

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Кожанов Шахрияр Айдарович

Разработка системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к
изменяющимся условиям среды

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управления



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среды»

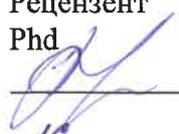
6B07103 – Автоматизация и роботизация

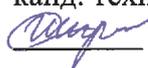
Выполнил

Кожанов Ш. А.

Рецензент
Phd

Научный руководитель
канд. техн. наук


Абжанова Л.К.


Ширяева О.И.

«16» июня 2025 г.

«29» 05 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6В07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Кожанову Ш.А

Тема : «Разработка системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к
изменяющимся условиям среды»

Утверждена приказом Р. Ускенбаевой № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы: «25» мая 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту: параметры ветрогенератора, диапазон изменения
скорости ветра, момент инерции ротора, технические характеристики сенсоров и
исполнительных механизмов, модель Siemens S7-1200 и требования к системе управления.

Перечень подлежащих к разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) описание технологической части;*
- б) разработка структурной схемы системы автоматического управления;*
- в) разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом;*
- г) расчетная часть;*
- д) разработка программы управления.*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): ФСА
представлены слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература:

- 1 Дроздов В.М. Ветроэнергетические установки. – М.: Энергоатомиздат, 2019. – 328 с.
- 2 Сергеева И.В., Павлова Л.И. Программируемые логические контроллеры в автоматике. – М.:
Инфра-М, 2021. – 240 с.
- 3 Siemens AG. SIMATIC TIA Portal V17. Getting Started. – Германия: Sie-mens, 2022.

ГРАФИК
подготовки дипломному проекту

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Описание процессов регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среду	13. 02. 2025 г.	
Технологический раздел Разработка структурной схемы системы автоматического управления	06. 03. 2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	28. 03. 2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среду	14. 04. 2025 г.	
Расчетный раздел Разработка программы управления	25. 05. 2025	

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием
относящихся к ним разделов работы (проекта)

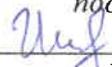
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч.степень.звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Расчетный раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Норм контролер	К. А. Манатов магистр техн. наук	05.06	

Научный руководитель


подпись

Ширяева О. И.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Кожанов Ш. А.

Дата

« 3 » 02 20 25 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3	
1	Технологическая часть	5
1.1	Описание объекта автоматизации	5
1.2	Система управления автоматизированной ветрогенераторной установкой	7
1.3	Требования к системе управления	13
1.4	Определение точек контроля	13
1.5	Разработка функциональной схемы автоматизации	14
1.6	Выбор датчиков	15
1.7	Исполнительный механизм	21
1.8	Выбор ПЛК	23
2	Расчетная часть	25
2.1	Синтез системы автоматического регулирования скоростью вращения ротора ветрогенераторной установки	25
2.2	Разработка структурной схемы	26
2.3	Анализ динамических свойств системы	29
2.4	Расчет математической модели системы	30
2.5	Синтез типового регулятора	36
2.6	Метод Циглера-Никольса (ZN2)	40
2.7	Метод Скогестада (SIMC)	43
2.8	Выбор эмпирического метода	46
3	Синтез системы управления углом атаки лопастей ветрогенераторной установки с использованием программного логического контроллера	48
3.1	Разработка алгоритма	48
	Заключение	53
	Список использованной литературы	54
	Приложение А	55

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастающего дефицита традиционных энергетических ресурсов и повышения требований к экологичности производства электроэнергии, всё большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии. Одним из наиболее перспективных направлений является ветроэнергетика, которая обладает высокой потенциальной мощностью и практически не оказывает негативного воздействия на окружающую среду. Ветрогенераторы успешно применяются как в централизованных энергетических системах, так и в автономных установках.

Однако стабильная и эффективная работа ветроэнергетических установок осложняется переменчивым характером ветра. Колебания скорости и направления воздушных потоков приводят к нестабильности генерируемой мощности, снижению эффективности работы генератора и увеличению износа оборудования. В связи с этим возрастает необходимость в разработке современных систем автоматического регулирования, которые бы обеспечивали адаптацию работы установки к внешним изменениям и поддержание заданных параметров.

Особую актуальность данный вопрос приобретает в условиях эксплуатации ветрогенераторов в регионах с нестабильным климатом и резко изменяющимися метеоусловиями. Традиционные методы управления часто не справляются с задачами оперативного реагирования на быстрые изменения внешней среды. Это приводит к необходимости поиска новых подходов к проектированию и реализации регуляторов, обеспечивающих устойчивость, надёжность и точность функционирования системы.

Целью настоящего дипломного проекта является разработка системы автоматического регулирования ветрогенератора, позволяющей повысить стабильность его работы при изменяющихся условиях внешней среды. Система должна обеспечивать оптимальное управление процессом выработки электроэнергии, компенсируя внешние возмущения и поддерживая работу в заданном режиме.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор существующих подходов к регулированию в системах ветроэнергетики;
- выбрать структуру системы автоматического регулирования, соответствующую требованиям устойчивости и быстродействия;
- разработать математическую модель объекта и системы управления;
- провести моделирование работы системы при различных внешних воздействиях;
- выполнить анализ устойчивости, переходных процессов и качества регулирования;
- представить схемные и структурные решения системы управления;
- оценить возможность практического применения разработанной системы.

Объектом исследования является автономный или сетевой ветрогенератор, работающий в условиях переменных метеофакторов. Предметом исследования выступает система автоматического регулирования, обеспечивающая эффективную работу установки.

Методы, применяемые в работе, включают: теоретический анализ систем автоматического управления, моделирование в программных средах, анализ переходных процессов, а также обоснование инженерных решений на основе технических характеристик компонентов.

Практическая значимость проекта заключается в возможности применения полученных результатов при разработке, модернизации или внедрении систем автоматического регулирования для ветрогенераторов различного назначения.

1 Технологическая часть

1.1 Описание объекта автоматизации

В своей основе работа ветрогенератора базируется на следующем принципе: лопасти устройства вращаются под воздействием ветра, преобразуя его кинетическую энергию в механическую, которая затем посредством генератора превращается в электрическую. Современные системы управления ветрогенераторами позволяют максимально эффективно использовать энергию ветра и адаптироваться к изменениям внешней среды [1].

Ветрогенератор – представляет собой устройство, преобразующее кинетическую энергию ветра в электрическую (рисунок 1.1). Основная цель работы ветрогенератора заключается в сборе энергии ветра и ее преобразовании в электрическую энергию, которая затем используется для подачи в общую энергосистему или для автономного энергоснабжения различных объектов. Процесс преобразования энергии ветра является одним из наиболее экологически чистых и эффективных методов получения энергии.

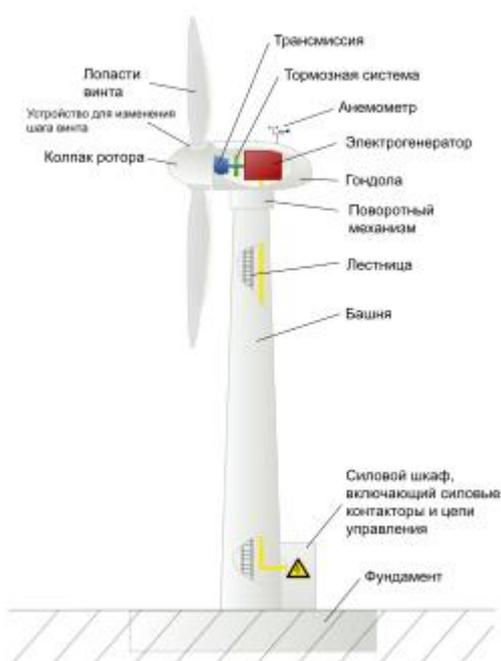


Рисунок 1.1 – Общий вид ветрогенератора

Ветрогенераторы широко используются для снабжения электрической энергией жилых домов, промышленных объектов и удаленных регионов, где централизованная энергосистема недоступна. В зависимости от мощности и конструкции ветрогенераторы могут быть как малогабаритными, предназначенными для частного использования, так и крупными, входящими в состав ветропарков для коммерческой выработки энергии [2].

Существует несколько типов ветрогенераторов, которые отличаются по принципу работы, мощности, типу установки, ориентации ротора и другим параметрам. Разработка системы управления автоматизированной системы ветрогенератора позволяет оптимизировать его работу и увеличить коэффициент полезного действия (КПД).

Электрические ветрогенераторы делятся на две основные категории: горизонтально-осевые (HAWT) и вертикально-осевые (VAWT). Горизонтально-осевые ветрогенераторы наиболее распространены и работают с высокой эффективностью в условиях стабильного ветра. Вертикально-осевые модели лучше подходят для условий, где направление ветра постоянно меняется, благодаря чему они проще в установке и эксплуатации.

Типы ветрогенераторов по мощности

- малогабаритные ветрогенераторы: Мощностью до 10 кВт, используются для обеспечения электричеством частных домов и небольших объектов.

- средней мощности: от 10 до 100 кВт, применяются для локальных сетей и малых производственных предприятий.

- промышленные ветрогенераторы: Мощностью от 100 кВт и выше, используются в крупных ветропарках для выработки электроэнергии в промышленных масштабах.

Все типы ветрогенераторов обладают своими преимуществами и недостатками, а выбор конструкции определяется условиями эксплуатации. Также необходимо учитывать такие факторы, как скорость и направление ветра, климатические условия, стоимость установки и обслуживания, а также эффективность производства электроэнергии [3].

Создание системы управления автоматизированным ветрогенератором играет ключевую роль в повышении эффективности и надежности использования ветровой энергии. Подобная система позволяет автоматически регулировать работу генератора, корректировать угол наклона лопастей, следить за состоянием оборудования и оперативно реагировать на аварийные ситуации.

Автоматическое регулирование работы ветрогенератора реализуется с помощью специализированной системы управления, включающей в себя различные устройства и компоненты. Основные элементы системы: сенсоры, контроллеры, исполнительные механизмы и программное обеспечение.

Сенсоры предназначены для сбора данных о текущих параметрах работы ветрогенератора. Они измеряют скорость и направление ветра, угол наклона лопастей, параметры генератора и внешние условия, такие как температура окружающей среды. Эта информация передается на контроллер для анализа и принятия решений [4].

Контроллеры управляют системой на основе данных, поступающих от сенсоров. Они регулируют скорость вращения ротора, корректируют угол наклона лопастей для максимально эффективного использования ветра и управляют тормозными системами при сильных порывах ветра. Также контроллер обеспечивает перевод системы в безопасный режим при неблагоприятных погодных условиях.

Исполнительные механизмы выполняют команды, поступающие от контроллера. Они обеспечивают управление поворотным механизмом, генератором и другими элементами. Например, система может автоматически изменять угол атаки лопастей для повышения общей эффективности выработки электроэнергии.

Программное обеспечение играет важную роль в системе управления ветрогенератором. Оно обрабатывает данные, принимает решения и осуществляет мониторинг состояния оборудования. Для автоматизации могут использоваться как специализированные, так и готовые программные решения, адаптированные под конкретные условия эксплуатации [5].

Автоматическое регулирование работы ветрогенератора осуществляется за счёт использования комплексной системы управления, включающей сенсоры, контроллеры, исполнительные механизмы и программное обеспечение. Это позволяет адаптировать работу устройства к изменениям окружающей среды, повышать его производительность и обеспечивать надёжную работу в различных условиях.

1.2 Система управления автоматизированной ветрогенераторной установкой

Система управления автоматизированной ветрогенераторной установкой – это комплексное решение, направленное на обеспечение надёжной и безопасной работы генератора, а также на оптимизацию его эксплуатации и адаптацию к изменяющимся условиям ветровой среды.

На рисунке 1.2 представлена схема ветрогенераторной установки, включающая в себя основные компоненты системы, такие как лопастной ротор, мультипликатор, генератор, инвертор, система управления и дополнительные модули для обеспечения эффективной работы установки. Каждый компонент интегрирован с системой управления, которая автоматически адаптирует работу генератора к изменяющимся параметрам ветрового потока.

В общем случае ветрогенераторные установки включают в себя следующие важные, необходимые компоненты.

Лопастной ротор. Лопастной ротор является одним из ключевых элементов ветрогенераторной установки, так как именно он выполняет функцию первичного преобразователя энергии ветра в механическую энергию. Конструкция ротора напрямую влияет на эффективность работы всей системы, а его интеграция в автоматизированную систему управления обеспечивает адаптацию генератора к изменяющимся условиям среды.

Лопастной ротор состоит из нескольких аэродинамически спроектированных лопастей, установленных на центральной втулке, которая соединена с роторным валом. Лопастей изготавливаются из легких и прочных материалов (например, стеклопластика или углеродного волокна), что позволяет выдерживать значительные нагрузки при высокой скорости ветра. Каждая

лопасть имеет определенный угол атаки, который оптимизирует захват энергии ветра. Угол наклона может быть статическим (заданным при проектировании) или изменяемым в реальном времени при помощи системы управления [6].

