      120
SPB   A01
//Июнь
L      6
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      151
SPB   A01
//Июль
L      7
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      181
SPB   A01
//Август
L      8
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      212
SPB   A01
//Сентябрь
L      9
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      243
SPB   A01
//Октябрь
L      10
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      273
SPB   A01
//Ноябрь
L      11
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      304
SPB   A01
//Декабрь
L      12
L      "DateTime".Month DB20.DBW10
==I
L      334
SPB   A01
//Доп. день в високосном году
A01: L      #EDay          #EDay
      +I
//Порядковый номер дня в году
A02: L      "DateTime".Day DB20.DBW12
      +I
      T      #NBDay          #NBDay
-- Порядковый номер дня в году

```


Netzwerk: 4	Широта в радианах
-------------	-------------------

```

L   #PHI          #PHI
L   1.745329e-002
*R
T   #PHIR         #PHIR

```

Netzwerk: 5	Параметр J в радианах
-------------	-----------------------

```

L   #NBDay        #NBDay        -- Порядковый номер дня в году
ITD
DTR
L   #NBDays       #NBDays       -- Число дней в году
ITD
DTR
/R
L   6.283185e+000
*R
T   #J            #J

```

Netzwerk: 6	Солнечное склонение DELTA в радианах
-------------	--------------------------------------

```

L   #J            #J
L   1.588250e-001
+R
COS
L   2.325590e+001
*R
T   #TEMP1        #TEMP1
L   #J            #J
L   2.000000e+000
*R
L   9.424800e-002
+R
COS
L   3.915000e-001
*R
T   #TEMP2        #TEMP2
L   #J            #J
L   3.000000e+000
*R
L   4.537860e-001
+R
COS
L   1.764000e-001
*R
T   #TEMP3        #TEMP3
L   3.948000e-001
L   #TEMP1        #TEMP1
-R
L   #TEMP2        #TEMP2
-R
L   #TEMP3        #TEMP3
-R
L   1.745329e-002
*R
T   #DELTA        #DELTA

```

Netzwerk: 7	Уравнение времени
-------------	-------------------

```

L      #J          #J
L      1.499238e+000
+R
COS
L      7.352500e+000
*R
T      #TEMP4      #TEMP4
L      #J          #J
L      2.000000e+000
*R
L      1.900664e+000
+R
COS
L      9.935900e+000
*R
T      #TEMP5      #TEMP5
L      #J          #J
L      3.000000e+000
*R
L      1.836086e+000
+R
COS
L      3.387000e-001
*R
T      #TEMP6      #TEMP6
L      6.600000e-003
+R
L      #TEMP4      #TEMP4
+R
L      #TEMP5      #TEMP5
+R
T      #TVR        #TVR

```

Netzwerk: 8	Время захода Солнца в часах
-------------	-----------------------------

```

L      #DELTA      #DELTA
TAN
T      #TEMP7      #TEMP7
L      #PHIR      #PHIR
TAN
L      #TEMP7      #TEMP7
*R
NEGR
ACOS
L      5.729578e+001
*R
T      #TEMP8      #TEMP8
L      #LAMBDA     #LAMBDA
-R
L      #LAMBDA SR  #LAMBDA SR
+R
L      1.500000e+001
/R
L      1.300000e+001
+R
T      #TEMP9      #TEMP9
L      #TVR        #TVR
L      6.000000e+001
/R
NEGR

```

```
L    #TEMP9      #TEMP9
+R
T    #TZAH       #TZAH
```

Netzwerk: 9 Время восхода солнца в часах

```
L    #TEMP8      #TEMP8
L    1.333333e-001
*R
NEGR
L    #TZAH       #TZAH
+R
T    #TVOSH      #TVOSH
```

Netzwerk: 10 Среднее местное время в часах

```
L    6.666670e-002
L    #LAMBDA     #LAMBDA
*R
L    #TIMEZONE   #TIMEZONE
-R
T    #TEMP10     #TEMP10
L    "DateTime".Minute DB20.DBW16
ITD
DTR
L    6.000000e+001
/R
L    "DateTime".Hour  DB20.DBW14
ITD
DTR
+R
T    #LOCALTIME  #LOCALTIME
L    #TEMP10     #TEMP10
+R
T    #SMV        #SMV
```

Netzwerk: 11 Реальное местное время в часах

```
L    #TVR        #TVR
L    6.000000e+001
/R
L    #SMV        #SMV
+R
T    #RMW        #RMW
```

Netzwerk: 12 Часовой угол в радианах на час

```
L    1.200000e+001
L    #RMW        #RMW
-R
L    1.500000e+001
*R
L    1.745329e-002
*R
T    #OMEGA      #OMEGA
```

Netzwerk: 13	Зенитальный угол в градусах
--------------	-----------------------------

```

L      #DELTA      #DELTA
SIN
T      #TEMP11     #TEMP11      -- SIN DELTA
L      #PHIR       #PHIR
SIN
T      #TEMP12     #TEMP12      -- SIN PHIR
*R
T      #TEMP13     #TEMP13
L      #PHIR       #PHIR
COS
T      #TEMP14     #TEMP14      -- COS PHIR
L      #DELTA     #DELTA
COS
*R
L      #OMEGA      #OMEGA
COS
*R
L      #TEMP13     #TEMP13
+R
ASIN
L      5.729578e+001
*R
T      #GAMMA      #GAMMA

```

Netzwerk: 14	Азимутальный угол в градусах
--------------	------------------------------

```

L      #GAMMA      #GAMMA
L      1.745329e-002
*R
COS
T      #TEMP15     #TEMP15      -- COS GAMMA
ACOS
SIN
L      #TEMP12     #TEMP12      -- SIN PHIR
*R
L      #TEMP11     #TEMP11      -- SIN DELTA
-R
L      #TEMP15     #TEMP15      -- COS GAMMA
/R
L      #TEMP14     #TEMP14      -- COS PHIR
/R
ACOS
L      5.729578e+001
*R
T      #TEMP16     #TEMP16

L      #RMW        #RMW
L      1.200000e+001
<=R
L      1.800000e+002
L      #TEMP16     #TEMP16
-R
SPB   A03
L      1.800000e+002
L      #TEMP16     #TEMP16
+R
A03: T      #ALPHA      #ALPHA

```

FB3 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
26.04.2021 16:20:41
Interface: 08.04.2020 10:44:06
Langen (Baustein / Code / Daten): 00484 00330 00002

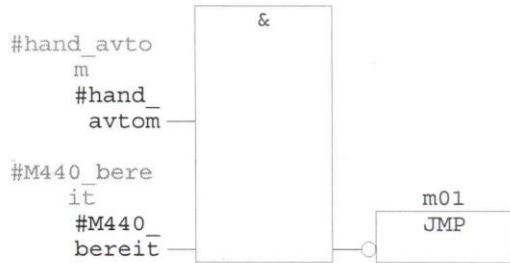
Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
knop_nalevo	Bool	0.0	FALSE	
knop_napravo	Bool	0.1	FALSE	
knop_referenz	Bool	0.2	FALSE	
hand_avtom	Bool	0.3	FALSE	
konz_nalevo	Bool	0.4	FALSE	
konz_napravo	Bool	0.5	FALSE	
konz_referenz	Bool	0.6	FALSE	
M440_bereit	Bool	0.7	FALSE	
reset	Bool	1.0	FALSE	
w_soll	Int	2.0	0	
OUT		0.0		
STW_ein_aus	Bool	4.0	FALSE	
STW_revers	Bool	4.1	FALSE	
kont_M440	Bool	4.2	FALSE	
lamp_referenz	Bool	4.3	FALSE	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
ref_anford	Bool	6.0	FALSE	
TEMP		0.0		

Baustein: FB3 Управление в ручном режиме

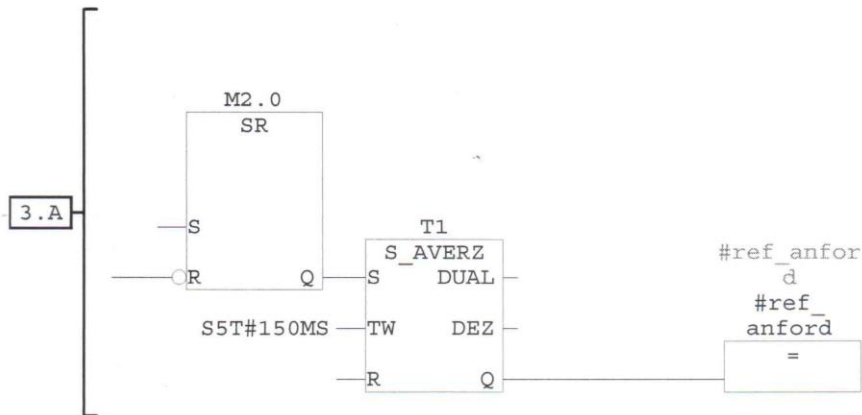
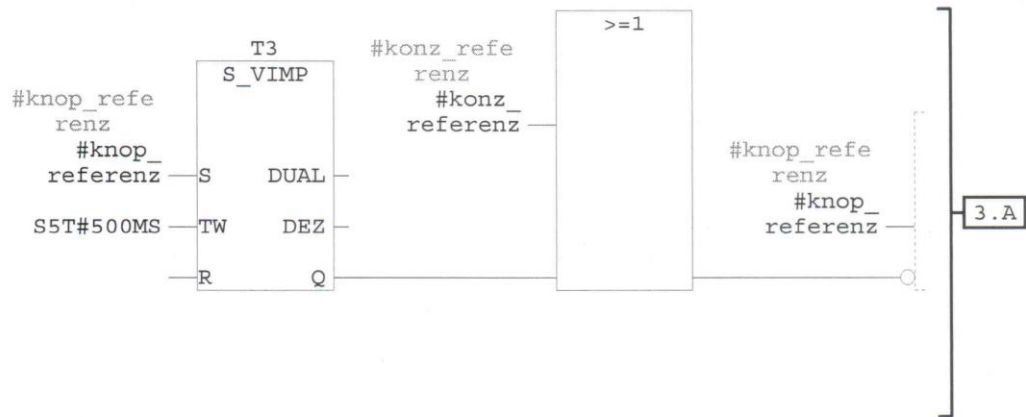
Netzwerk: 1 Включение контактора M440 в ручном режиме



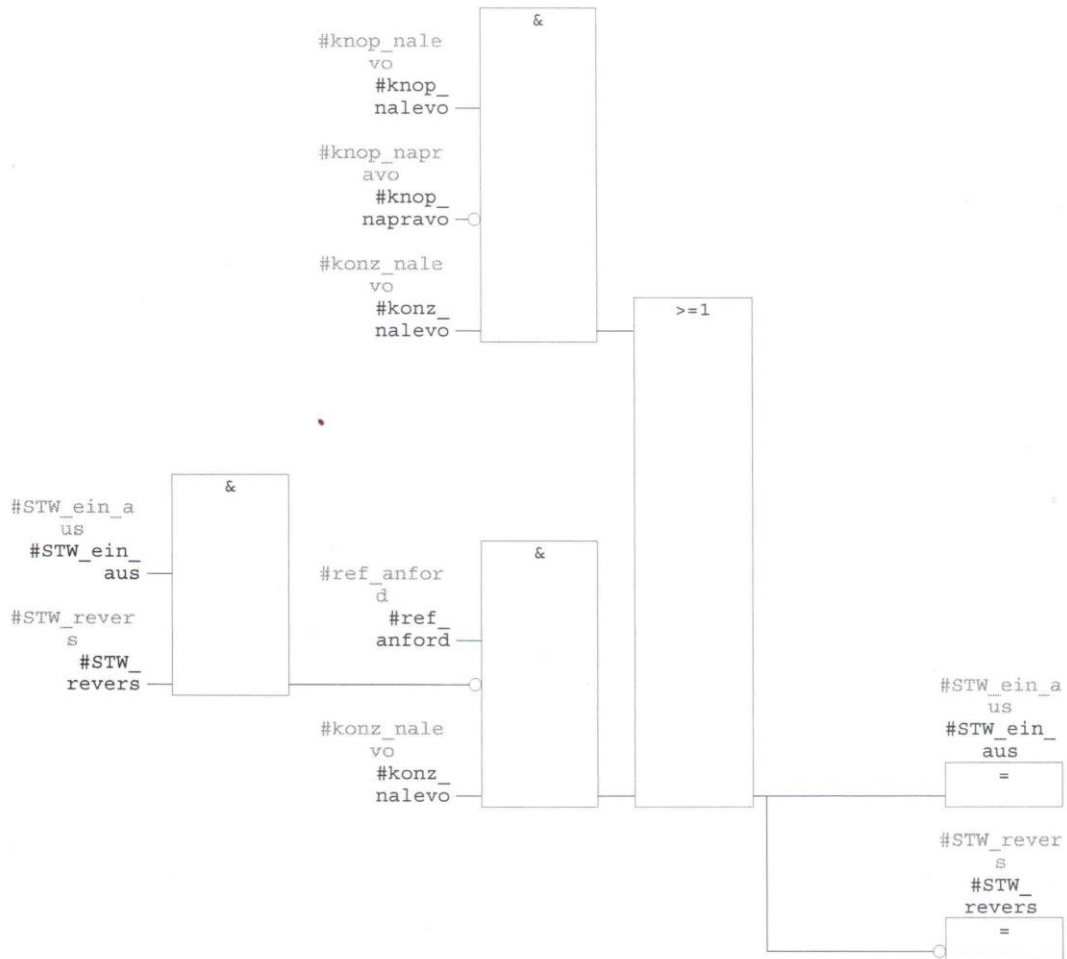
Netzwerk: 2 Вход в ручной режим



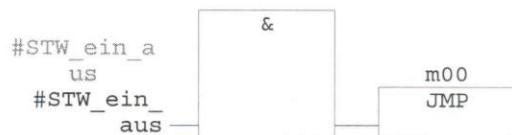
Netzwerk: 3 Зарезование референцирования



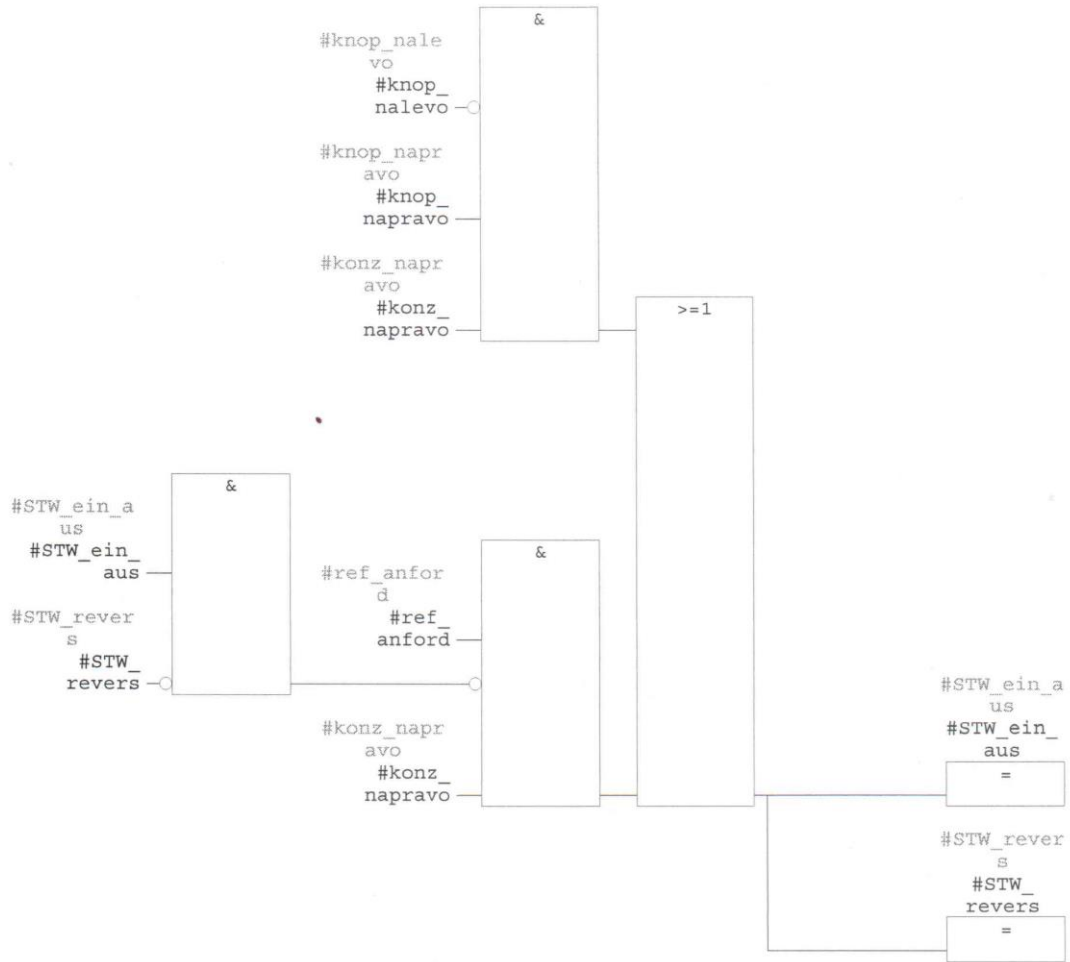
Netzwerk: 4 Движение влево



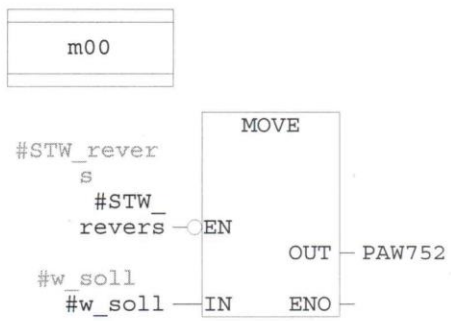
Netzwerk: 5 Обход



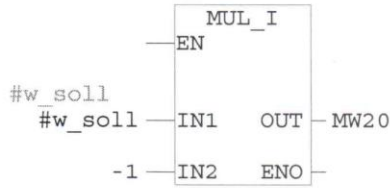
Netzwerk: 6 Движение вправо



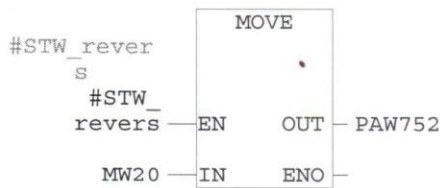
Netzwerk: 7 Положительное задание на скорость



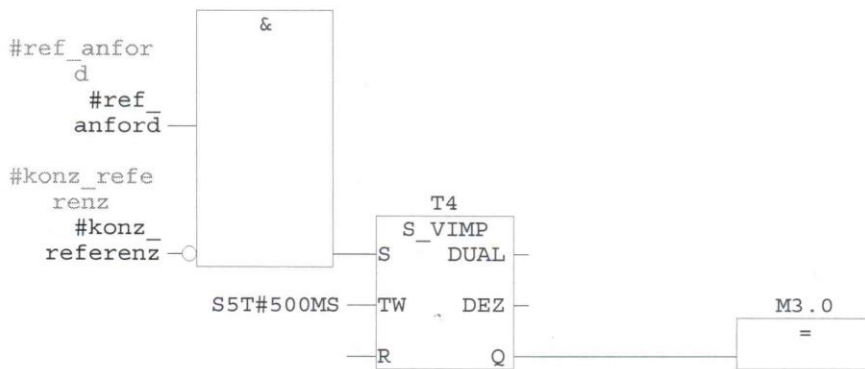
Netzwerk: 8 Отрицательное задание на скорость



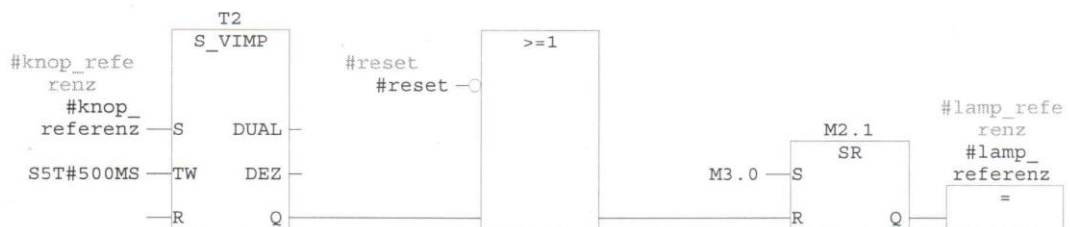
Netzwerk: 9 Отрицательное задание на скорость



Netzwerk: 10 Импульс референцирования



Netzwerk: 11 Сигнализация референцирования



Netzwerk: 12 Сброс при выходе из ручного режима
--