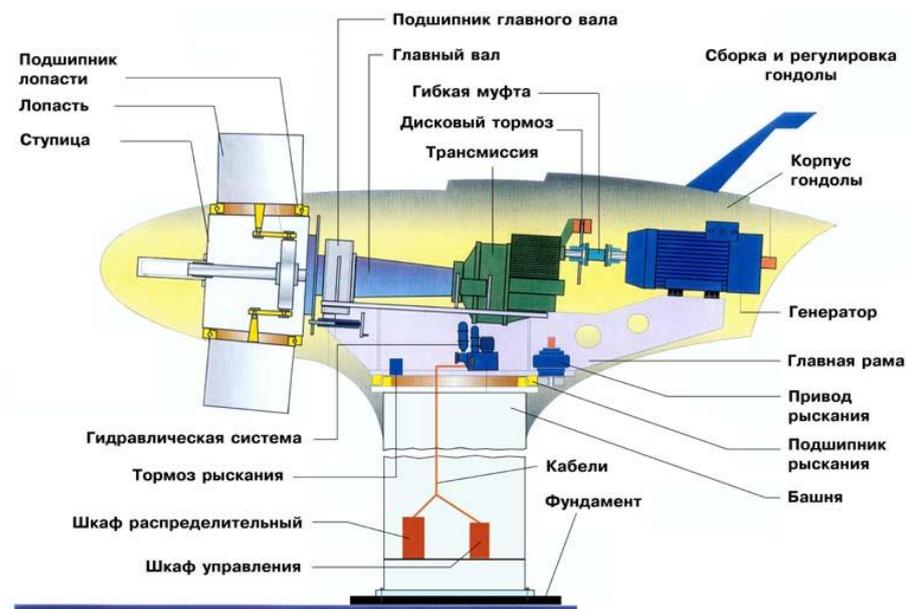


Рисунок 1.2 – Схема систем ветрогенераторной установки в разрезе

Лопастной ротор, оснащенный системой датчиков, передает информацию о скорости и направлении ветра в блок управления. На основе этих данных система корректирует положение лопастей, что позволяет поддерживать стабильное вращение ротора и максимальную эффективность генерации энергии. Изменение угла наклона лопастей позволяет равномерно распределять нагрузку на ротор и другие компоненты системы. Это особенно важно при внезапных изменениях ветрового потока, что снижает износ оборудования и увеличивает срок службы установки. При достижении критических значений скорости ветра активируется тормозная система, а лопасти устанавливаются в так называемое «флюгерное» положение, при котором их поверхность минимально взаимодействует с ветром. Это предотвращает повреждения оборудования и повышает безопасность эксплуатации. Система управления лопастным ротором взаимодействует с другими элементами ветрогенератора, такими как генератор, инвертор и датчики. Это обеспечивает синхронизацию работы всех компонентов для достижения максимальной эффективности.

Важным компонентом ветрогенератора, который выполняет функцию преобразования низкой скорости вращения ротора в более высокую скорость, необходимую для эффективной работы электрического генератора является мультипликатор (или редуктор). В современных ветрогенераторных установках мультипликатор занимает центральное место в цепочке преобразования энергии и интегрирован с системой автоматического регулирования, что позволяет оптимизировать работу всей установки [6].

Мультипликатор представляет собой механическую коробку передач, состоящую из набора шестерен, соединяющих входной вал (соединенный с ротором) и выходной вал (соединенный с генератором). Передаточное число мультипликатора определяет, насколько увеличивается скорость вращения. Например, если передаточное число равно 100, то при вращении ротора со скоростью 15 об/мин выходной вал мультипликатора будет вращаться со скоростью 1500 об/мин, что соответствует рабочим параметрам генератора. Мультипликатор преобразует неравномерную и низкую скорость вращения лопастного ротора в постоянную скорость, необходимую для генерации электричества. Автоматизированная система управления отслеживает скорость входного и выходного вала мультипликатора, корректируя передаточные параметры. Это позволяет поддерживать стабильное электроснабжение.

Генератор. Генератор является одним из основных компонентов ветрогенератора и играет ключевую роль в преобразовании механической энергии, вырабатываемой ротором, в электрическую энергию. Правильная интеграция генератора в систему автоматического регулирования позволяет достичь высокой эффективности, надежности и стабильности работы ветрогенераторной электростанции. Генератор преобразует механическую энергию вращения ротора, передаваемую через мультипликатор (или напрямую в безредукторных системах), в электрический ток. Генератор является сердцем ветрогенераторной установки, отвечающим за преобразование и передачу энергии в сеть. Его работа в тесной интеграции с мультипликатором, ротором и системой управления позволяет добиться высокой эффективности и надежности. Современные автоматизированные системы управления значительно увеличивают производительность и срок службы генератора, что делает его критически важным элементом любой ветрогенераторной электростанции [7].

Инвертор. Инвертор и система стабилизации являются ключевыми элементами автоматизированной системы ветрогенератора, обеспечивая преобразование электрической энергии, стабилизацию её параметров и адаптацию к изменяющимся условиям окружающей среды. Инвертор преобразует переменный ток (AC), вырабатываемый генератором, в постоянный ток (DC) и обратно в стабильный переменный ток с параметрами, соответствующими электрической сети. Инвертор обеспечивает стабильную частоту (обычно 50 Гц или 60 Гц) и напряжение на выходе, даже если скорость ветра и частота вращения ротора генератора изменяются. Различают 2 типа инверторов.

Централизованные инверторы. Используются в крупных ветрогенераторах, обслуживают несколько генераторов одновременно. Подходят для проектов с высокой мощностью.

Модульные инверторы. Используются для распределённых систем, где каждый генератор оснащён отдельным инвертором. Это повышает надёжность системы.

Общий принцип работы ветрогенератора в автоматизированной системе регулирования и управления получается так, что система регулирования

контролирует работу всех этих компонентов ветрогенератора и обеспечивает выполнение определенных рабочих функций, включая угол наклона лопастей и частота вращения ротора, ориентацию установки и мощность, в зависимости от изменения условий окружающей среды, таких как скорость и направление ветра, температура и влажность. Это позволяет достичь высокой эффективности выработки энергии, оптимизировать расход ресурсов и минимизировать повреждения оборудования, а также снижать износ и повышать долговечность устройства [8].

Современные системы управления ветрогенераторами используют автоматизированные решения для обеспечения эффективной и надежной работы в изменяющихся условиях внешней среды. Основными параметрами, которые контролируются, являются скорость и направление ветра, уровень вибрации, температура элементов системы, а также нагрузка на генератор. Для этих целей применяются различные датчики, передающие данные в центральный управляющий модуль.

Центральный модуль управления обрабатывает полученную информацию и принимает решения о настройке параметров работы генератора. Например, система может изменять угол наклона лопастей ветрогенератора в зависимости от скорости ветра, чтобы достичь максимальной эффективности выработки электроэнергии и снизить износ оборудования.

Также в системе реализованы алгоритмы адаптации, позволяющие оперативно реагировать на изменения в окружающей среде. Такие алгоритмы могут учитывать прогнозы погодных условий или внезапные изменения ветровой обстановки. Это помогает предотвратить перегрузки системы и минимизировать потери энергии.

Для обеспечения безопасности эксплуатации предусмотрены функции защиты. Например, автоматическое отключение генератора при достижении критических значений вибрации или при превышении допустимой скорости ветра. Эти меры снижают риск аварий и продлевают срок службы оборудования.

В целом, адаптивная система регулирования работы ветрогенераторов способствует оптимальной выработке электроэнергии даже в нестабильных погодных условиях, снижает эксплуатационные затраты и обеспечивает экологичность работы.

Система автоматического управления ветрогенераторами включает в себя множество элементов, которые обеспечивают стабильную и эффективную работу оборудования в условиях переменной окружающей среды. Основной задачей таких систем является максимальная выработка электроэнергии при сохранении надежности работы и минимизации износа механизмов [9].

Для контроля и анализа параметров применяются датчики, отслеживающие скорость и направление ветра, вибрацию, температуру узлов и нагрузку на систему. На основе полученных данных система управления оптимизирует ключевые параметры работы, например, регулирует угол наклона лопастей, чтобы повысить эффективность генерации энергии.

Важным аспектом является адаптация к внезапным изменениям погодных условий. Система автоматически корректирует режимы работы, предотвращая перегрузки и аварийные ситуации. Такие алгоритмы учитывают как текущие метеорологические данные, так и прогнозы.

Для обеспечения безопасности эксплуатации предусмотрены функции автоматической остановки ветрогенератора при превышении допустимых параметров, таких как скорость ветра или уровень вибрации. Эти меры направлены на защиту оборудования и окружающей среды от возможных аварий.

Таким образом, системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среды позволяют эффективно использовать ресурсы ветра, повышать экологичность производства электроэнергии и обеспечивать долгосрочную надежность работы оборудования.

Одним из ключевых компонентов системы управления ветрогенератором является автоматическая система регулирования, которая обеспечивает его эффективное функционирование и адаптацию к переменам окружающей среды. Она объединяет различные подсистемы, включая датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и специализированное программное обеспечение.

Контроллер играет центральную роль в работе системы. Он собирает информацию от датчиков, которые фиксируют параметры окружающей среды, такие как скорость и направление ветра, вибрации и температуру оборудования. На основе полученных данных контроллер анализирует текущее состояние и принимает решения о корректировке режимов работы [10].

Программное обеспечение системы представляет собой набор инструментов для управления логикой работы ветрогенератора. Оно позволяет автоматизировать процессы мониторинга, анализа данных и управления исполнительными механизмами, такими как поворот лопастей или изменение угла их наклона. Это помогает оптимизировать генерацию энергии в зависимости от условий.

Исполнительные механизмы выполняют команды, поступающие от контроллера. Например, они регулируют ориентацию лопастей или замедляют вращение при повышении скорости ветра, чтобы избежать перегрузки системы.

Датчики являются неотъемлемой частью системы, обеспечивая точные измерения и передачу данных о внешних и внутренних условиях. Это позволяет системе своевременно адаптироваться к изменениям окружающей среды.

Цель автоматической системы регулирования ветрогенераторов – обеспечить стабильную и безопасную работу установки. Она предотвращает аварийные ситуации, реагирует на изменение погодных условий и минимизирует износ оборудования. В результате достигается высокая эффективность работы, снижение эксплуатационных затрат и улучшение экологических показателей.

Система регулирования является одним из ключевых элементов в работе ветрогенераторов. Основная задача такой системы заключается в их эффективной и безопасной эксплуатации при изменении погодных условий. Это включает предотвращение чрезвычайных ситуаций и повышение общей надежности оборудования [11].

Ключевые компоненты системы автоматического управления включают датчики, отслеживающие основные параметры: скорость и направление ветра, уровень вибрации, отслеживаемые температурные режимы и электрические показатели. В случае, если какой-либо из этих параметров выходит за допустимые пределы, система подает сигналы о необходимости корректировки работы или отключения оборудования.

Элементы защиты включают в себя аварийные механизмы, такие как система отключения генератора, регулирующие механизмы угла наклона лопаток и устройство от перенапряжения. При воздействии экстремальных условий, таких как ураганы или резкие изменения ветра, система оперативно адаптируется для предотвращения повреждений и поддержания безопасности.

В результате использования системы регулирования ветрогенераторов адаптируются к изменяющимся условиям окружающей среды, обеспечивая их стабильную работу и минимизируя риски выбросов из здания.

Для обеспечения стабильной и безопасной работы ветрогенераторов применяются методы минимального регулирования, которые адаптируют оборудование к изменениям таких факторов, как скорость и направление ветра. Эти методы направлены на сохранение эффективности генератора при минимальном вмешательстве в его работу.

Минимальное регулирование предусматривает использование датчиков, которые отслеживают основные параметры, включая силу ветра, угол регулирования лопастей, отслеживаемый уровень нагрузки на генератор. В случае отклонения от установленных норм система выдает сигнал для корректировки лишь основных элементов, сводя к минимуму вмешательство в общий процесс.

Резервные механизмы, такие как аварийное отключение генератора или автоматическая смена угла наклона лопастей, обеспечивают безопасность в случае резких изменений ветровых режимов. Это позволяет поддерживать устойчивость системы без сохранения потребления энергии и ресурсов [12].

Использование минимального регулирования нагрузки на систему управления, сохранение баланса между автономностью и безопасностью. Это обеспечивает долгосрочную работу, экономию ресурсов и снижение выбросов из строя при адаптации к меняющимся условиям окружающей среды.

Все компоненты системы автоматического регулирования ветрогенераторов работают систематически, что позволяет обеспечить высокую надежность, безопасность и эффективность работы ветрогенератора. Управление ветрогенератором осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, которое обеспечивает минимальное вмешательство в процесс его работы. Это программное обеспечение позволяет адаптировать параметры системы к текущим условиям внешней среды, включая скорость и направление ветра, с учетом специфики работы на конкретном объекте.

1.3 Требования к системе управления

Система управления ветрогенераторами должна соответствовать ряду требований, обеспечивающих их стабильную и безопасную работу в условиях изменчивой окружающей среды. Основными требованиями для такой системы являются:

- надежность и устойчивость работы. Система должна быть разработана таким образом, чтобы функционировать без сбоев в течение длительного времени и выдерживать экстремальные погодные условия, включая сильные порывы ветра или резкое изменение его направления;
- точность управления и измерений. Необходимо обеспечить точность регулировки таких параметров, как угол наклона лопаток и скорость ротора, что позволяет оптимизировать генерацию энергии при любых изменениях внешней среды;
- простота и удобство использования. Интерфейс управления должен быть понятным, чтобы операторы могли легко настраивать систему и контролировать ее работу без необходимости применения традиционных технических знаний;
- безопасность и предотвращение аварий. Система управления должна быть оснащена механизмами, обеспечивающими защиту оборудования от перегрузок и чрезвычайных ситуаций. Он включает функции аварийного отключения и автоматической адаптации к экстремальным условиям;
- эффективность и экономичность. Важным требованием является оптимизация использования ресурсов, таких как электроэнергия, для минимизации затрат на управление и обслуживание.

1.4 Определение точек контроля

Для разработки системы автоматизации ветрогенератора с адаптацией к изменяющимся условиям среды необходимо, чтобы она обладала следующими функциями:

- дистанционное управление процессом;
- сбор и обработка полученных данных;
- введение систем мониторинга измеряемых параметров;
- введение систем для аварий.

В ходе анализа работы ветрогенератора были определены следующие точки контроля:

- скорость ветра (м/с), от которой зависит скорость вращения лопастей ротора, допустимая скорость 3–25 м/с;
- скорость вращения ротора и генератора (об/мин), которая должна находиться в пределах рабочих диапазонов 750–1000 об/мин;
- угловое положение лопастей для адаптации к силе ветра 0–90 °С;

- температура вала и генератора для отслеживания перегревов, допустимый предел 120 °С;
- момент на валу для оценки нагрузок до 5000 Н·м;
Точки управления включают следующие параметры:
- угол атаки лопастей 0–90 °С;
- подача нагрузки на генератор, диапазон 0–100% от номинальной мощности;
- отклонение генерируемой энергии от установленных диапазонов $\pm 5\%$ от номинального значения.

Для стабильной работы ветрогенератора в номинальном режиме должны быть установлены критические сигналы для аварийных ситуаций.