	SPA	m02		
m01:	R	#STW_ein_aus	#STW_ein_aus	
	R	#STW_revers	#STW_revers	
	R	#ref_anford	#ref_anford	
m02:	NOP	0		

FB6 - <offline>

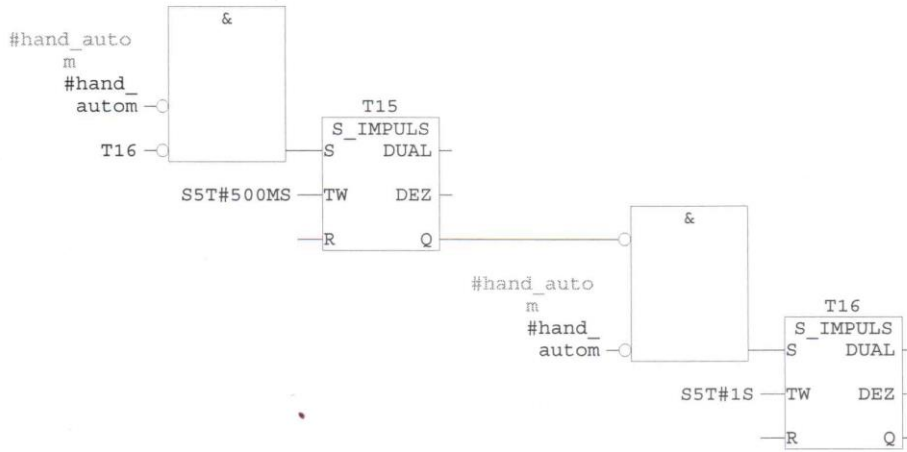
""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
27.05.2021 16:51:30
Interface: 29.04.2020 11:16:23
Langen (Baustein / Code / Daten): 01320 01070 00000

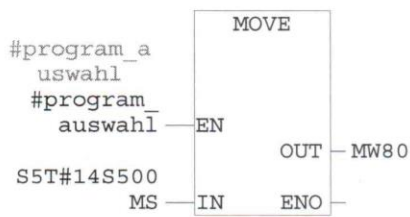
Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
hand_autom	Bool	0.0	FALSE	
program_auswahl	Bool	0.1	FALSE	
knop_start_autom	Bool	0.2	FALSE	
reset	Bool	0.3	FALSE	
Interval	S5Time	2.0	S5T#0MS	
Azimut	Real	4.0	0.000000e+000	
t_voshod	Real	8.0	0.000000e+000	
t_zakat	Real	12.0	0.000000e+000	
real_time	Real	16.0	0.000000e+000	
Fi_neg_grenze	Real	20.0	0.000000e+000	
Fi_pos_grenze	Real	24.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
imp_start_autom	Bool	28.0	FALSE	
lamp_autom	Bool	28.1	FALSE	
Fi_soll	Real	30.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
nomer_takta	Int	34.0	0	
imp_azimut_anford	Bool	36.0	FALSE	
t_gr_tvoshod	Bool	36.1	FALSE	
t_gr_tzakat	Bool	36.2	FALSE	
TEMP		0.0		

Baustein: FB6 Управление в автоматическом режиме

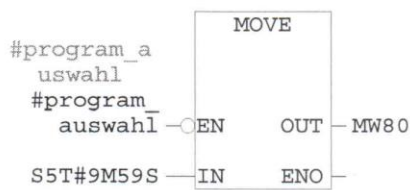
Netzwerk: 1 Тактовый генератор для сигнализации



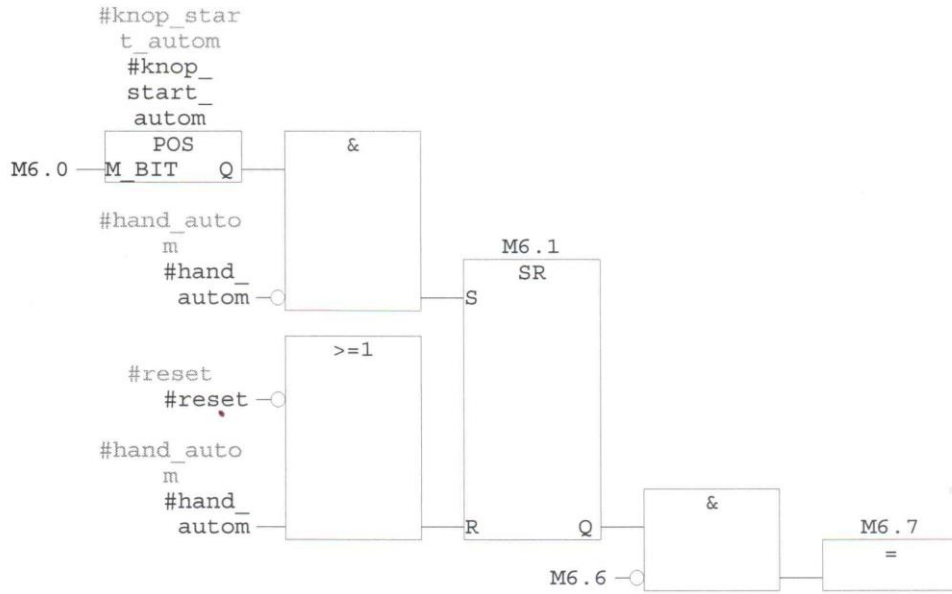
Netzwerk: 2 Выбор интервала времени для тактового генератора режим демо



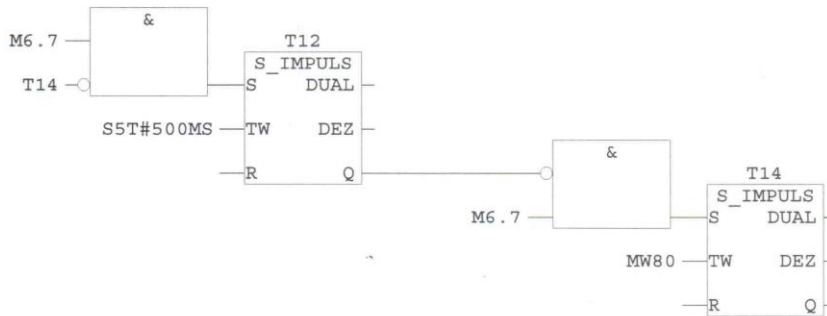
Netzwerk: 3 Выбор интервала времени для тактового генератора в автомате



Netzwerk: 4 Разрешение работы тактового генератора импульсов запуска цикла



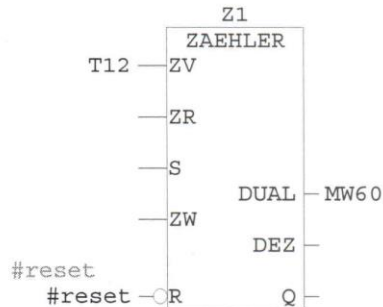
Netzwerk: 5 Тактовый генератор для формирования импульсов запуска цикла



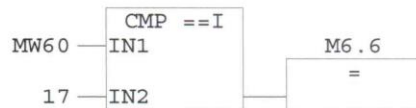
Netzwerk: 6 Опрос демонстрационного режима



Netzwerk: 7 Счет тактовых импульсов



Netzwerk: 8 Формирование меркера останова тактового генератора



Netzwerk: 9 Изменения Fi_soll по тактам генератора импульсов