- превышение скорости ветра выше 25 м/с;
- снижение скорости вращения ротора ниже 10 об/мин;
- перегрев вала или генератора выше 120 °С;
- превышение момента на валу выше 5000 Н·м;
- резкое отклонение вырабатываемой энергии более чем на 10% от номинального значения.

1.5 Разработка функциональной схемы автоматизации

Функциональная схема автоматизации системы регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям окружающей среды представляет собой графическое отображение архитектуры и принципов работы системы. Она описывает взаимодействие между датчиками, контроллерами, исполнительными механизмами, а также интерфейсами пользователя.

Основными элементами этой системы автоматизации является (таблица 1.1):

- датчики, которые собирают информацию о ключевых параметрах:
- скорость ветра измеряется анемометром SE 2–1.
- скорость вращения ротора и генератора отслеживается тахометрами SE 1–1 и SE 2–1.
- угловое положение лопастей фиксируется датчиком GE 1–1.
- температура конструкции ветрогенератора и мультипликатора контролируется термопарами GT 1–2 и ST 2–2.
- момент на валу измеряется датчиком ST 3–2.
- SE-3–3: Датчик температуры окружающей среды.
- ST-4–1: Датчик температуры смазочных материалов мультипликатора.
- ST-4–2: Датчик температуры электронного оборудования.
- GE-2–1: Датчик вибрации генератора для мониторинга его состояния.

Функциональная схема автоматизации системы регулирования ветрогенераторов предоставлена в приложении А [13].

1.6 Выбор датчиков

1.6.1 Выбор датчика скорости ветра (анемометр) – SE-2–1.

Скорость ветра оказывает ключевое влияние на работу ветрогенератора, так как именно энергия ветра преобразуется в электрическую энергию. Эффективность генерации напрямую зависит от скорости ветра.

При низких скоростях ветра генератор может работать с минимальной производительностью, а при скорости ниже порогового значения ветрогенератор вовсе не запускается. Оптимальная скорость ветра позволяет устройству достигать максимальной эффективности, обеспечивая стабильное производство электроэнергии. Управление и контроль за скоростью ветра – важнейший аспект, обеспечивающий надежность и эффективность работы ветрогенераторов.

Параметры сравнения датчиков скорости ветра представлены в таблице 1.1.

Датчик скорости ветра Vaisala WMT700 широко используется в различных отраслях, таких как энергетика, метеорология, морская навигация и строительство. В энергетике он применяется для контроля и оптимизации работы ветрогенераторов, обеспечивая точные данные о скорости ветра, которые необходимы для эффективной выработки электроэнергии.

Датчик скорости ветра Vaisala WMT700 ценится за свою надежность, точность и способность работать в сложных условиях. Работает в экстремальных условиях – от -52°C до $+60^{\circ}\text{C}$, устойчив к обледенению, что делает его идеальным для суровых климатических зон. Именно благодаря сочетанию высокой точности, надежности и долговечности этот датчик стал стандартом в области мониторинга ветровых параметров [14].



Рисунок 1.3 – Датчик скорости ветра Vaisala WMT700

Таблица 1.1 – Сравнение датчиков скорости ветра

Параметры	Thies Clima First Class	Vaisala WINDCAP® Ultrasonic WMT700
Диапазон измерения скорости ветра, м/с	0,3–75	0–65
Выходной сигнал	4–20 мА, импульсный	RS-485, Modbus RTU, SDI-12
Температурный диапазон, °С	От -40 до +80	От -52 до +60
Материал корпуса	Нержавеющая сталь, алюминий	Коррозионностойкий пластик
Точность измерения, м/с	±0,3	±0,1
Принцип работы	Механический (лопасти)	Ультразвуковой
Наличие движущихся частей	Есть	Нет
Класс защиты	IP65	IP66/IP67

1.6.2 Датчик направления ветра – SE-3–1.

Направление ветра играет важную роль в работе системы ветрогенератора, так как для максимальной эффективности лопасти турбины должны быть ориентированы перпендикулярно ветровому потоку. Если направление ветра меняется, система управления ветрогенератора, оснащённая датчиками направления, корректирует положение турбины с помощью механизма поворота башни (азимутального привода). Постоянный мониторинг и регулирование направления ветра с помощью датчика направления ветра позволяет ветрогенератору работать стабильно и эффективно, минимизируя потери энергии и снижая вероятность поломок.

Выбор осуществлялся между ультразвуковыми и механическими датчиками направления ветра. Рассматривались модели WindSonic (ультразвуковой датчик) и NRG 200P (механический флюгер). Основными критериями выбора стали диапазон рабочих температур, защита от погодных условий, точность измерений и поддерживаемые интерфейсы для передачи данных [15].

Параметры датчиков направления ветра представлены в таблице 1.2.

В рамках данного проекта был выбран ультразвуковой датчик WindSonic благодаря его высокой точности, быстрому времени отклика и устойчивости к внешним условиям. Ультразвуковая технология исключает наличие подвижных частей, что увеличивает надежность и срок службы устройства. Совместимость

с интерфейсами RS232/RS485 позволяет без проблем интегрировать его с контроллерами Siemens.

Таблица 1.2 – Сравнение датчиков направления ветра

Параметр	WindSonic (ультразвуковой)	NRG 200P (механический)
Принцип работы	Ультразвуковой	Механический (флюгер)
Диапазон рабочих температур, °С	От -40 до +70	От -20 до +60
Диапазон измерения направления, °	0–360	0–360
Точность измерения направления, °	±2	±5
Время отклика, с	<0.1	0.5
Интерфейс передачи данных	RS232, RS485, SDI-12	Нет (аналоговый выход)
Выходной сигнал	Цифровой	Аналоговый
Энергопотребление, Вт	<0.1	Нет
Защита от пыли и влаги (IP)	IP66	IP65
Наличие подвижных частей	Нет	Да
Срок службы, лет	>10	5–7



Рисунок 1.4 – Анемометр WindSonic

1.6.3 Датчик скорости вращения генератора

Скорость вращения генератора – ключевой параметр, который используется для контроля работы ветрогенератора. Корректное измерение

скорости вращения позволяет оптимизировать выработку энергии, предотвращать перегрузки и повышать эффективность всей системы. Для анализа рассматривались две основные модели датчиков: индуктивный датчик IFM SI5000 и оптический датчик OMRON E6C3-C [16].

Параметры датчиков скорости вращения генератора представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнение датчиков скорости вращения генератора

Параметр	Индуктивный датчик (IFM SI5000)	Оптический датчик (OMRON E6C3-C)
Принцип работы	Измерение изменения магнитного поля	Отражение света от меток
Диапазон измеряемых скоростей, об/мин	0–6000	0–10 000
Точность измерения, об/мин	±1%	±0.5%
Время отклика, мс	<1	<0.1
Диапазон рабочих температур, °С	От -40 до +85	От -10 до +70
Интерфейс передачи данных	Аналоговый (4–20 мА), PNP/NPN	RS485, CAN, аналоговый
Степень защиты (IP)	IP68	IP65
Устойчивость к вибрациям	Высокая	Средняя
Энергопотребление, Вт	<0.5	0.5
Наличие подвижных частей	Нет	Нет

Для системы управления ветрогенератором был выбран индуктивный датчик скорости вращения IFM SI5000. Этот выбор обоснован следующими преимуществами. Высокая устойчивость к внешним воздействиям, включая вибрации, пыль и влагу, благодаря степени защиты IP68. Широкий диапазон рабочих температур (-40 до +85 °С), что делает его пригодным для использования в суровых климатических условиях. Надёжность и долговечность из-за отсутствия подвижных частей. Более низкая стоимость по сравнению с оптическим датчиком, что снижает затраты на реализацию проекта. Оптический датчик OMRON E6C3-C, несмотря на высокую точность и быстродействие, имеет ограниченный диапазон рабочих температур и менее защищён от пыли и влаги, что делает его менее подходящим для условий эксплуатации ветрогенератора [17].



Рисунок 1.5 – индуктивный датчик скорости вращения IFM SI5000

1.6.4 Датчик углового положения вала генератора

Для системы управления ветрогенератором важным элементом является датчик углового положения вала. Этот датчик позволяет определять угол поворота вала, что критично для управления направлением вращения лопастей, их углом атаки и оптимизации выработки электроэнергии.

Для анализа были выбраны две модели датчиков: магнитный датчик углового положения (IFM ROP520) и оптический энкодер (OMRON E6B2-CWZ6C).

Параметры датчиков углового положения вала генератора представлены в таблице 1.4.

Для системы автоматического регулирования ветрогенератора был выбран магнитный датчик углового положения IFM ROP520. Причина выбора высокая устойчивость к загрязнению, влажности и вибрациям, что делает его более надёжным в условиях эксплуатации ветрогенератора.

Широкий диапазон рабочих температур (-40 до $+85$ °C), подходящий для различных климатических условий. Простота интеграции с системой управления через стандартные интерфейсы (аналоговый сигнал, CAN). Долговечность за счёт отсутствия подвижных частей, что снижает вероятность износа [18].



Рисунок 1.6 – магнитный датчик углового положения IFM ROP520

Таблица 1.4 – Сравнение датчиков углового положения вала

Параметр	Магнитный датчик (IFM ROP520)	Оптический энкодер (OMRON E6B2-CWZ6C)
Принцип работы	Измерение угла на основе изменения магнитного поля	Измерение угла с использованием световых сигналов
Диапазон измеряемых углов, °	0–360	0–360
Точность измерения, °	±0.1	±0.05
Разрешение, импульсов/оборот	4096	3600
Время отклика, мс	<1	<0.5
Диапазон рабочих температур, °С	От -40 до +85	От -10 до +70
Интерфейс передачи данных	Аналоговый (4–20 мА), CAN	RS485, аналоговый
Материал корпуса	Нержавеющая сталь	Алюминий/пластик
Степень защиты (IP)	IP67	IP65
Устойчивость к вибрациям	Высокая	Средняя
Энергопотребление, Вт	<0.5	<1
Наличие подвижных частей	Нет	Да

1.6.5 Датчик скорости вращения ротора

Контроль скорости вращения ротора – ключевой параметр для эффективной и безопасной работы ветрогенератора. Он влияет на энергетическую производительность, защиту оборудования и общую надёжность системы.

Параметры датчиков скорости вращения ротора таблица 1.5.

Энкодер идеально подходит для мониторинга скорости вращения ротора, поскольку:

- позволяет точно отслеживать изменения скорости для эффективного управления генератором.
- обеспечивает сигнал для регулирования угла атаки лопастей и контроля нагрузки.
- может использоваться в системах диагностики для предотвращения аварийных ситуаций.

– в итоге энкодер – лучший выбор для системы управления ветрогенератором, требующей точных измерений и цифровой связи с контроллером.

– Sick DFS60B-BECK10000 – надёжный и точный энкодер, который идеально подходит для контроля скорости ветрогенератора и интеграции с ПЛК.

Таблица 1.5 – Сравнение датчиков скорости вращения ротора

Параметр	Энкодер	Тахогенератор	Индуктивный/ герконовый датчик
Диапазон скоростей, об/мин	1 – 10 000	50 – 5000	До 5000
Точность измерения	Высокая (до 0,01°)	Средняя ($\pm 1-5\%$)	Средняя (зависит от количества меток)
Время отклика, мс	<1	<10	1 – 10
Выходной сигнал	Цифровой (TTL, RS485, CAN)	Аналоговый (0-10 В, 4-20 мА)	Цифровой (импульсы, частота)
Материал корпуса	Алюминий, нержавеющая сталь (IP65-IP68)	Алюминиевый сплав (IP54-IP67)	Пластик, металл (IP65-IP68)



Рисунок 1.7 – энкодер Sick DFS60B-BECK10000

1.7 Исполнительный механизм

Привод для изменения угла наклона лопастей (pitch control) является одним из ключевых исполнительных механизмов в системе регулирования ветрогенератора. Он позволяет оптимизировать работу установки, адаптируя угол атаки лопастей к изменяющимся условиям среды, таким как скорость ветра и направление. Это способствует повышению эффективности генерации

электроэнергии и предотвращает перегрузку или повреждение генератора при сильных ветрах.

Исполнительный механизм для изменения угла наклона лопастей является критически важной частью системы регулирования ветрогенератора. Наиболее предпочтительным является электромеханический привод благодаря простоте конструкции и управления, а также низким эксплуатационным затратам. Применение такой системы обеспечивает эффективную и безопасную работу ветрогенератора в любых условиях окружающей среды [19].

Таблица 1.6 – Технические характеристики исполнительного механизма Moog Pitch System

Параметр	Значение
Тип двигателя	Электрический синхронный
Максимальный момент, Н·м	1 000–3 000
Диапазон температур, °С	-40 до +70
Скорость вращения, об/мин	До 60
Питание	24–48 В DC
Точность позиционирования	$\pm 0.1^\circ$

Электромеханический привод, такой как Moog Pitch System, является оптимальным решением для управления углом наклона лопастей в современных ветрогенераторах. Он сочетает в себе высокую точность, надёжность, простоту эксплуатации и энергоэффективность, что делает его предпочтительным выбором для системы автоматического регулирования.



Рисунок 1.8 – исполнительный механизм Moog Pitch System

1.7.1 Привод поворота башни генератора

Привод поворота башни ветрогенератора является ключевым исполнительным механизмом, обеспечивающим ориентацию ветрогенератора относительно направления ветра. Это устройство позволяет регулировать угол

наклона лопастей, обеспечивая оптимальную работу генератора и максимальную эффективность его работы при различных условиях окружающей среды.

Привод поворота башни работает в тесной связке с системой управления ветрогенератора. На основе данных о направлении и силе ветра система управления определяет, какое положение ветрогенератора будет наиболее эффективным. Привод поворота затем изменяет ориентацию установки. Приводы могут быть электрическими или гидравлическими, в зависимости от мощности установки и ее характеристик. Электрические приводы используются для точного и быстрого поворота, тогда как гидравлические системы применяются для более крупных установок, где требуется высокая мощность и долговечность. Выбор гидравлического привода для системы поворота башни ветрогенератора является отличным решением, особенно для крупных ветрогенераторов или в условиях, где требуется высокая мощность и надежность при сильных ветровых нагрузках.