```

L    MW    60
L    1
<>I
SPB  m01
L    -8.000000e+001
T    #Fi_soll      #Fi_soll
SPA  m00
m01: L    MW    60
L    2
<>I
SPB  m02
L    -7.000000e+001
T    #Fi_soll      #Fi_soll
SPA  m00
m02: L    MW    60
L    3
<>I
SPB  m03
L    -6.000000e+001
T    #Fi_soll      #Fi_soll
SPA  m00
m03: L    MW    60
L    4
<>I
SPB  m04
L    -5.000000e+001
T    #Fi_soll      #Fi_soll
SPA  m00
m04: L    MW    60
L    5
<>I
  
```

```

      SPB   m05
      L     -4.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m05:  L     MW      60
      L     6
      <>I
      SPB   m06
      L     -3.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m06:  L     MW      60
      L     7
      <>I
      SPB   m07
      L     -2.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m07:  L     MW      60
      L     8
      <>I
      SPB   m08
      L     -1.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m08:  L     MW      60
      L     9
      <>I
      SPB   m09
      L     0.000000e+000
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m09:  L     MW      60
      L     10
      <>I
      SPB   m10
      L     1.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m10:  L     MW      60
      L     11
      <>I
      SPB   m11
      L     2.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m11:  L     MW      60
      L     12
      <>I
      SPB   m12
      L     3.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m12:  L     MW      60
      L     13
      <>I
      SPB   m13
      L     4.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00
m13:  L     MW      60
      L     14
      <>I
      SPB   m14
      L     5.000000e+001
      T     #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA   m00

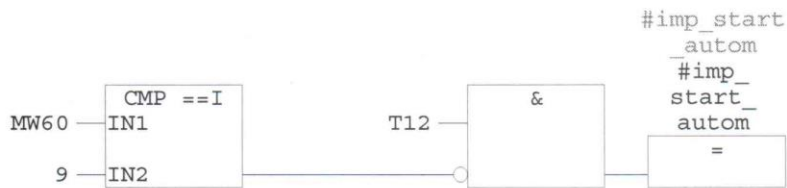
```

```

m14: L   MW   60
      L   15
      <>I
      SPB  m15
      L   6.000000e+001
      T   #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA  m00
m15: L   MW   60
      L   16
      <>I
      SPB  m16
      L   7.000000e+001
      T   #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA  m00
m16: L   MW   60
      L   17
      <>I
      SPB  m17
      L   8.000000e+001
      T   #Fi_soll      #Fi_soll
      SPA  m00
m17: L   MW   60
      L   0
      <>I
      SPB  m00
      L   -8.000000e+001
      T   #Fi_soll      #Fi_soll
m00: NOP  0

```

Netzwerk: 10 Формирование импульса запуск цикла в автоматическом режиме



Netzwerk: 11 Расчет угла поворота фотоэлектрического модуля

```

      SPA  m21
m20: L   "DateTime".GAMMA  DB20.DBD28
      L   1.744000e-002
      *R
      SIN
      T   MD   244
      L   4.200000e+001
      L   1.744000e-002
      *R
      SIN
      L   MD   244
      *R
      T   MD   244
      L   "DateTime".GAMMA  DB20.DBD28
      L   1.744000e-002
      *R
      COS
      T   MD   248
      L   "DateTime".ALPHA  DB20.DBD32
      L   1.744000e-002

```



```

*R
COS
L MD 248
*R
T MD 248
L 4.200000e+001
L 1.744000e-002
*R
COS
L MD 248
*R
T MD 248
L MD 244
L MD 248
-R
T MD 244
L "DateTime".GAMMA DB20.DBD28
L 1.744000e-002
*R
COS
T MD 248
L "DateTime".ALPHA DB20.DBD32
L 1.744000e-002
*R
SIN
L MD 248
*R
T MD 248
L MD 244
SQR
L MD 248
SQR
+R
SQRT
T MD 248
L MD 244
L MD 248
/R
ACOS
L 5.732000e+001
*R
T #Fi_soll #Fi_soll

```

Netzwerk: 12	Задание полярности угла поворота
--------------	----------------------------------

```

L "DateTime".LOCALTIME DB20.DBD36
L 1.244000e+001
>R
SPB m22
L -1.000000e+000
L #Fi_soll #Fi_soll
*R
T #Fi_soll #Fi_soll
m22: NOP 0

```

Netzwerk: 13	Ограничение заданного угла Fi_soll
--------------	------------------------------------

```

m21: L #Fi_soll #Fi_soll
L #Fi_neg_grenze #Fi_neg_grenze
>R
SPB m18
L #Fi_neg_grenze #Fi_neg_grenze
T #Fi_soll #Fi_soll

```

```

SPA   m19
m18:  L   #Fi_soll      #Fi_soll
      L   #Fi_pos_grenze #Fi_pos_grenze
      <R
      SPB   m19
      L   #Fi_pos_grenze #Fi_pos_grenze
      T   #Fi_soll      #Fi_soll
m19:  NOP   0

```

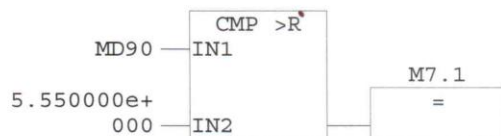
Netzwerk: 14 Выделение модуля

```

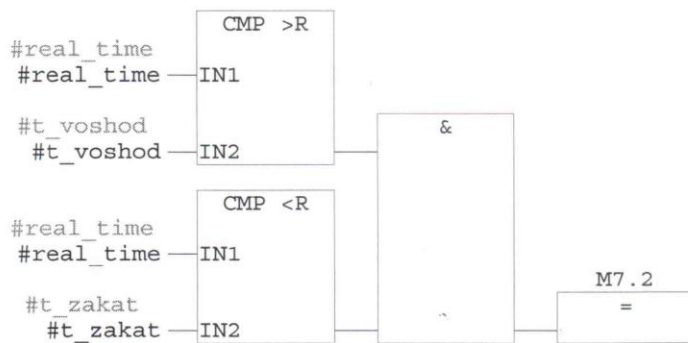
L   #Fi_soll  #Fi_soll
ABS
T   MD       90

```

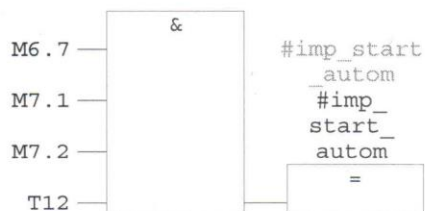
Netzwerk: 15 Разрешение движения при Fi_soll > 5,55 градусов



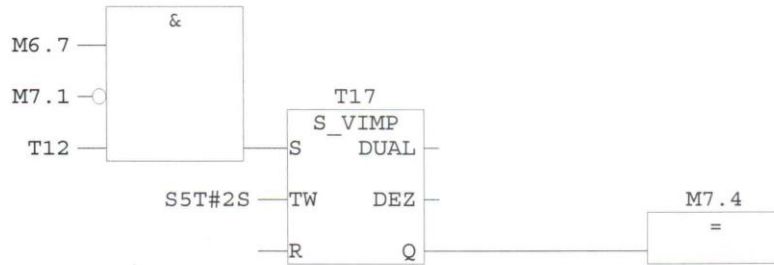
Netzwerk: 16 Разрешение движения в течении светового дня



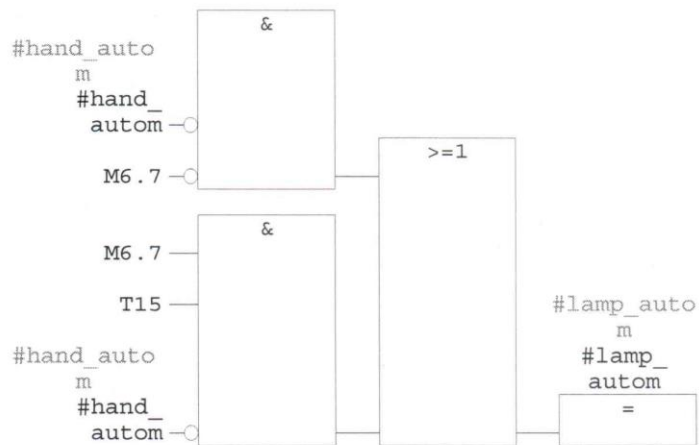
Netzwerk: 17 Формирование импульса запуска цикла в автоматическом режиме



Netzwerk: 18 Импульс замера и фиксации данных при $Fi_soll < 5,55$ градусов



Netzwerk: 19 Сигнализация автоматического режима



FB8 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
15.04.2021 12:55:27
Interface: 01.04.2021 16:21:50
Langen (Baustein / Code / Daten): 00386 00240 00016

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
ein_aus	Bool	0.0	FALSE	
phi_soll	Real	2.0	0.000000e+000	
anlaufzeit	Real	6.0	0.000000e+000	
rucklaufzeit	Real	10.0	0.000000e+000	
abtastzeit	Real	14.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
phi_ausgang2	Real	18.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
phi_ausgang	Real	22.0	0.000000e+000	
summe	Real	26.0	0.000000e+000	
TEMP		0.0		
schrittzahl_vor	Real	0.0		
schrittzahl_ruck	Real	4.0		
schrittweite_vor	Real	8.0		
schrittweite_ruck	Real	12.0		

Baustein: FB8 Задатчик угла поворота

Netzwerk: 1 Определение кол-ва шагов и величины шага при нарастании сигнала.

```

UN  #ein_aus          #ein_aus
SPB m00
L   #anlaufzeit     #anlaufzeit
L   #abtastzeit      #abtastzeit
/R
T   #schrittzahl_vor #schrittzahl_vor
L   9.000000e+001
L   #schrittzahl_vor #schrittzahl_vor
/R
T   #schrittweite_vor #schrittweite_vor

```

Netzwerk: 2 Определение кол-ва шагов и величины шага при снижении сигнала.

```
L   #rucklaufzeit      #rucklaufzeit
L   #abtastzeit        #abtastzeit
/R
T   #schrittanzahl_ruck #schrittanzahl_ruck
L   9.000000e+001
L   #schrittanzahl_ruck #schrittanzahl_ruck
/R
T   #schrittwerte_ruck  #schrittwerte_ruck
```

Netzwerk: 3 Определение процесса - нарастание или снижение.

```
L   #phi_soll          #phi_soll
L   #phi_ausgang       #phi_ausgang
==R
SPB m03
L   #phi_soll          #phi_soll
L   #phi_ausgang       #phi_ausgang
<R
SPB m01
```

Netzwerk: 4 Нарастание сигнала.

```
L   #summe             #summe
L   #schrittwerte_vor #schrittwerte_vor
+R
T   #summe             #summe
L   #summe             #summe
L   #phi_soll          #phi_soll
>=R
SPB m02
L   #summe             #summe
T   #phi_ausgang       #phi_ausgang
SPA m03
m02: L   #phi_soll          #phi_soll
      T   #phi_ausgang       #phi_ausgang
      SPA m03
```

Netzwerk: 5 Снижение сигнала.

```
m01: L   #summe             #summe
      L   #schrittwerte_ruck #schrittwerte_ruck
      -R
      T   #summe             #summe
      L   #summe             #summe
      L   #phi_soll          #phi_soll
<=R
SPB m04
L   #summe             #summe
T   #phi_ausgang       #phi_ausgang
SPA m03
m04: L   #phi_soll          #phi_soll
      T   #phi_ausgang       #phi_ausgang
      SPA m03
```

Netzwerk: 6 Сброс при выключении сигнала

```
m00: L    0.000000e+000
      T    #schrittanzahl_vor  #schrittanzahl_vor
      T    #schrittanzahl_ruck #schrittanzahl_ruck
      T    #schrittwerte_vor   #schrittwerte_vor
      T    #schrittwerte_ruck  #schrittwerte_ruck
      T    #summe               #summe
      T    #phi_ausgang         #phi_ausgang
```

Netzwerk: 7 Наблюдение и контроль заданного угла.
--

```
m03: L    #phi_ausgang  #phi_ausgang
      T    #phi_ausgang2 #phi_ausgang2
```

FB9 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 09.07.2021 11:22:15
Interface: 20.04.2021 15:39:52
Langen (Baustein / Code / Daten): 00558 00396 00020

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
start_reg	Bool	0.0	FALSE	
reset	Bool	0.1	FALSE	
konz_nalevo	Bool	0.2	FALSE	
konz_napravo	Bool	0.3	FALSE	
Fi_soll	Real	2.0	0.000000e+000	
Fi_ist	Real	6.0	0.000000e+000	
dfi_predel	Real	10.0	0.000000e+000	
Kreg	Real	14.0	0.000000e+000	
w_grenz	Int	18.0	0	
abtastzeit	Real	20.0	0.000000e+000	
Kvorst	Real	24.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
STW_ein_aus	Bool	28.0	FALSE	
STW_rewers	Bool	28.1	FALSE	
w_soll_grenz	Int	30.0	0	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
Fi_soll_n_1	Real	32.0	0.000000e+000	
w_vorst	Real	36.0	0.000000e+000	
dfi	Real	40.0	0.000000e+000	
w_soll_real	Real	44.0	0.000000e+000	
w_soll_int	Int	48.0	0	
abs_dfi	Real	50.0	0.000000e+000	
TEMP		0.0		

Baustein: FB9 Регулятор положения фотоэлектрического модуля
--

Netzwerk: 1 Сброс данных при отсутствии сигнала включения регулятора



Netzwerk: 2 Определение ошибки позиционирования

```

L   #Fi_soll #Fi_soll
L   #Fi_ist  #Fi_ist
-R
T   #dfi     #dfi
ABS
T   #abs_dfi #abs_dfi

```

Netzwerk: 3 Вычисление сигнала предупреждения

```

L   #Fi_soll      #Fi_soll
L   #Fi_soll_n_1  #Fi_soll_n_1
-R
L   #abtastzeit   #abtastzeit
/R
L   5.030000e+002
*R
L   #Kvorst       #Kvorst
*R
T   #w_vorst      #w_vorst
L   #Fi_soll      #Fi_soll
T   #Fi_soll_n_1  #Fi_soll_n_1

```

Netzwerk: 4 Вычисление заданной скорости тип данных REAL

```

L   #dfi          #dfi
L   #Kreg          #Kreg
*R
L   #w_vorst      #w_vorst
+R
L   -1.000000e+000
*R
T   #w_soll_real  #w_soll_real

```

Netzwerk: 5 Перевод заданной скорости в INT

```

CALL "UNSCALE"      FC106      -- Unscaling Values
IN   :=#w_soll_real  #w_soll_real
HI_LIM :=2.764800e+004
LO_LIM :=-2.764800e+004
BIPOLAR:=#start_reg #start_reg
RET_VAL:=MW110
OUT  :=#w_soll_int   #w_soll_int

```

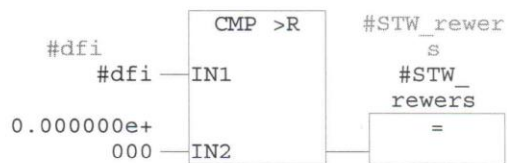

Netzwerk: 6	Ограничение скорости
-------------	----------------------