Гидравлический мотор – это исполнительный механизм, преобразующий гидравлическое давление в механическое вращательное движение. Он используется для точного управления углом поворота башни ветрогенератора, обеспечивая плавное и мощное вращение. В отличие от простых гидравлических цилиндров, которые обеспечивают линейное движение, гидравлические моторы обеспечивают вращение и могут быть настроены на работу в условиях высокого момента силы, который необходим для поворота крупных ветрогенераторов [20].



Рисунок 1.9 – Гидромотор Bosch Rexroth A6VM160/63

1.8 Выбор ПЛК

Для управления основными компонентами ветрогенераторной установки необходимо выбрать подходящий контроллер, с помощью которого можно осуществить поставленную задачу управления. Выбор осуществлялся между двумя контроллерами Siemens S7-1200 и Schneider M221.

Был выбран контроллер Siemens S7-1200 – так как это оптимальный выбор для управления ветрогенератором, так как он обеспечивает надёжную работу, точный контроль скорости и удобную интеграцию с датчиками и инверторами.

Таблица 1.7 – Технические характеристики контроллеров

Параметр	Siemens S7-1200	Schneider M221
Производительность (операций/сек)	Высокая (до 100 кИнструкций/мс)	Средняя (до 20 кИнструкций/мс)
Аналоговые входы (AI)	4-8 (0-10 В, 4-20 мА)	2-6 (0-10 В, 4-20 мА)
Цифровые входы (DI)	14-24	8-16
Интерфейсы связи	Ethernet, RS485, Profibus	Ethernet, RS485, Modbus
Поддержка энкодеров	Да (через высокоскоростные входы)	Ограниченно
Программирование	TIA Portal (LAD, FBD, STL)	SoMachine (LAD, ST)
Диапазон температур	-20...+60°C	0...+55°C
Степень защиты	IP20	IP20



Рисунок 1.10 – Контроллер Siemens S7-1214C (6ES7214-1AG40-0XB0)

2 Расчетная часть

2.1 Синтез системы автоматического регулирования скоростью вращения ротора ветрогенераторной установки

Постановка задачи №1. С целью достижения заданных оценок качества на основе математической модели замкнутой системы регулирования необходимо синтезировать типовой регулятор для управления скоростью вращения ротора, n , в зависимости от момента, M : $n=f(M)$.

Для построения математической модели управления ветрогенератором с использованием типового регулятора, где скорость вращения ротора рассматривается как опорная величина, изменяющаяся во времени, и учитывается при формировании управляющего воздействия, применяются следующие компоненты.

Модель динамики ветрогенератора. Как было показано выше, ветрогенератор состоит из трех основных частей: ротора, генератора и системы управления. Каждый из этих компонентов влияет на производительность и выходную мощность ветрогенератора.

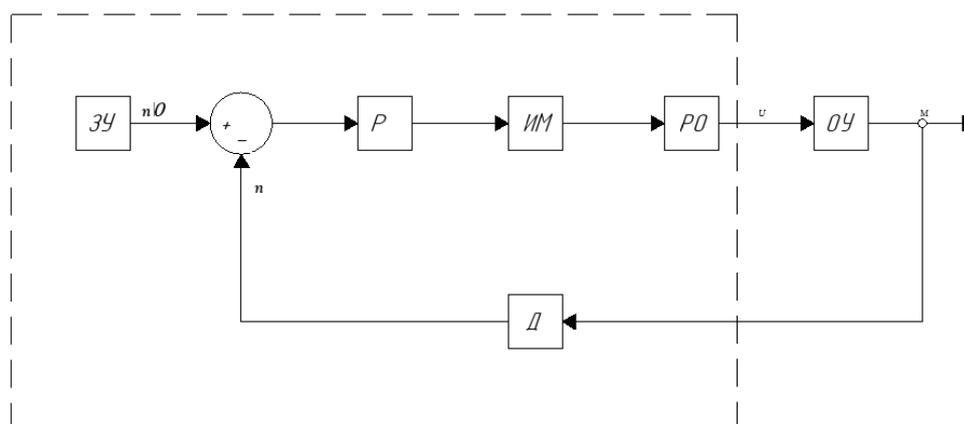


Рисунок 2.1 – Функциональная схема контура регулирования скорости вращения ротора на основе принципа регулирования с обратной связью (n от M)

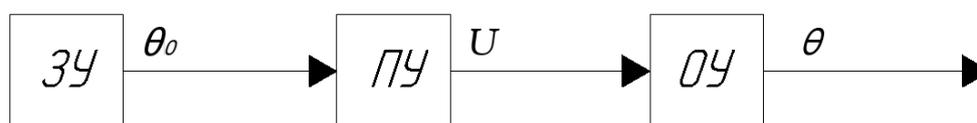


Рисунок 2.2 – Функциональная схема контура программного управления углового положения лопастей

На основе представленных контуров управления были сформулированы следующие постановки задач:

В рассматриваемой системе объектом управления является электропривод (исполнительный механизм), регулирующий угол наклона лопастей и нагрузку

на генератор. Основной управляющей величиной будет являться сигнал с контроллера, изменяющий положение привода.

Цель – обеспечить устойчивое поведение системы при внешних возмущениях и максимальную эффективность выработки электроэнергии. Для этого необходимо:

- определить передаточную функцию объекта управления;
- оценить динамические характеристики системы;
- синтезировать типовой регулятор;
- проверить работоспособность системы в условиях моделируемых возмущений.

2.2 Разработка структурной схемы

Основываясь на изученных точках контроля, был выделен контур управления скоростью вращения ротора как ключевой элемент в системе автоматического регулирования ветрогенератора. Он необходим для обеспечения стабильной работы установки при изменяющихся условиях ветровой среды.

В ветрогенераторной установке скорость вращения ротора напрямую влияет на эффективность преобразования кинетической энергии ветра в электрическую. При увеличении скорости ветра возрастает и частота вращения ротора, что приводит к повышению генерируемой мощности. Однако существует предельный диапазон допустимых значений скорости вращения, за выход за который может привести к снижению эффективности и увеличению механических нагрузок на оборудование. Это, в свою очередь, может вызвать ускоренный износ деталей и аварийные режимы работы генератора.

Таким образом, для построения передаточной функции была использована аппроксимация динамики механической системы, в которой входным параметром является управляющее воздействие (момент электродвигателя/исполнительного механизма), а выходным параметром – скорость вращения ротора. Динамика системы может быть описана инерционным звеном первого порядка, что соответствует реальной физике процесса: наличие массы, момента инерции и задержки в отклике на управляющее воздействие.

Исходные значения входного и выходного параметров, полученные в результате моделирования и технической документации оборудования, представлены в таблице 2.1.

Для получения передаточной функции контура управления будет использована прикладная программа, входящая в комплект MATLAB, под названием System Identification Toolbox.

Таблица 2.1 – Исходные экспериментальные данные для построения модели

№	Управляющий момент, Н·м М	Установившаяся скорость вращения, об/мин n
1	100	680
2	120	730
3	140	770
4	160	810
5	180	850
6	200	890
7	220	930
8	240	970
9	260	1010
10	280	1050

Эта программа широко применяется в инженерии, научных исследованиях и образовании для решения задач анализа данных, моделирования и проектирования динамических систем.

System Identification Toolbox позволяет автоматически построить математическую модель системы на основе входных и выходных параметров, представленных в таблице 2.1. Основное окно среды System Identification Toolbox, в котором осуществляется настройка входных данных и построение модели, будет представлено на рисунке 2.3.

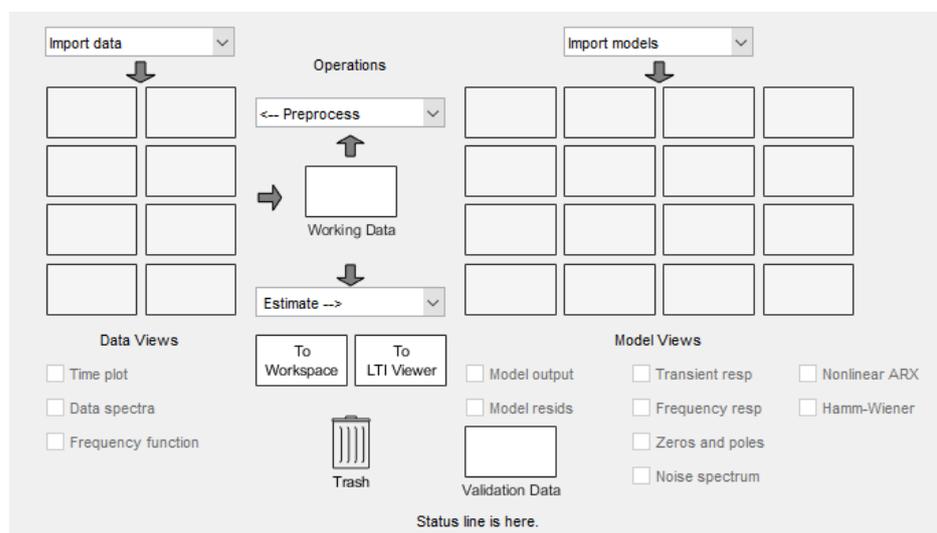


Рисунок 2.3 – Окно System Identification Toolbox

После импорта входных и выходных переменных происходит процесс моделирования, который показан на рисунке 2.4:

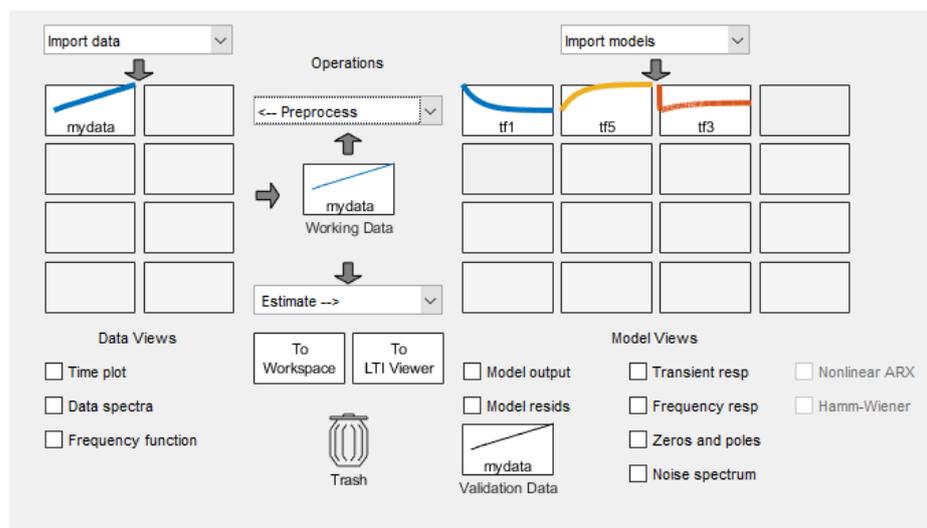


Рисунок 2.4 – процесс моделирования в System Identification Toolbox

Основным критерием, подтверждающим корректность полученной математической модели объекта управления, является оценка адекватности модели. Этот показатель отражает, насколько точно модель передаточной функции описывает реальное поведение объекта на основании заданных входных и выходных данных.

После подбора и сравнения различных передаточных функций в среде System Identification Toolbox для дальнейшего синтеза регулятора была выбрана модель, обладающая наилучшей степенью соответствия экспериментальным данным. Оценка адекватности данной модели составила 98,58%, что свидетельствует о допустимом уровне точности аппроксимации и возможности её применения в синтезе регулятора.

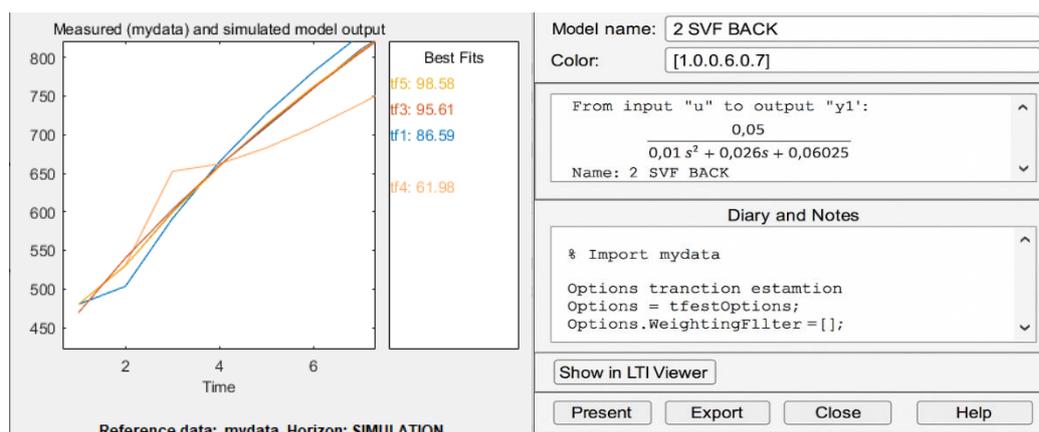


Рисунок 2.5 – Сравнение процентов адекватности моделей и полученная в System Identification Toolbox математическая модель

На основании результатов идентификации, полученных в среде MATLAB System Identification Toolbox, была сформирована разомкнутая модель объекта управления в виде передаточной функции:

$$G(s) = \frac{0.05}{0,01s^2 + 0.026s + 0.06025}$$

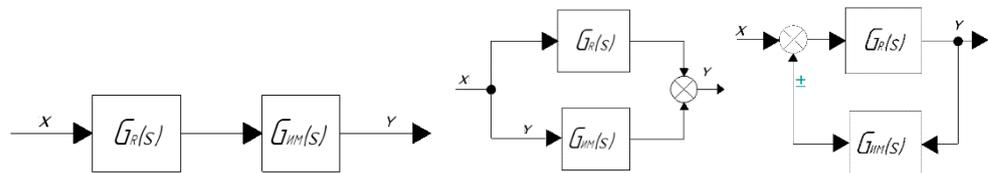
2.3 Анализ динамических свойств системы

В структурном синтезе систем автоматического управления используются различные типы соединений звеньев.