```

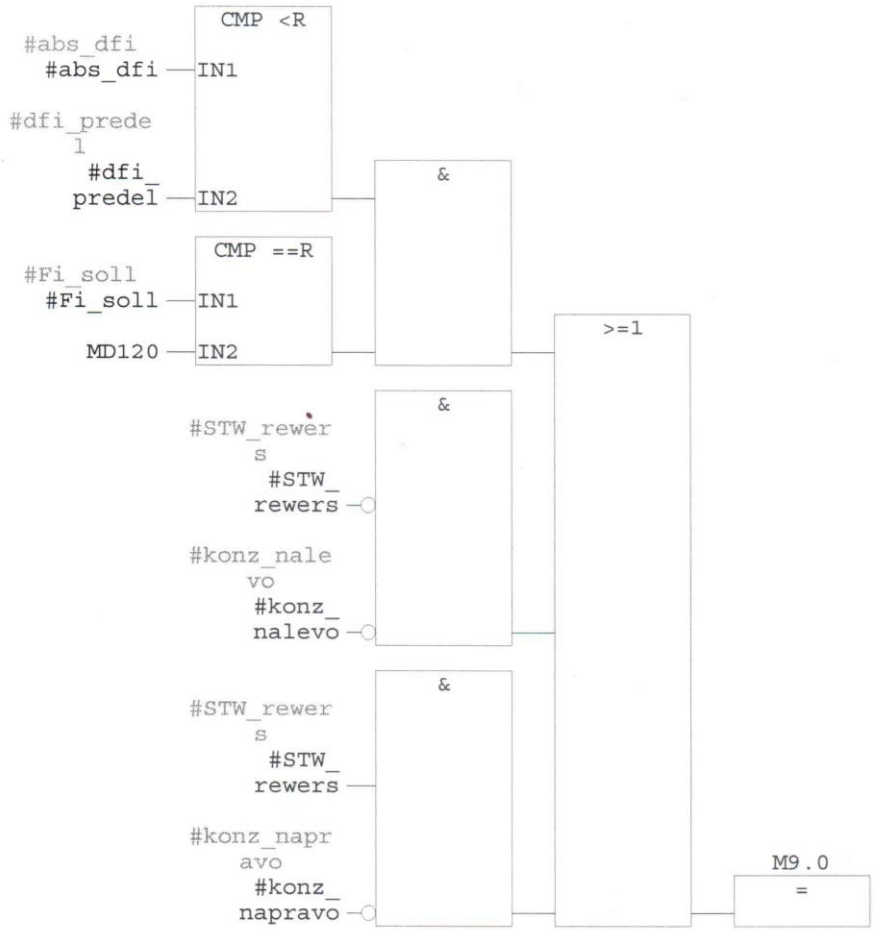
L   #w_soll_int   #w_soll_int
L   #w_grenz      #w_grenz
>I
SPB m00
L   #w_grenz      #w_grenz
L   -1
*I
L   #w_soll_int   #w_soll_int
>I
SPB m01
L   #w_soll_int   #w_soll_int
T   #w_soll_grenz #w_soll_grenz
SPA m02
m00: L   #w_grenz      #w_grenz
      T   #w_soll_grenz #w_soll_grenz
      SPA m02
m01: L   #w_grenz      #w_grenz
      L   -1
      *I
      T   #w_soll_grenz #w_soll_grenz
m02: NOP 0

```

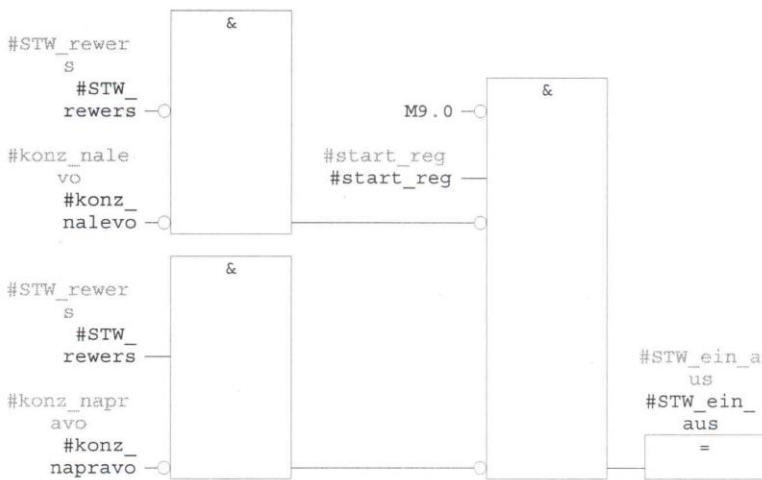
Netzwerk: 7	Формирование управляющего бита STW_rewers
-------------	---



Netzwerk: 8 Окончание позиционирования



Netzwerk: 9 Формирование управляющего бита STW_ein_aus



Netzwerk: 10	Сброс данных
--------------	--------------

```
SPA   m04
m03:  L    0
      T    #w_soll_grenz  #w_soll_grenz
      L    0.000000e+000
      T    #Fi_soll_n_1   #Fi_soll_n_1
      U    E    125.7
      =    #STW_ein_aus   #STW_ein_aus
m04:  NOP  0
```

FB14 - <offline>

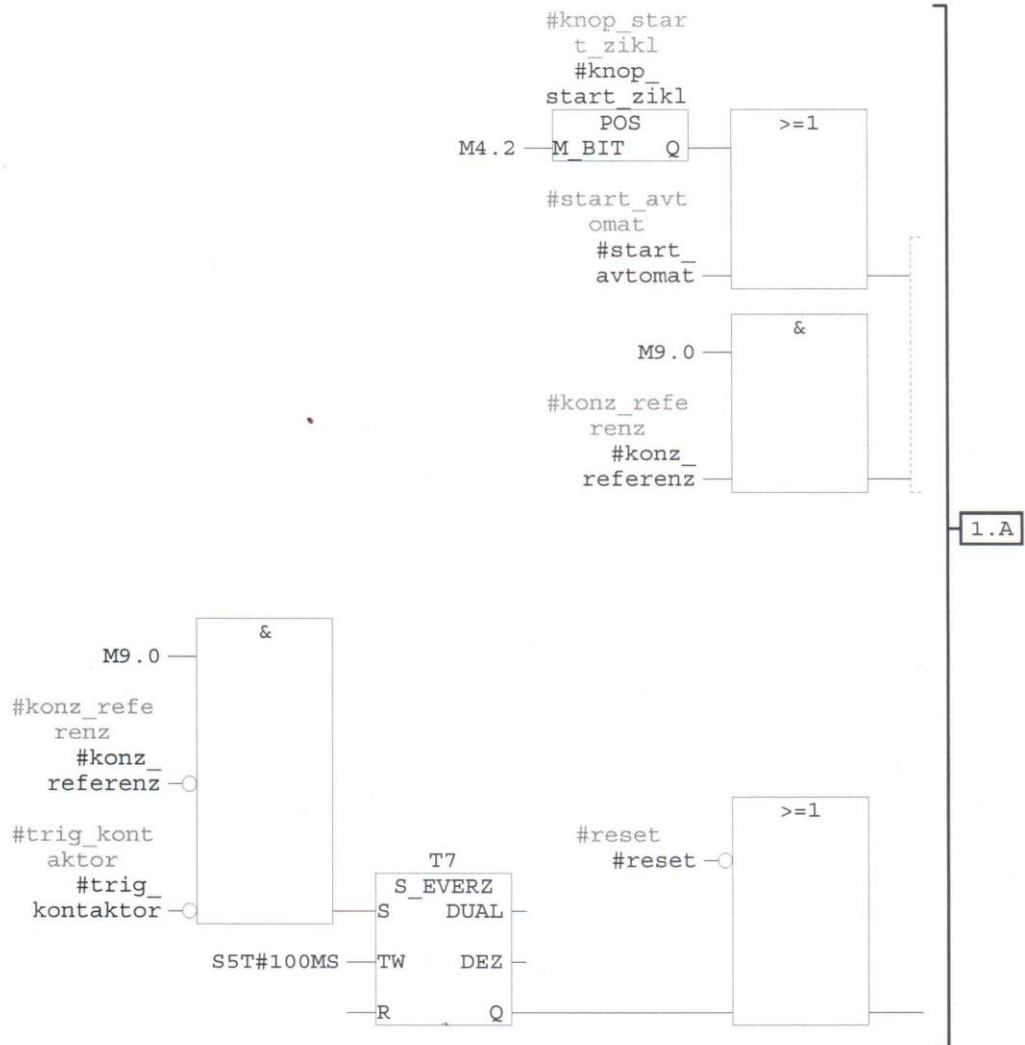
""

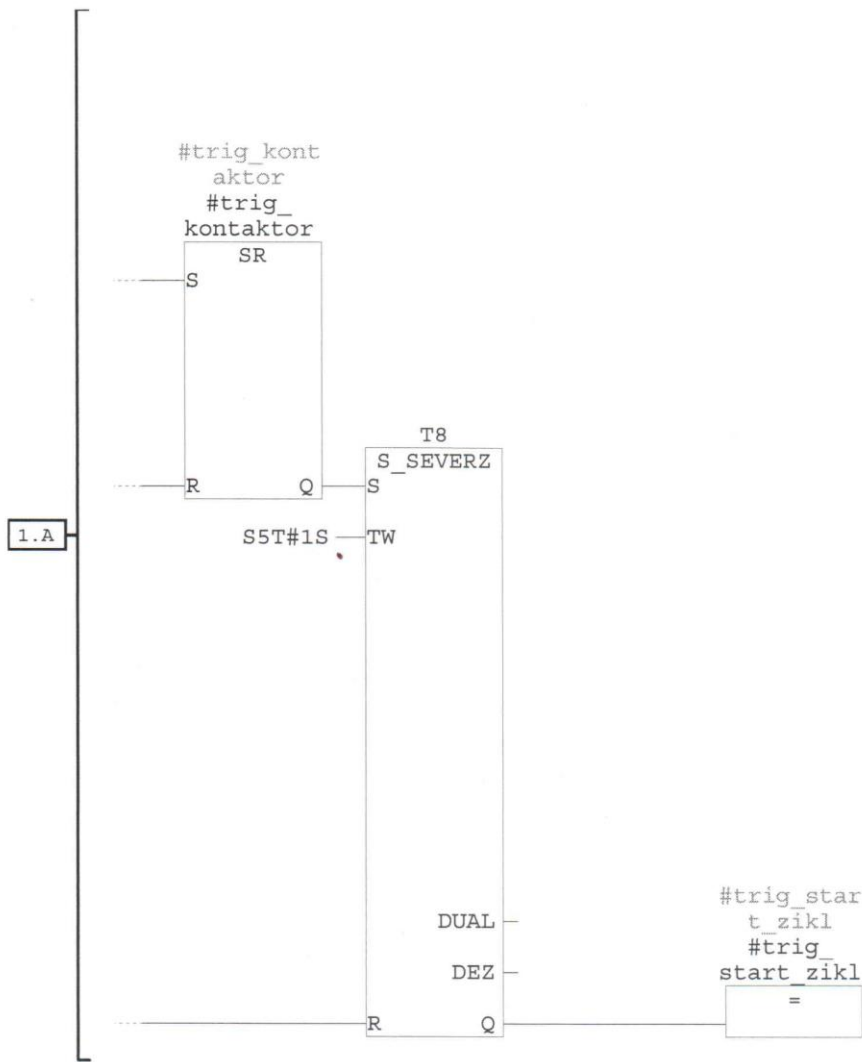
Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
15.10.2021 12:19:22
Interface: 06.10.2021 10:33:08
Langen (Baustein / Code / Daten): 00464 00312 00000

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
knop_start_zikl	Bool	0.0	FALSE	
start_avtomat	Bool	0.1	FALSE	
konz_referenz	Bool	0.2	FALSE	
reset	Bool	0.3	FALSE	
M440_bereit	Bool	0.4	FALSE	
Fi_soll	Real	2.0	0.000000e+000	
Fi_ist	Real	6.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
kont_M440	Bool	10.0	FALSE	
kont_zamer	Bool	10.1	FALSE	
trig_start_zikl	Bool	10.2	FALSE	
Fi_soll_out	Real	12.0	0.000000e+000	
w_ist	Real	16.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
trig_kontaktor	Bool	20.0	FALSE	
impuls_revers	Bool	20.1	FALSE	
revers	Bool	20.2	FALSE	
Fi_soll_optim	Real	22.0	0.000000e+000	
TEMP		0.0		

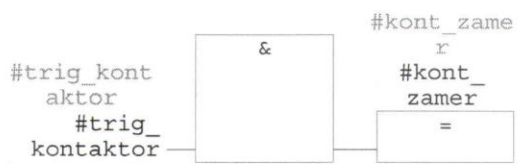
Baustein: FB14 Управление измерительным циклом

Netzwerk: 1 Запуск измерительного цикла

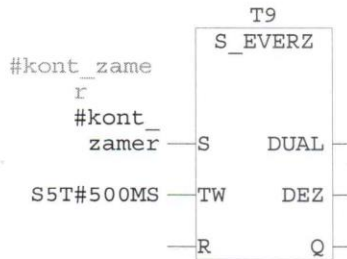




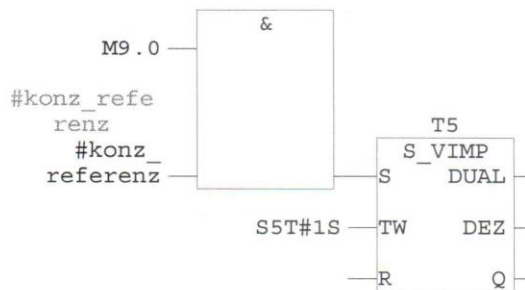
Netzwerk: 2 Включение контактора замера



Netzwerk: 3 Измерительный фронт для замера на Fi=0



Netzwerk: 4 Пауза перед реверсом



Netzwerk: 5 Формирование заданного угла поворота