К основным из них относятся:

1. Последовательное соединение — когда выход одной подсистемы напрямую подаётся на вход следующей. Такой тип соединения позволяет описывать передачу сигнала по каскаду элементов (рисунок 2.6 а).
2. Параллельное соединение — при котором одна и та же входная величина подаётся одновременно на несколько звеньев, а их выходы суммируются (рисунок 2.6 б).
3. Параллельно-встречное соединение — образует структуру с обратной связью. Если обратный сигнал подаётся с отрицательным знаком на сумматор, речь идёт об отрицательной обратной связи. Такая система называется замкнутой (рисунок 2.6 в).

Эти соединения являются базовыми при построении структурных моделей систем управления и активно используются в моделировании в среде MATLAB/Simulink.



а) последовательное б) параллельное в) обратная связь

Рисунок 2.6 – Основные соединения звеньев

Структурная схема системы управления может включать большое количество звеньев, соединённых различными способами. На практике для упрощения анализа и моделирования применяется процедура преобразования сложной схемы в более простую, эквивалентную, с сохранением всех динамических характеристик системы.

Такое преобразование осуществляется на основе принципа суперпозиции, согласно которому реакция системы на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий по отдельности.

В результате применения методов структурных преобразований можно получить свёрнутую передаточную функцию, отражающую поведение всей системы. Далее на её основе строится переходная характеристика и выполняется синтез регулятора.

$$G_{\text{экв}}(s) = G_R(s) \times G_{ИМ}(s) \text{ — рисунок 2.6а,} \quad (2.1)$$

$$G_{\text{ЭКВ}}(s) = G_R(s) + G_{\text{ИМ}}(s) \text{ – рисунок 2.6б,} \quad (2.2)$$

$$G_{\text{ЭКВ}}(s) = \frac{G_R(s)}{1 \pm G_R(s) \times G_{\text{ИМ}}(s)} \text{ – рисунок 2.6а,} \quad (2.3)$$

2.4 Расчёт математической модели системы

Для системы автоматического управления скоростью вращения электродвигателя, реализованной по типовой структурной схеме, были построены функциональная и структурная схемы, отражающие состав и взаимодействие основных элементов САУ.

Данные схемы представлены на рисунках ниже и включают исполнительный механизм (усилитель), регулирующий орган (генератор), объект управления (двигатель), а также датчик обратной связи (тахогенератор).

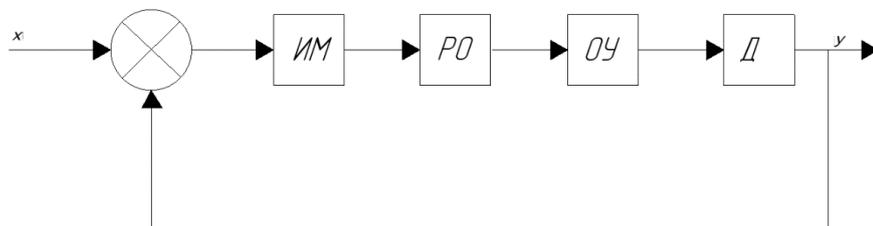


Рисунок 2.7 – Функциональная схема САУ двигателем

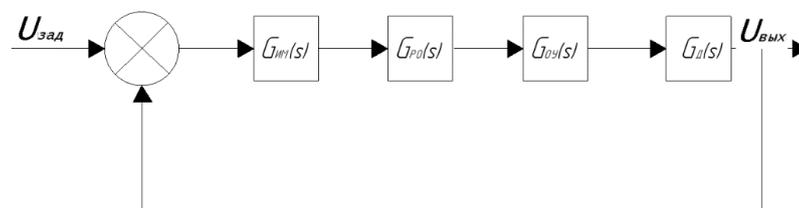


Рисунок 2.8 – Структурная схема САУ двигателем

Передаточные функции звеньев САУ двигателем:

$$G_y(s) = k_y, G_{\text{ИМ}}(s) = \frac{k_{\text{ИМ}}}{(T_{\text{ИМ}}s + 1)}, G_{\text{Д}}(s) = \frac{k_{\text{Д}}}{(T_{\text{Я}}s + 1)(T_{\text{М}}s + 1)}, G_{\text{ТГ}}(s) = k_{\text{ТГ}},$$

где $G_y(s), G_{\text{ИМ}}(s), G_{\text{Д}}(s), G_{\text{ТГ}}(s)$ – передаточные функции усилителя, исполнительного механизма, двигателя, тахогенератора:

$k_y = 108, k_{\text{ИМ}} = 28, k_{\text{Д}} = 0,0001, k_{\text{ТГ}} = 0,525$ – коэффициенты усиления усилителя, генератора, двигателя, тахогенератора соответственно [2];

$T_{\text{ИМ}} = 0,1, T_{\text{М}} = 0,026, T_{\text{Я}} = 0,01$ – постоянная времени цепи возбуждения генератора, электромеханическая постоянная времени, постоянная времени якорной цепи двигателя соответственно. На основе правил преобразования

структурных схем, получим эквивалентную передаточную функцию разомкнутой САР частотой вращения двигателем:

$$G(s) = G_y(s) \times G_{\text{ИМ}}(s) \times G_{\text{Д}}(s) \times G_{\text{ТГ}}(s) \\ = k_y \times \frac{k_{\text{ИМ}}}{(T_{\text{ИМ}}s + 1)} \times \frac{k_{\text{Д}}}{(T_{\text{Я}}s + 1)(T_{\text{М}}s + 1)} \times k_{\text{ТГ}} \quad (2.4)$$

При подстановке значений параметров, перепишем математическую модель (2.4) в виде:

$$G(s) = 108 \times \frac{28}{0,1s + 1} \times \frac{0.0001}{0,01s^2 + 0.026s + 1} \times 0.525, \quad (2.5)$$

$$\text{И,} \quad (2.6)$$

Введя обозначение для коэффициента усиления $k = k_y \times k_{\text{ИМ}} \times k_{\text{Д}} \times k_{\text{ТГ}}$, на основе правил преобразования 6 структурных схем, получим эквивалентную передаточную функцию замкнутой САР частотой вращения двигателя:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{k}{0.001s^3 + 0.0126s^2 + 0.126s + 1 + k} \quad (2.7)$$

$$T(s) = \frac{0.15876}{0.001s^3 + 0.0126s^2 + 0.126s + 1.15876} \quad (2.8)$$

На рисунке 2.9 представлены результаты моделирования, полученные в MATLAB Simulink, разомкнутой САР двигателем. Получены результаты моделирования исходной (2.9) и эквивалентной (2.10) схем – переходные процессы, которые совпадают.

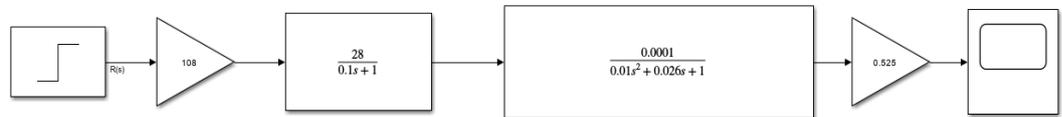


Рисунок 2.9 – Структурная схема разомкнутой САР

Смоделируем структурную схему разомкнутой системы автоматического регулирования ветрогенератора, представленную на рисунке 2.10 и запустим модель для получения переходных характеристик. Полученные данные необходимы для анализа динамических свойств системы при изменяющихся условиях окружающей среды, таких как скорость и направление ветра.

В данной схеме:

- $R(s)$ – задающее воздействие;
- $Y(s)$ – выходная координата.

Передаточная функция замкнутой САР была определена ранее в виде:

На рисунке 2.10 представлен переходной процесс замкнутой системы автоматического регулирования при воздействии единичного входного сигнала. Видно, что отклик сопровождается выраженным перерегулированием и затухающими колебаниями, что свидетельствует о наличии обратной связи.

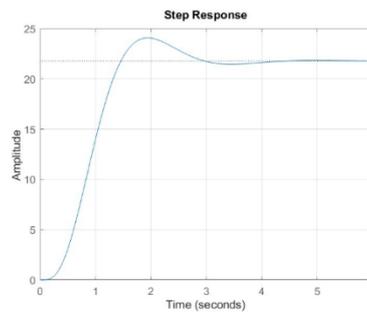


Рисунок 2.10 – Переходной процесс разомкнутой системы регулирования

Полученные значения свидетельствуют о том, что система в разомкнутом состоянии является устойчивой, обладает умеренным перерегулированием и относительно быстрым переходным процессом. Однако отсутствие корректирующего действия обратной связи приводит к высокому установившемуся значению выходного сигнала, что не обеспечивает требуемой точности регулирования. Это указывает на необходимость включения обратной связи и возможного применения регулятора.

Для более точной оценки качества регулирования была использована прикладная среда MATLAB Linear System Analyzer Toolbox, с помощью которой были получены численные параметры переходного процесса. На рисунке представлена переходная характеристика замкнутой системы, построенная на основе моделирования, с визуализацией ключевых показателей качества регулирования.

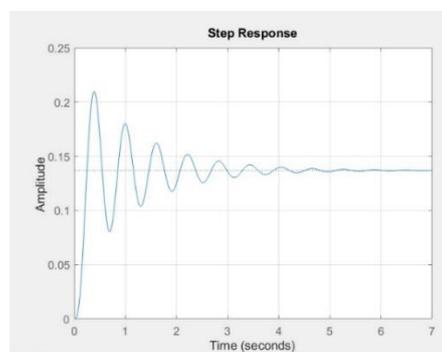


Рисунок 2.11 – Результат моделирования замкнутой системы

Время регулирования – это параметр, характеризующий время, за которое выходной сигнал входит в допустимую зону $\pm 5\%$ от уставки и остается в этом диапазоне без выхода за его пределы. По результатам анализа переходной характеристики, изображённой на рисунке 2.11, установлено, что система стабилизируется за 4,6 секунды, что свидетельствует о её способности к восстановлению после внешнего возмущения.

Время нарастания (время достижения 90% от установившегося значения) составляет 0.7 секунды, что указывает на достаточно высокую скорость реакции системы на изменение входного сигнала.

Время запаздывания (время достижения 10 % от установившегося значения) равно 0,3 секунды, что отражает начальную инерционность системы.

Процент перерегулирования (P_{ov}) был определён по превышению пикового значения над уставкой. Он составляет около 59,3 %, что говорит о выраженной колебательной реакции системы, не оснащённой регулятором. Такое поведение может быть нежелательным в условиях нестабильного ветрового потока, характерного для ветрогенераторов.

Полученные данные позволяют заключить, что для повышения точности и устойчивости системы требуется внедрение корректирующего регулятора. Это необходимо для уменьшения колебательности и стабилизации выходного сигнала в условиях изменяющихся нагрузок и внешних воздействий.

Поскольку переходной процесс замкнутой САР ветрогенератора построен без регулятора, процент перерегулирования рассчитывается по формуле:

$$P_{ov} = \frac{Y_{max} - Y_{ss}}{Y_{ss}} * 100\% \quad (2.9)$$

где Y_{max} – 0.215 пиковое значение, которое достигло выходной сигнал;

Y_{ss} – 0.135 установившееся значение.

Переходной процесс демонстрирует чётко выраженный колебательный характер: наблюдается около 5 полных колебаний ($M = 5$), прежде чем система входит в устойчивый режим. Это свидетельствует о недостаточном демпфировании, что подтверждается пониженным декрементом затухания.

Установившаяся ошибка (e_{ss}) — это разность между уставкой и выходным сигналом в стационарном режиме:

$$e_{ss} = Y_{ss} - Y; \quad e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (2.10)$$

Это говорит о значительном отклонении выходной величины от заданного значения, что критично для задач точного регулирования.

Необходима настройка регулятора, обеспечивающего снижение установившейся ошибки, уровня колебаний и повышение качества стабилизации.

Аналитически установившуюся ошибку можно рассчитать по алгоритму, который представлен ниже.

Алгоритм решения:

Шаг 1. Необходимо получить передаточную функцию относительно единично ступенчатого воздействия по формуле

$$T_{e(s)} = \frac{1}{1 + \frac{0.0001}{0.01s^2 + 0.026s + 1}} \times \frac{1}{s}$$

Шаг 2. Необходимо найти динамическую ошибку по формуле:

$$E_{(s)} = \frac{0.01s^2 + 0.026s + 1}{0.01s^2 + 0.026s + 1.0001} \times \frac{1}{s}$$

Шаг 3. Необходимо найти статическую ошибку по формуле:

$$E_{ss}(S) = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} [s \times E(s)] \quad (2.11)$$

По формуле, описанной выше подставляем значения и получаем значения статической ошибки:

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left[s \times \frac{0.01s^2 + 0.026s + 1}{0.01s^2 + 0.026s + 1.0001} \times \frac{1}{s} \right] = 0.9999$$

Графически разница между уставкой и выходным сигналом показана на рисунке 2.12. Согласно рисунку, установившаяся ошибка равна $ess=0.9999$.

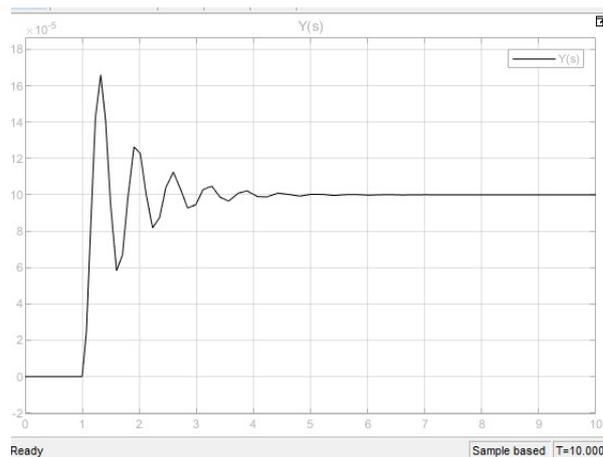


Рисунок 2.12 – Разность выходного сигнала от уставки

Оценка характеристик переходного процесса замкнутой САР

Время достижения первого максимума — это временной интервал, за который выходной сигнал достигает своего наибольшего значения перед стабилизацией. Согласно переходному процессу на рисунке 2.12, время достижения максимума составляет 1,1 секунды:

$$T_{\text{пик}}=0,7 \text{ сек}$$

Время нарастания (время достижения 90% от установившегося значения) по графику составляет 0,7 секунды, что свидетельствует о приемлемой скорости реакции на входное воздействие:

$$TR=0,7 \text{ сек.}$$

Декремент затухания показывает, на сколько уменьшается амплитуда колебаний от одного пика к следующему. В данной системе присутствуют колебания, следовательно, декремент может быть рассчитан на следующем этапе анализа, однако в текущем приближении он не рассматривался.

Были проанализированы основные прямые оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического регулирования ветрогенератора. Все полученные значения сведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Прямые оценки качества САР

№	Оценка качества	значения
1	Время регулирования (T_{set})	4.6 сек
2	Перерегулирование (Pov)	50%
3	Число колебаний (M)	6
4	Колебательность (μ)	0,7%
5	Частота колебаний ($wosc$)	1,3 рад/с
6	Установившаяся ошибка (ess)	0.9999
7	Время достижения первого максимума (T_p)	0,4 сек
8	Время нарастания (TR)	0,7
9	Декремент затухания (λ)	0,5

По полученным корням характеристического уравнения, можно произвести корневые оценки качества.

Для этого необходимо вспомнить полученные корни характеристического уравнения замкнутой системы: $s_1 = -1.3+j9.93$; $s_2 = -1.3-j9.93$.

Для получения корневых оценок используется минимальный корень с действительным значением, то есть в данном случае используется s_2 , который в ходе этого анализа обозначается как σ_{min} . Время регулирования по корням определяется по формуле (2.12):

$$t_{per} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} \quad (2.12)$$

Перерегулирование по корням прямо зависит от коэффициента демпфирования. Так как все корни замкнутой системы являются отрицательными и действительными данный коэффициент в системе отсутствует, что говорит о том, что перерегулирование системы равно 0. Степень устойчивости характеризует быстродействие системы и определяется по формуле (2.7):

$$\mu = |3.08| = 0.00308 \quad (2.13)$$

Колебательность не рассчитывается, так как корни вещественные. Однако по графику видно наличие умеренных колебаний, что подтверждает слабую демпфированность системы.

Вывод:

Моделирование замкнутой системы управления показало наличие устойчивого, но слабо демпфированного переходного процесса. Система обладает умеренным перерегулированием и длительным временем установления, что указывает на необходимость корректировки параметров регулятора. Предварительная настройка с целью увеличения устойчивости и снижения ошибок отклика позволит обеспечить более стабильную работу в условиях внешних возмущений

2.5 Синтез типового регулятора

Для настройки регулятора автоматической системы управления была применена методика расчёта параметров PID-регулятора на основе аналитически определённых критических параметров: коэффициента усиления $K_{кр}$ и периода колебаний $T_{кр}$.

В отличие от классической эмпирической методики, где эти параметры определяются экспериментально (наблюдением предельных колебаний), в данной работе значения были получены вручную, с применением аналитических методов — критерия устойчивости Михайлова и матрицы Гурвица.

На основании расчетов критерия устойчивости Михайлова и матрицы Гурвица, была сформирована замкнутая модель управления в виде передаточной.

$$T = \frac{0.1588}{0.001s^3 + 0.126s^2 + 0.126s + 1.159}$$

$$G(s) = \frac{0.1588}{0.001s^3 + 0.126s^2 + 0.126s + 1.159}$$

Рассматривается задача анализа устойчивости замкнутой системы управления с помощью метода построения характеристического уравнения. Исходной информацией является передаточная функция замкнутой системы.

$$T(s) = \frac{K_p * 0.1588}{0.001s^3 + 0.126s^2 + 0.126s + 1.159 + 0.1588K_p}$$

Однако, перед моделированием системы в MATLAB, найдем коэффициент усиления $K_{кр}$ и период колебаний $T_{кр}$. Алгоритм решения представлен ниже.

Алгоритм решения:

Шаг 1. На основе передаточной функции формируется характеристическое уравнение вида:

$$1.159 + 0.1588K_p > 0$$

$$1.159 + 0.1588K_p = 0$$

Выражается зависимость устойчивости от коэффициента усиления K_p

Шаг 2. Анализ устойчивости с помощью определителя Гурвица.

$$K_p = -\frac{5795}{794} \sim -7.298$$

Формируется определитель второго порядка для нахождения критического значения коэффициента K_p , при котором система теряет устойчивость

$$H = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.126 & 1.159 + 0.1588K_p \\ 0.001 & 0.126 \end{vmatrix} \\ = (0.126 * 0.126) - (0.001 * (1.159 + 0.1588K_p)) = 0$$

$$0,014717 - 0,0001588K_{кр} = 0$$

$$K_{кр} = 92,676$$

$$T_{кр} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Рассмотрим часть характеристического уравнения, которая представляет собой характеристический полином:

$$D(s) = 0.001s^3 + 0.126s^2 + 0.126s + 15.876$$

Подставим в этот полином $s = j\omega$, где ω представляет собой угловую частоту колебаний. При этом характеристический полином принимает вид:

Выполняется подстановка $s = j\omega$ для выделения действительной и мнимой частей с целью дальнейшего анализа частотных свойств системы.

$$D(j\omega) = 0.001(j\omega)^3 + 0.126(j\omega)^2 + 0.126(j\omega) + 15.876$$

где действительная часть будет содержать четные степени ω

$$(j\omega)^3 = j^3 \omega^3 = -j\omega^3$$

$$(j\omega)^2 = j^2 \omega^2 = -\omega^2$$

$$j\omega = j\omega$$

Функции $D(\omega)$ и $\psi(\omega)$ представляют собой модуль и фазу характеристического уравнения.

Что бы система была устойчивой должно быть

$$D(j\omega) = \pm 180^\circ$$

$$D(j\omega) = (-0.126(\omega)^2 + 15.876) + j(-0.0001(\omega)^3 + 0.126(\omega))$$

Далее характеристический полином представляется в виде суммы действительной и мнимой частей:

где: $(-0.126(j\omega)^2 + 15.876)$ Re -действительна.

$j(-0.0001(\omega)^3 + 0.126(\omega))$ Im – мнимое, мах

Система достигает предельной устойчивости (границы колебательного режима), когда вещественная и мнимая части одновременно равны нулю. Из уравнения:

$$\begin{cases} -0.126\omega^2 + 15.876 = 0 \\ -0.001\omega^3 + 0.126\omega = 0 \end{cases}$$

Чтобы система достигла критической фазы $D(j\omega) = \pm 180^\circ$ Должны выполняться условия

$$I\omega = 0$$

$$Re < 0$$

Равенство действительной части нулю:

$$0.126\omega^2 = 15.876$$

$$\omega^2 = \frac{15.876}{0.126} = 126$$

$$\omega = \pm\sqrt{126} \Rightarrow \omega = \pm\sqrt{9 * 14}$$

$$\omega = \pm 3\sqrt{14} \text{ выполняется}$$

Равенство мнимой части нулю:

$$-0.001\omega^3 + 0.126\omega = 0$$

$$\omega(0.001\omega^2 + 0.126) = 0$$

$$\omega_1 = 0 \text{ выполняется}$$

Отсюда: $\omega_1=0$ — тривиальный корень (не учитывается, так как соответствует отсутствию колебаний);

$$\omega_2 \Rightarrow 0.001\omega^2 = 0.126$$

$$\omega^2 = \frac{0.126}{0.001}$$

$$\omega = \sqrt{126}$$

$$\omega_2 \approx 11.23$$

Определение критического периода колебаний:

$$T_{кр} = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T_{кр} = \frac{2\pi}{11.23} = 0.56 \text{ сек}$$

На основе найденных значений $K_{кр}=92.676$ $T_{кр}=0.56$ произведена настройка PID-регулятора двумя наиболее распространёнными методами:

1. Метод Циглера–Николса (второй метод, ZN2) – расчёт параметров регулятора по табличным формулам, используя полученные $K_{кр}$ и $T_{кр}$.

2. Метод Скогестада – более современный подход, ориентированный на сохранение устойчивости и компенсацию запаздывания, также использующий те же критические параметры.

Оба метода реализованы вручную с подстановкой в соответствующие расчетные формулы.

Параметры PID-регулятора, полученные для каждого метода, приведены в таблице ниже.

Таблица 2.4 – Исходные данные

Метод настройки	$K_{кр}$	T_i	T_d	Тип регулятора
Циглер–Николс (ZN2)	55,60	0,28	0.07	PID
Скогестада	9.17	0.5222	1.595	PID

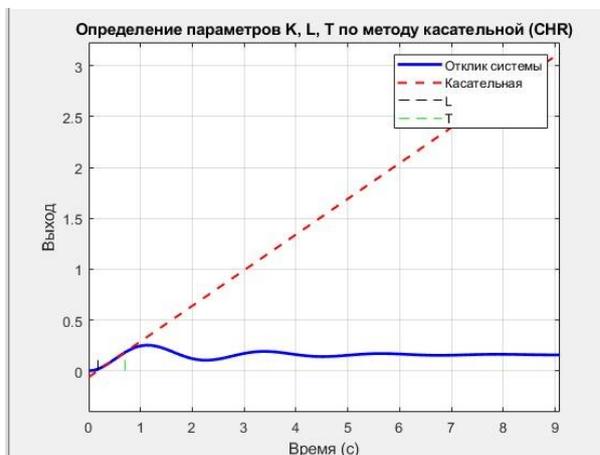


Рисунок 2.13 – Определение параметров по переходному процессу

После получения необходимых параметров можно приступить к эмпирическим методам настройки PID-регулятора.

2.6 Метод Циглера-Никольса (ZN2)

После получения модели объекта управления в виде передаточной функции, следующей задачей является настройка параметров типового регулятора. В данном разделе рассмотрен второй метод Циглера–Николса (ZN2), относящийся к эмпирическим методам настройки PID-регуляторов.

Метод основан на экспериментальном нахождении **критического коэффициента усиления $K_{кр}$** и **критического периода колебаний $T_{кр}$** , при которых замкнутая система с P-регулятором начинает генерировать колебания постоянной амплитуды.

Далее по таблице (таблица Циглера–Николса) определяются параметры PID-регулятора.

Таблица 2.5 – Вычисление параметров регулятора методом ZN2.

Тип регулятора	K_p	T_i	K_d
P	$0.5 K_{кр}=46,33$	-	-
PI	$0.45 K_{кр}=41,70$	$T_{кр}/1.2=0,467$	-
PID	$0.6 K_{кр}=55,60$	$0.5 T_{кр}=0,28$	$0.125 T_{кр}=0,007$

Определение критических параметров.

По экспериментальным данным, полученным при ручной настройке регулятора, определены следующие значения:

Критический коэффициент усиления:

$$K_{кр} = 92.676$$

Критический период:

$$T_{кр} = 0.56$$

Расчёт параметров PID-регулятора

На основании таблицы Циглера–Николса для PID-регулятора:

Пропорциональный коэффициент:

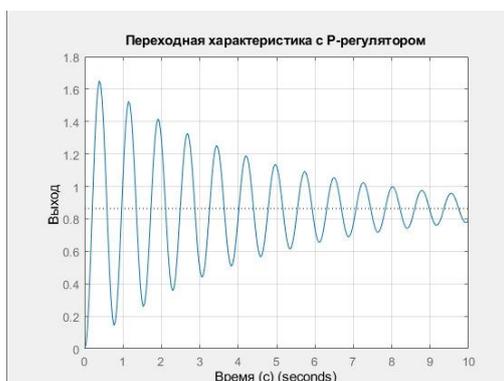


Рисунок 2.14 – Переходная характеристика с P – регулятором

На рисунке 2.14 показан переходной процесс с P-регулятором — наблюдается быстрая реакция, но присутствует значительная установившаяся ошибка.

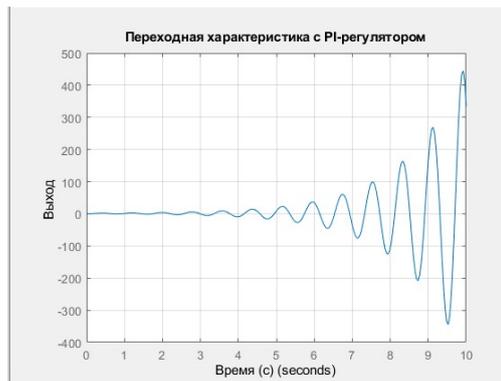


Рисунок 2.15 – Переходная характеристика с PI – регулятором

На рисунке 2.15, PI-регулятор — даёт улучшение по точности, но всё ещё имеет длительное время регулирования.

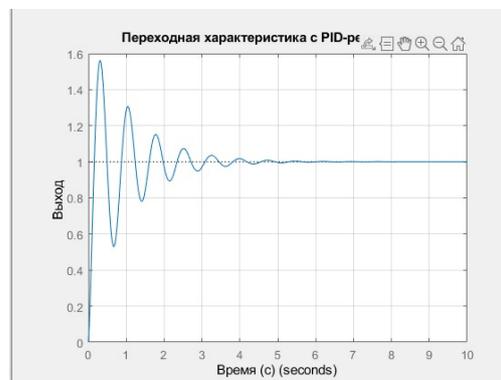


Рисунок 2.16 – Переходная характеристика с PID – регулятором

На рисунке 2.16 представлена реакция с PID-регулятором — наблюдается наиболее оптимальный переходной процесс: быстрое подавление колебаний, умеренное перерегулирование и высокая точность.