```

L   #Fi_soll      #Fi_soll
L   0.000000e+000
>R
SPB m02
L   #Fi_soll      #Fi_soll
L   1.500000e+001
-R
SPA m03
m02: L   #Fi_soll      #Fi_soll
L   1.500000e+001
+R
m03: T   #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
  
```

Netzwerk: 6 Дополнительное ограничение заданного угла поворота

```

L   #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
L   DB6.DBD 20
>R
SPB m04
L   DB6.DBD 20
T   #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
SPA m05
m04: L   #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
L   DB6.DBD 24
<R
  
```

```

SPB m05
L DB6.DBD 24
T #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
m05: NOP 0

```

Netzwerk: 7	Управление заданием угла поворота
-------------	-----------------------------------

```

U T 5
FN M 4.1
= #impuls_revers #impuls_revers
U #impuls_revers #impuls_revers
S #revers #revers
U #revers #revers
SPB m00
L #Fi_soll_optim #Fi_soll_optim
T #Fi_soll_out #Fi_soll_out
SPA m01
m00: L 0.000000e+000
T #Fi_soll_out #Fi_soll_out
m01: ON #trig_start_zikl #trig_start_zikl
ON #reset #reset
R #revers #revers

```


FB15 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
Interface: 20.10.2021 14:43:20
Langen (Baustein / Code / Daten): 00704 00542 00020

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
datchik_toka_1	Int	0.0	0	
KE	Real	2.0	0.000000e+000	
Fi_azimut	Real	6.0	0.000000e+000	
Fi_ist	Real	10.0	0.000000e+000	
predel	Int	14.0	0	
trig_start_zikl	Bool	16.0	FALSE	
reset	Bool	16.1	FALSE	
kont_zamer	Bool	16.2	FALSE	
OUT		0.0		
E_solar_max	Real	18.0	0.000000e+000	
Fi_max	Real	22.0	0.000000e+000	
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
imp_zamer_0	Bool	26.0	FALSE	
imp_zamer_azimut	Bool	26.1	FALSE	
imp_zamer_max	Bool	26.2	FALSE	
azimut	Bool	26.3	FALSE	
E_solar	Real	28.0	0.000000e+000	
datchik_toka_2	Real	32.0	0.000000e+000	
azimut_1	Bool	36.0	FALSE	
TEMP		0.0		

Baustein: FB15 Регистрация измерений

Netzwerk: 1 Обнуление адресных регистров при сигнале сброс



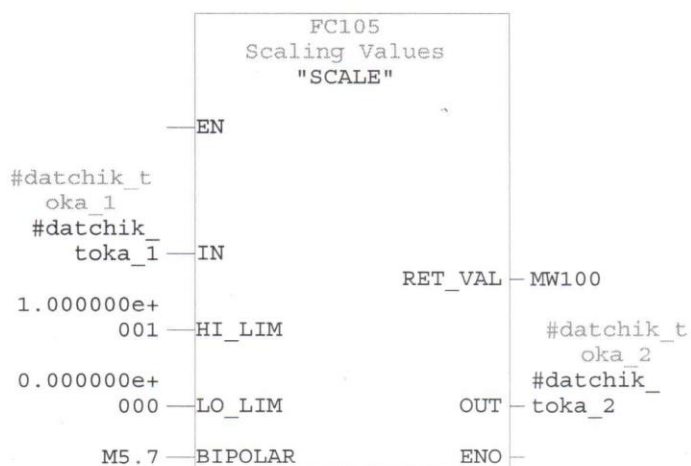
Netzwerk: 2 Останов записи при достижении предела блоков данных

```

O(
L   MD   200
L   #predel   #predel
==I
)
O(
L   MD   210
L   #predel   #predel
==I
)
O(
L   MD   220
L   #predel   #predel
==I
)
O(
L   MD   230
L   #predel   #predel
==I
)
O(
L   MD   150
L   #predel   #predel
==I
)
O(
L   MD   154
L   #predel   #predel
==I
)
SPB   m02

```

Netzwerk: 3 Считывание и преобразование сигнала датчика тока



Netzwerk: 4 Перевод тока к.з. в плотность солнечной энергии

```
L   #datchik_toka_2  #datchik_toka_2
L   #KE              #KE
*R
T   #E_solar        #E_solar
```

Netzwerk: 5 Сохранение значения времени

```
L   "DateTime".LOCALTIME  DB20.DBD36
T   MD      70
```

Netzwerk: 6 Импульс замера E_solar и t на угле 0 и запись в DB100, DB110