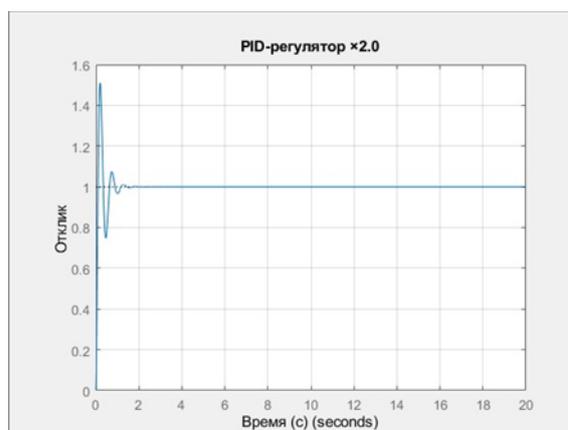


Рисунок 2.17 – Переходная характеристика системы с PID-регулятором, усиленным в 2 раза

На рисунке представлена переходная характеристика замкнутой системы автоматического регулирования при использовании PID-регулятора, параметры которого были масштабированы в 2 раза по сравнению с исходными значениями, полученными методом Циглера–Николса (ZN2).

Особенности динамики:

Быстродействие системы повысилось – наблюдается сокращение времени нарастания и времени достижения установившегося значения.

Перерегулирование увеличилось и составляет около 45%, что указывает на более резкий отклик.

Колебательность усилена – число затухающих колебаний в переходном процессе выросло, что говорит о снижении запаса устойчивости.

Несмотря на усиленные колебания, система успешно достигает устойчивого состояния примерно за 5 секунд.

Увеличение коэффициентов PID-регулятора привело к более быстрому отклику, но ценой снижения устойчивости и роста динамических ошибок. Это подтверждает необходимость тщательного подбора коэффициентов при синтезе регулятора, чтобы обеспечить требуемое качество переходного процесса.

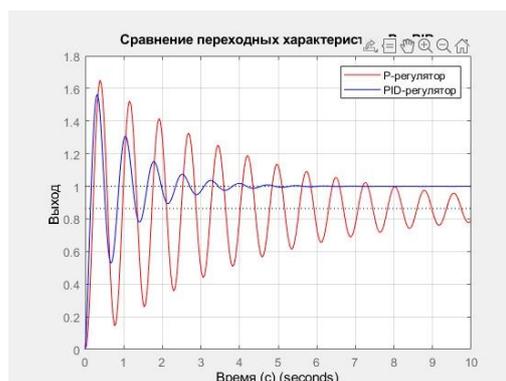


Рисунок 2.18 – Сравнение переходных характеристик

На рисунке 2.18 мы видим, что визуально позволяет сравнить все три переходных характеристики, где видно преимущество PID-регулятора над другими типами.

2.7 Метод Скогестада (SIMC)

Метод Скогестада для настройки PID-регуляторов позволяет быстро и эффективно настраивать коэффициенты параметров регулятора, исходя из динамических характеристик процесса, таких как постоянная времени (T)=0,5222, время запаздывания (L)=0,1778, коэффициента усиления (K)=0,16 и время задержки (θ).

Данный метод предлагает два подхода для контроля системы: Tight control и Smooth control. Эти подходы различаются по своей реакции на изменения в системе и шумы измерений. Агрессивный контроль обеспечивает быструю

реакцию на изменения, но может быть более чувствителен к шумам. Консервативный контроль, напротив, более толерантен к шумам, но реагирует на изменения медленнее. Расчет коэффициентов регулятора осуществляется с помощью эмпирических формул агрессивной настройки регулятора, которая включает в себя условие, что время задержки равно времени запаздывания: $\theta=L=0,1778$. Полученные коэффициенты регулятора занесены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Коэффициенты регулятора методом (SIMC)

Тип регулятора	K_P	T_i	K_d
P	$K = \frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)}$ 9.17	-	-
PI	$K = \frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)}$ 9.17	$T_i = \min (T, 4(L + \theta))$ 0.5222	-
PID	$K = \frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)}$ 9.17	$T_i = \min (T, 4(L + \theta))$ 0.5222	$K_d = \frac{L \times T}{2L + \theta}$ 1.595

На основе полученных коэффициентов закон управления PID-регулятором методом Скогестада (SIMC) имеет вид:

$$u(t) = 9.17 \left[e(t) + \frac{1}{0.5222} \int e(t)dt + 1.595 * \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Подставляем рассчитанные коэффициенты в регулятор для получения переходного процесса. Переходные процессы представлены на рисунках 2.18 – 2.21 соответственно.

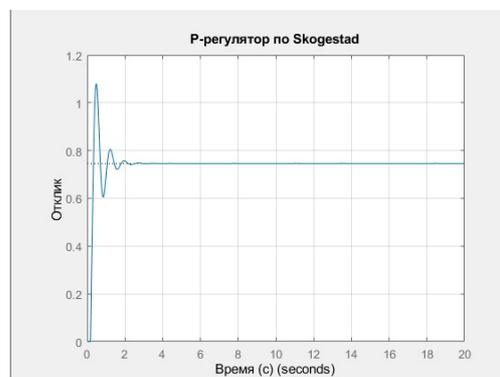


Рисунок 2.19 – Переходная процесс с P – регулятором

P-регулятор, даёт слишком слабое воздействие.

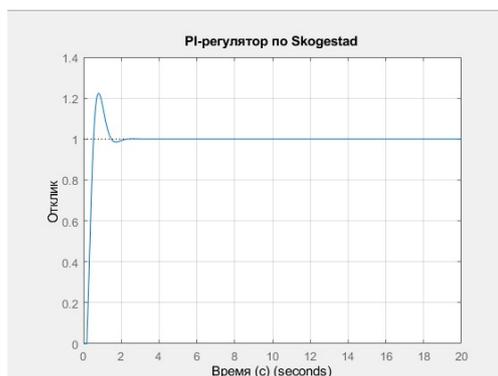


Рисунок 2.20 – Переходная характеристика с PI – регулятором

PI-регулятор компенсирует ошибку, но всё ещё недостаточно быстро.

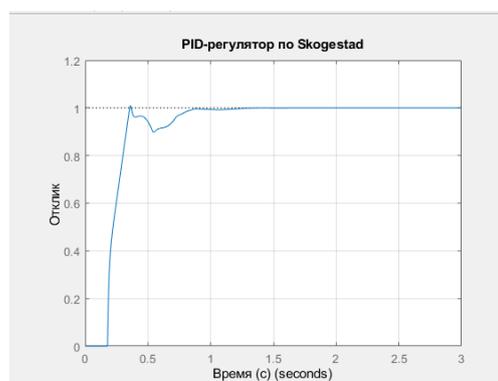


Рисунок 2.21 – Переходная характеристика с PID – регулятором

PID-регулятор демонстрирует наиболее устойчивый и быстрый отклик, без выраженного перерегулирования.

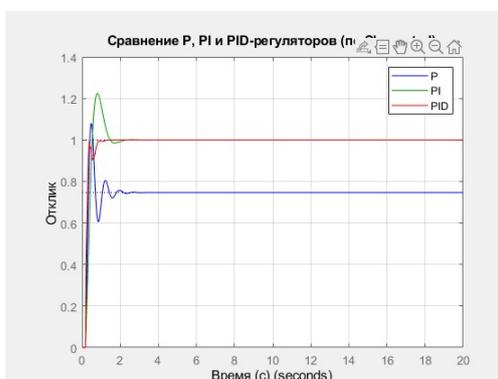


Рисунок 2.22 – Сравнение переходных характеристик

Метод Скогестада показывает высокую устойчивость и низкое перерегулирование даже при изменениях входного сигнала, что важно для систем с колебательными возмущениями, как ветрогенераторы.

2.8 Выбор эмпирического метода

Проведем сравнительный анализ переходных процессов всех методов и системы без регулятора, показанный на рисунке 2.23.

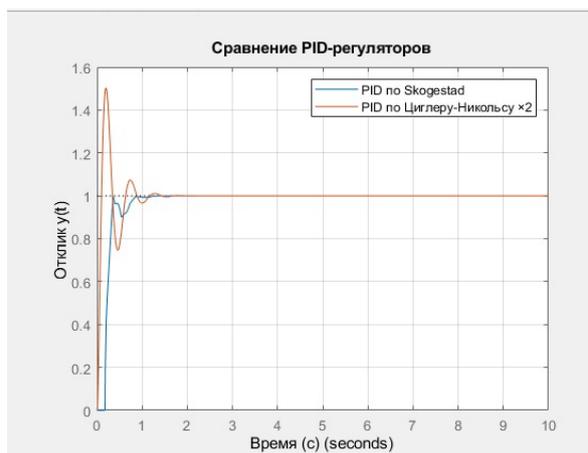


Рисунок 2.23 – Переходные процессы системы при различных методах

После получения переходных характеристик, рассчитаем прямые и косвенные оценки всех эмпирических методов для внесения в общую таблицу. Рассмотрим прямые оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Рассмотрим прямые оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором

Основные	№	Прямые оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN2	Метод SIMC
	1	Время регулирования (Tset), сек	6.7	4.5	0.8
	2	Перерегулирование (Pov), %	50.0	45.0	20.0
	3	Число колебаний (M)	6.0	7.0	3.0
	4	Колебательность (μ)	0.7	0.3	0
	5	Частота колебаний (wosc)	1.3	1.7	2.1
	6	Установившаяся ошибка (ess)	0.00012	5e-05	1e-05

Дополнительные	7	Время достижения первого максимума (Tr), сек	0.7	0.55	0.4
	8	Время нарастания (TR), сек	0.3	0.28	0.22
	9	Декремент затухания (λ)	0.5	0.6	0.9

Рассмотрим косвенные оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором в таблице 2.8

Таблица 2.8 – Косвенные оценки качества системы при различных методах

№	Косвенные оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN2	Метод SIMC
1	Запасы устойчивости по амплитуде	3.2	6.8	8.1
2	Запасы устойчивости по фазе (град)	30.0	47.0	56.0
3	Степень устойчивости	1.3	3.1	3.9

На основе прямых оценок качества переходного процесса, представленных в таблице 2.7, установлено, что наилучшие динамические характеристики системы автоматического регулирования наблюдаются при использовании PID-регулятора, настроенного по методу Скогестада (SIMC).

В частности, по сравнению с методом Циглера–Николса (ZN2), метод SIMC обеспечивает:

- меньшее время регулирования и нарастания,
- отсутствие существенного перерегулирования,
- более плавный и устойчивый выход на установившийся режим.

Это указывает на высокую степень демпфирования системы, снижение колебательности и устойчивое поведение при ступенчатом воздействии. Также наблюдается минимальная установившаяся ошибка, что подтверждает повышенную точность регулирования.

Метод Скогестада (SIMC) рекомендуется как более эффективный для синтеза типового PID-регулятора данной системы. Он позволяет достичь оптимального баланса между быстродействием, устойчивостью и точностью регулирования, что особенно актуально при управлении ветрогенераторными установками с переменной нагрузкой.

3 Синтез системы управления углом атаки лопастей ветрогенераторной установки с использованием программного логического контроллера

В данной части дипломном проекте разработан программный модуль, обеспечивающий автоматическое управление положением лопастей в зависимости от скорости ветра. Система построена на основе принципа обратной связи и использует данные с аналоговых датчиков, программную обработку на языке SCL и передачу сигнала на исполнительные механизмы. Архитектура реализована в среде TIA Portal, визуализация – в WinCC.

3.1 Разработка алгоритма

Алгоритм управления ветрогенератором реализуется с использованием среды программирования TIA Portal, где с помощью функциональных блоков осуществляется обработка аналоговых сигналов с датчиков. В основе работы системы лежит преобразование физических параметров окружающей среды (скорости ветра, направления, угла наклона лопастей и др.) в цифровые значения, пригодные для анализа и управления.

Основными задачами алгоритма являются:

- считывание аналоговых сигналов с датчиков;
- масштабирование входных сигналов в рабочий диапазон;
- передача обработанных значений в регуляторы и исполнительные механизмы;
- визуализация данных для оператора.

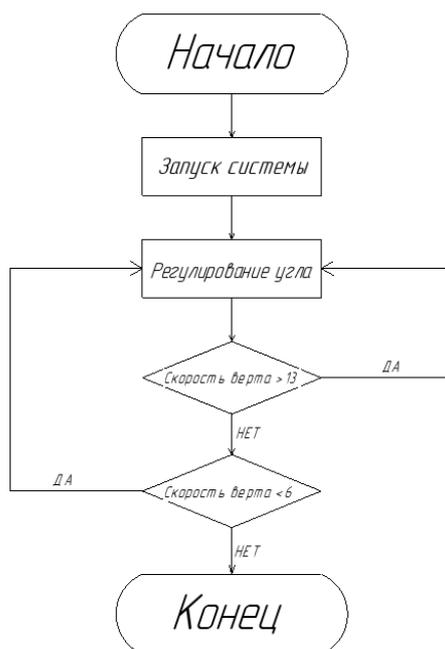


Рисунок 3.1 – Блок схема алгоритма

3.1.1 Логика запуска и остановка системы

Основой функционирования ветрогенераторной установки является корректная логика её запуска и останова. Управление осуществляется с помощью кнопок «Пуск» и «Стоп». При активации кнопки пуска система инициирует запуск генератора, а таймер фиксирует факт включения, обеспечивая фильтрацию ложных срабатываний.

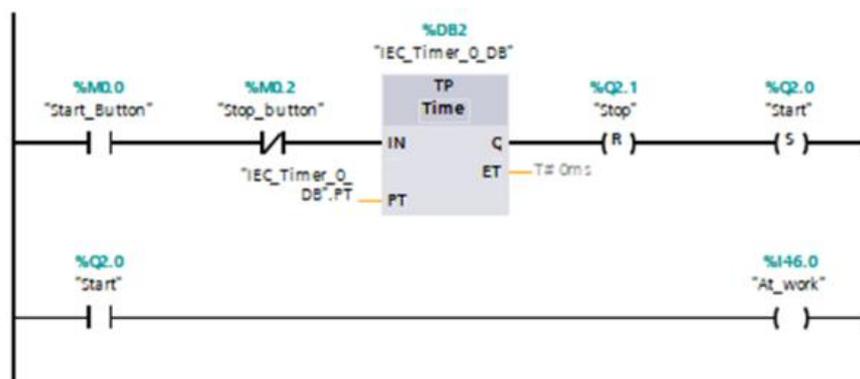


Рисунок 3.2 – Старт включение системы, таймер для фиксации нажатия

На рисунке 3.2 показана логическая схема старта системы. При нажатии кнопки «Start» активируется таймер, после чего подаётся сигнал на включение системы. Это предотвращает срабатывание от кратковременных импульсов.