```
U   T      9
FP  M      5.0
=   #imp_zamer_0      #imp_zamer_0
UN  #imp_zamer_0      #imp_zamer_0
SPB m00
AUF DB   100
LAR1 MD  200
L   #E_solar          #E_solar
T   DBD [AR1,P#0.0]
L   P#4.0
+AR1
TAR1 MD  200
AUF DB   110
LAR1 MD  210
L   MD      70
T   DBD [AR1,P#0.0]
L   P#4.0
+AR1
TAR1 MD  210
```

Netzwerk: 7 Импульс замера E_solar и Fi_azimut и запись в DB120, DB130

```
m00: L   #Fi_azimut      #Fi_azimut
L   #Fi_ist           #Fi_ist
-R
ABS
L   5.000000e-001
<R
=   #azimut           #azimut
U   #azimut           #azimut
U   #kont_zamer       #kont_zamer
=   #azimut_1         #azimut_1
U   #azimut_1         #azimut_1
FP  M      5.1
=   #imp_zamer_azimut #imp_zamer_azimut
UN  #imp_zamer_azimut #imp_zamer_azimut
SPB m03
AUF DB   120
LAR1 MD  220
L   #E_solar          #E_solar
T   DBD [AR1,P#0.0]
L   P#4.0
+AR1
TAR1 MD  220
```

```

AUF DB 130
LAR1 MD 230
L #Fi_ist #Fi_ist
T DBD [AR1,P#0.0]
L P#4.0
+AR1
TAR1 MD 230

```

Netzwerk: 8 Выбор максммальной величины E_solar

```

m03: UN #trig_start_zikl #trig_start_zikl
      SPB m04
      L #E_solar #E_solar
      L #E_solar_max #E_solar_max
      <R
      SPB m05
      L #E_solar #E_solar
      T #E_solar_max #E_solar_max
      L #Fi_ist #Fi_ist
      T #Fi_max #Fi_max
      SPA m05
m04: L 0.000000e+000
      T #E_solar_max #E_solar_max
      T #Fi_max #Fi_max
m05: NOP 0

```

Netzwerk: 9 Замер E_solar_max и Fi_max и запись DB150, DB160

```

U T 5
FP M 5.2
= #imp_zamer_max #imp_zamer_max
UN #imp_zamer_max #imp_zamer_max
SPB m02
AUF DB 150
LAR1 MD 150
L #E_solar_max #E_solar_max
T DBD [AR1,P#0.0]
L P#4.0
+AR1
TAR1 MD 150
AUF DB 160
LAR1 MD 154
L #Fi_max #Fi_max
T DBD [AR1,P#0.0]
L P#4.0
+AR1
TAR1 MD 154
SPA m02

```

Netzwerk: 10 Обнуление адресного регистра и буферов пр сигнале сброс

```

m01: L P#0.0
      LAR1
      TAR1 MD 200
      TAR1 MD 210
      TAR1 MD 220
      TAR1 MD 230
      TAR1 MD 150
      TAR1 MD 154
m02: NOP 0

```

FB17 - <offline>

""

Name: **Familie:**
Autor: **Version:** 0.1
Zeitstempel Code: **Bausteinversion:** 2
15.10.2021 11:52:26
Interface: 12.10.2021 12:14:53
Langen (Baustein / Code / Daten): 00262 00144 00000

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
Reset	Bool	0.0	FALSE	
trig_start_zykl	Bool	0.1	FALSE	
kont_zamer	Bool	0.2	FALSE	
Predel	Int	2.0	0	
E_solar	Real	4.0	0.000000e+000	
Fi	Real	8.0	0.000000e+000	
OUT		0.0		
IN_OUT		0.0		
STAT		0.0		
imp_zamer	Bool	12.0	FALSE	
TEMP		0.0		

Baustein: FB17 Запись E_solar и Fi каждые 20ms в цикле замера

Обнуление адресного регистра и проверка предела адресного регистра
--

Netzwerk: 1 Прекращение записи при достижении предела блока данных
--

```

ON   #Reset      #Reset
ON   M          2.5
SPB  m00
O(
L    MD         140
L    #Predel    #Predel
==I
)
O(
L    MD         144
L    #Predel    #Predel
==I
)
SPB  m01

```

Netzwerk: 2	Регистрация E_solar и Fi при каждом втором заходе в блок
-------------	--

```

UN    M      7.7
=     M      7.7
U     #trig_start_zikl  #trig_start_zikl
U     #kont_zamer      #kont_zamer
U     M      7.7
FP    M      7.5
=     #imp_zamer       #imp_zamer
UN    #imp_zamer       #imp_zamer
SPB   m01
AUF   DB     140
LAR1  MD     140
L     #E_solar        #E_solar
T     DBD [AR1,P#0.0]
L     P#4.0
+AR1
TAR1  MD     140
AUF   DB     144
LAR1  MD     144
L     #Fi             #Fi
T     DBD [AR1,P#0.0]
L     P#4.0
+AR1
TAR1  MD     144
SPA   m01

```

Netzwerk: 3	Обнуление адресных регистров при сигнале reset
-------------	--

```

m00:  L     P#0.0
      LAR1
      TAR1 MD     140
      TAR1 MD     144
m01:  NOP   0

```

FC1 - <offline>

""

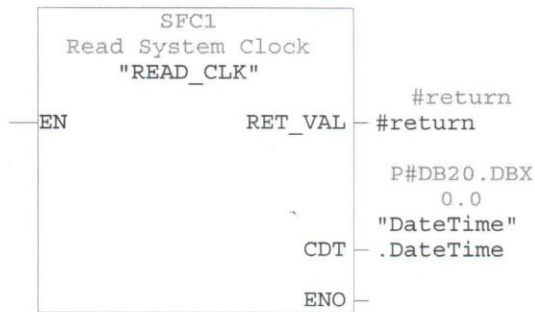
```

Name:                               Familie:
Autor:                               Version: 0.1
                                       Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code:                   27.04.2020 16:05:32
                                       Interface: 27.04.2020 15:33:12
Langen (Baustein / Code / Daten): 00248 00142 00010
    
```

Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
return	Int	0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Baustein: FC1 Считывание и преобразование данных системного таймера

Netzwerk: 1 Чтение даты и времени



Netzwerk: 2 Год

```

L    DB20.DBB    0
BTI
T    "DateTime".Year DB20.DBW8
NOP    0
    
```

Netzwerk: 3 Месяц

L DB20.DBB 1
BTI
T "DateTime".Month DB20.DBW10
NOP 0

Netzwerk: 4 День

L DB20.DBB 2
BTI
T "DateTime".Day DB20.DBW12
NOP 0

Netzwerk: 5 Час

L DB20.DBB 3
BTI
T "DateTime".Hour DB20.DBW14
NOP 0

Netzwerk: 6 Минута

L DB20.DBB 4
BTI
T "DateTime".Minute DB20.DBW16
NOP 0

Netzwerk: 7 Секунда

L DB20.DBB 5
BTI
T "DateTime".Second DB20.DBW18
NOP 0

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

КОПИИ ДОКУМЕНТОВ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ



ГБУ «НИИВЭ»

Государственное бюджетное учреждение
"Научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного
и рудничного электрооборудования"

ДНР
83052 г. Донецк
ул. 50-й Гвардейской дивизии, 17

ИКЮЛ - 00217159
Счет 40105810020000021001
Центральный Республиканский Банк
Донецкой Народной Республики
Л/с 03011024170 Республиканское казначейство
Донецкой Народной Республики
БИК Банка - 310101001

Тел.: (062) 382-93-53
Факс: (062) 382-93-52
e-mail: niive@list.ru

№ 1/561 от 11.10.2014г.
на Ваш _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Черникова Вадима Геннадиевича на тему "Совершенствование систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Результаты диссертационных исследований Черникова В. Г., а именно: рекомендации по определению параметров математической модели асинхронного генератора на основе его паспортных данных; комплекс программ, реализующий систему регулирования позиционного электропривода на базе программируемого логического контроллера и преобразователя частоты, были рассмотрены и приняты к использованию в ГБУ «НИИВЭ».

И.о. Директора



В.И.Ягмур

ГБУ
"НИИВЭ"

*Скопировано с оригинала
ученой работы от 11.10.14 г.
Михайл Т.В. Балацкий*



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

83001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

29.12.2022 № 30-12/164а
На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Черникова Вадима Геннадиевича на тему "Совершенствование систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Черникова В. Г. а именно: методы определения параметров адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса, методы создания математических моделей ветроколеса, генератора и поведения ветра, комплекс программ, разработанных для реализации метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля и проверки эффективности его работы, рекомендации по применению методов, внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций и проведении лабораторных работ по дисциплинам «Микропроцессорные системы управления возобновляемыми источниками энергии», «Управление ветровыми электроустановками» «Фотоэлектрические автономные системы» для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
д-р техн. наук, профессор



[Signature] С.В. Борщевский

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

[Signature] Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой
систем программного управления и мехатроники
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

[Signature] В.И. Калашников

*Согласовано с руководителем
учебной кафедры 02.12.2022
Иванов И.В. Заваров*