Кнопка «Stop» реализована как аварийная и не требует проверки состояния кнопки «Пуск». Это позволяет мгновенно прекратить работу в случае возникновения аварийной ситуации.

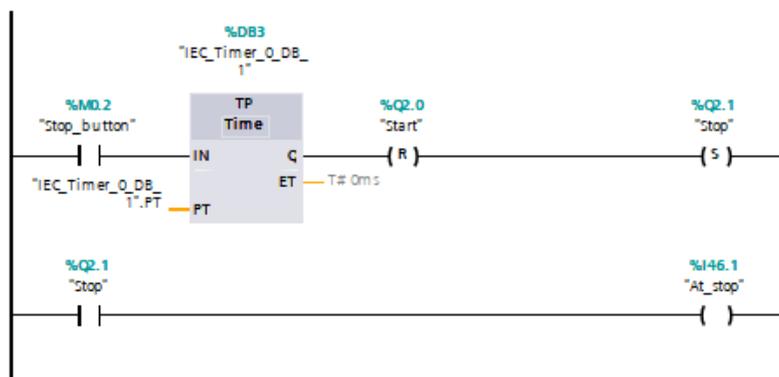


Рисунок 3.3 – Стоп: аварийная кнопка, не зависящая от состояния пуска

3.1.2 Алгоритм регулирования угла лопастей

Регулирование угла наклона лопастей ветрогенератора осуществляется в зависимости от текущей скорости ветра. Для реализации алгоритма используется язык программирования SCL. Алгоритм анализирует значение скорости,

поступающее от анемометра, и на основании заданных условий выбирает оптимальный угол атаки лопастей.

На рисунке 3.4 представлен фрагмент кода на SCL, реализующий основную логику регулирования. Программа обеспечивает плавную адаптацию лопастей к изменению параметров воздушного потока, минимизируя нагрузку на систему.

```

1 IF "Mode_button" = FALSE THEN
2   IF "Wind_Speed_Value" >= 0 AND "Wind_Speed_Value" <= 3 THEN
3     "Angle_Set" := 90; // Стоп (флюгерное положение)
4   ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 4 AND "Wind_Speed_Value" <= 6 THEN
5     "Angle_Set" := 5; // Запуск, малая мощность
6   ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 6 AND "Wind_Speed_Value" <= 8 THEN
7     "Angle_Set" := 2; // Работа в режиме роста мощности
8   ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 8 AND "Wind_Speed_Value" <= 12 THEN
9     "Angle_Set" := 0; // Оптимальный угол, макс. коэффициент Cp
10  ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 12 AND "Wind_Speed_Value" <= 14 THEN
11    "Angle_Set" := 2; // Начало ограничения мощности
12  ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 14 AND "Wind_Speed_Value" <= 20 THEN
13    "Angle_Set" := 5 + ("Wind_Speed_Value" - 14) * 0.5; // Постепенное ограничение мощности
14  ELSIF "Wind_Speed_Value" >= 20 AND "Wind_Speed_Value" <= 25 THEN
15    "Angle_Set" := 15 + ("Wind_Speed_Value" - 20) * 0.5; // Сильный ветер, защита
16  ELSE
17    "Angle_Set" := 90; // Полный стоп при сильном ветре

```

Рисунок 3.4 – SCL-программа для регулирования угла наклона лопастей

Если система активна (установлен флаг «At_work»), вычисленный угол передается на аналоговый выход контроллера. Управляющий сигнал масштабируется и записывается в регистр вывода.

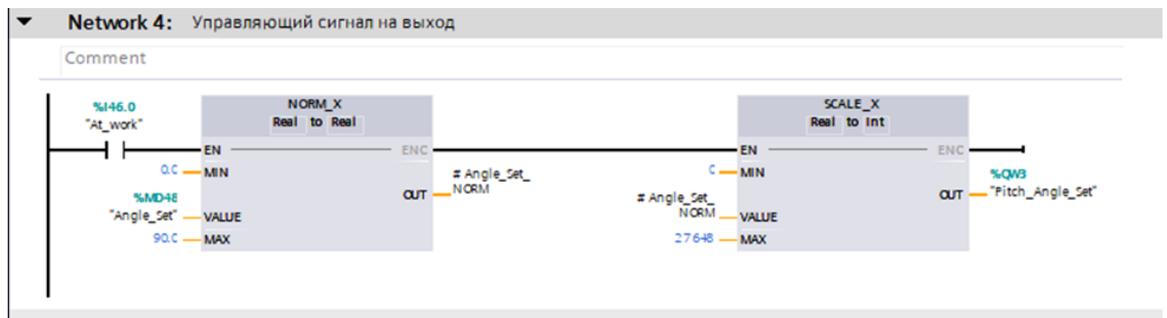


Рисунок 3.5 – Расчёт управляющего сигнала и его передача на выход

Для симуляции используется замкнутая цепочка, в которой выходной сигнал возвращается на вход, имитируя обратную связь системы.

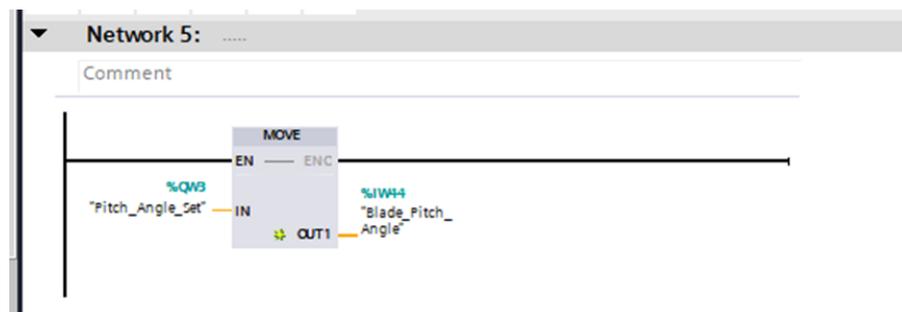


Рисунок 3.6 – Симуляция: передача сигнала с выхода на вход

3.1.3 Обработка аналоговых сигналов от датчиков

Для корректной работы системы необходимо обеспечить точную обработку аналоговых сигналов от внешних датчиков. В данной установке используются три ключевых аналоговых датчика:

- анемометр для измерения скорости ветра;
- датчик направления ветра;
- датчик угла наклона лопастей.

Сигнал с каждого датчика поступает на аналоговый вход контроллера и масштабируется в соответствующий диапазон значений, пригодный для обработки в логике ПЛК. Масштабирование производится с помощью стандартных блоков TIA Portal.

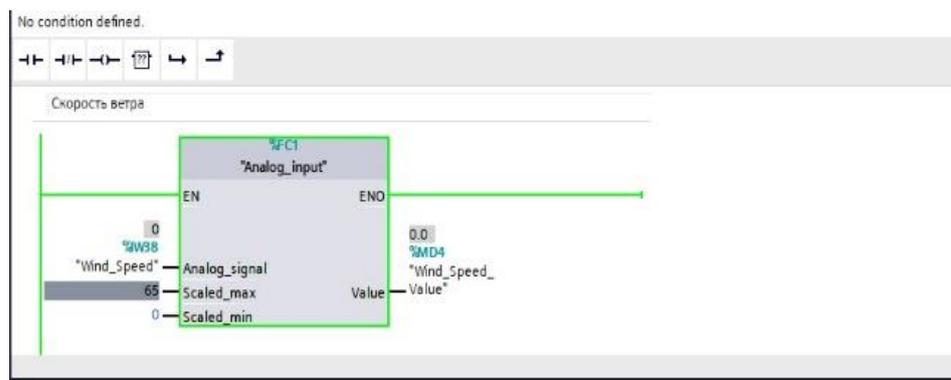


Рисунок 3.7 – Преобразование аналогового сигнала скорости ветра

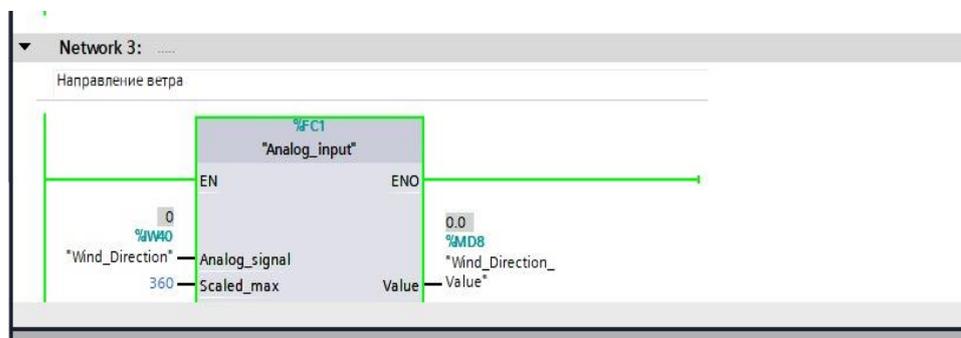


Рисунок 3.8 – Преобразование аналогового сигнала направления ветра

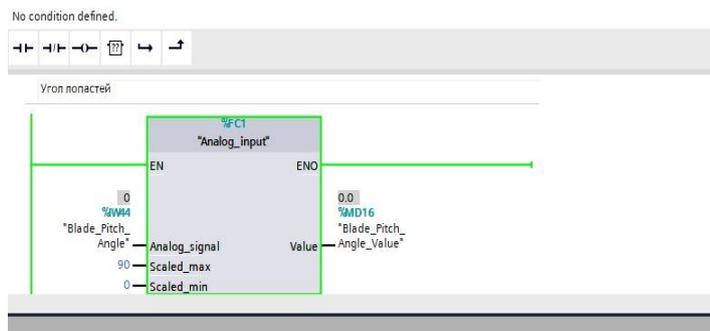


Рисунок 3.9 – Преобразование аналогового сигнала угла наклона лопастей

3.1.4 Система визуализации и операторский интерфейс

Для обеспечения взаимодействия между оператором и системой управления используется HMI-панель, созданная в среде WinCC. Интерфейс позволяет в режиме реального времени отслеживать ключевые параметры работы установки, включая: – скорость ветра; – направление ветра; – угол наклона лопастей; – частоту и ток генератора; – состояние системы (в работе / авария / ожидание).

Оператор имеет доступ к ручному и автоматическому режимам управления, возможностью задания угла наклона вручную, и запуску остановки установки через панель управления.

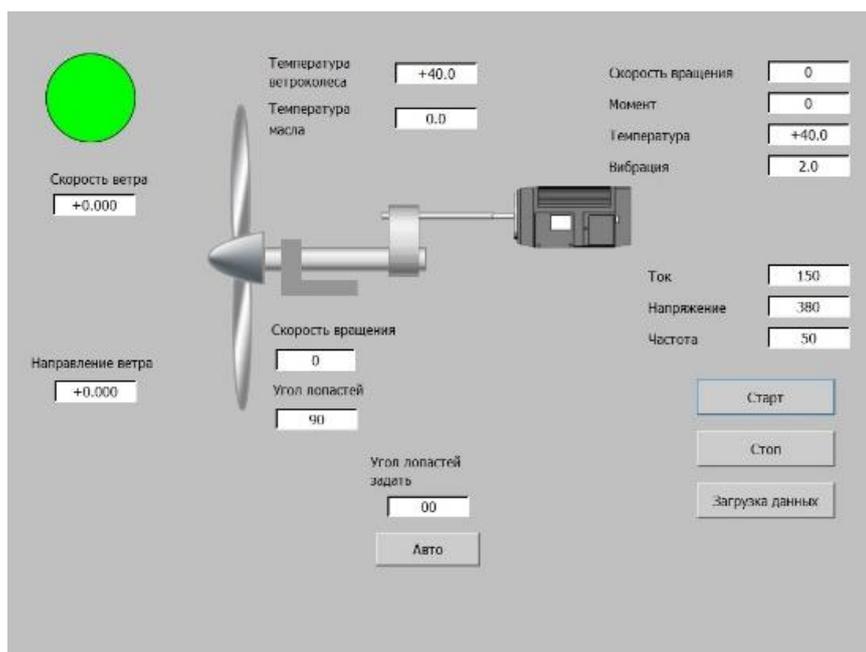


Рисунок 3.10 – Графический интерфейс оператора в среде WinCC

В рамках третьей главы была разработана программная логика работы ветрогенератора, включающая запуск, обработку данных с датчиков, вычисление и передачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Визуализация работы установки обеспечивает удобство мониторинга и управления системой. Реализация выполнена в соответствии с промышленными стандартами и может быть использована как основа для дальнейшей модернизации или масштабирования системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте была разработана система автоматического регулирования ветрогенератора с адаптацией к изменяющимся условиям окружающей среды. Целью исследования являлось повышение эффективности, надёжности и устойчивости функционирования ветрогенераторной установки за счёт внедрения программных методов управления, основанных на анализе параметров ветрового потока.

В первой части работы был проведён анализ объекта автоматизации – ветрогенераторной установки, её конструктивных особенностей и принципов работы. Определены ключевые параметры, влияющие на производительность: скорость и направление ветра, угловое положение лопастей, температура и вибрации генератора. Эти параметры легли в основу системы управления.

На основании разработанной функциональной схемы был синтезирован программный контур управления углом наклона лопастей. Для его реализации использовались возможности среды программирования TIA Portal, в том числе язык SCL, структурные блоки и инструменты обработки аналоговых сигналов. Алгоритм регулирования учитывает текущую скорость ветра и позволяет адаптировать положение лопастей для достижения наилучших показателей генерации электроэнергии и защиты оборудования.

Дополнительно была разработана визуализация в среде WinCC, обеспечивающая оператору доступ к ключевым данным в режиме реального времени. Реализованы ручной и автоматический режимы, а также средства аварийного останова, что делает систему удобной и безопасной в эксплуатации.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что предложенная система управления может быть реализована на практике и адаптирована для различных моделей ветрогенераторов. Повышение эффективности выработки энергии, снижение износа оборудования и обеспечение его безопасной работы подтверждают актуальность выбранного направления.

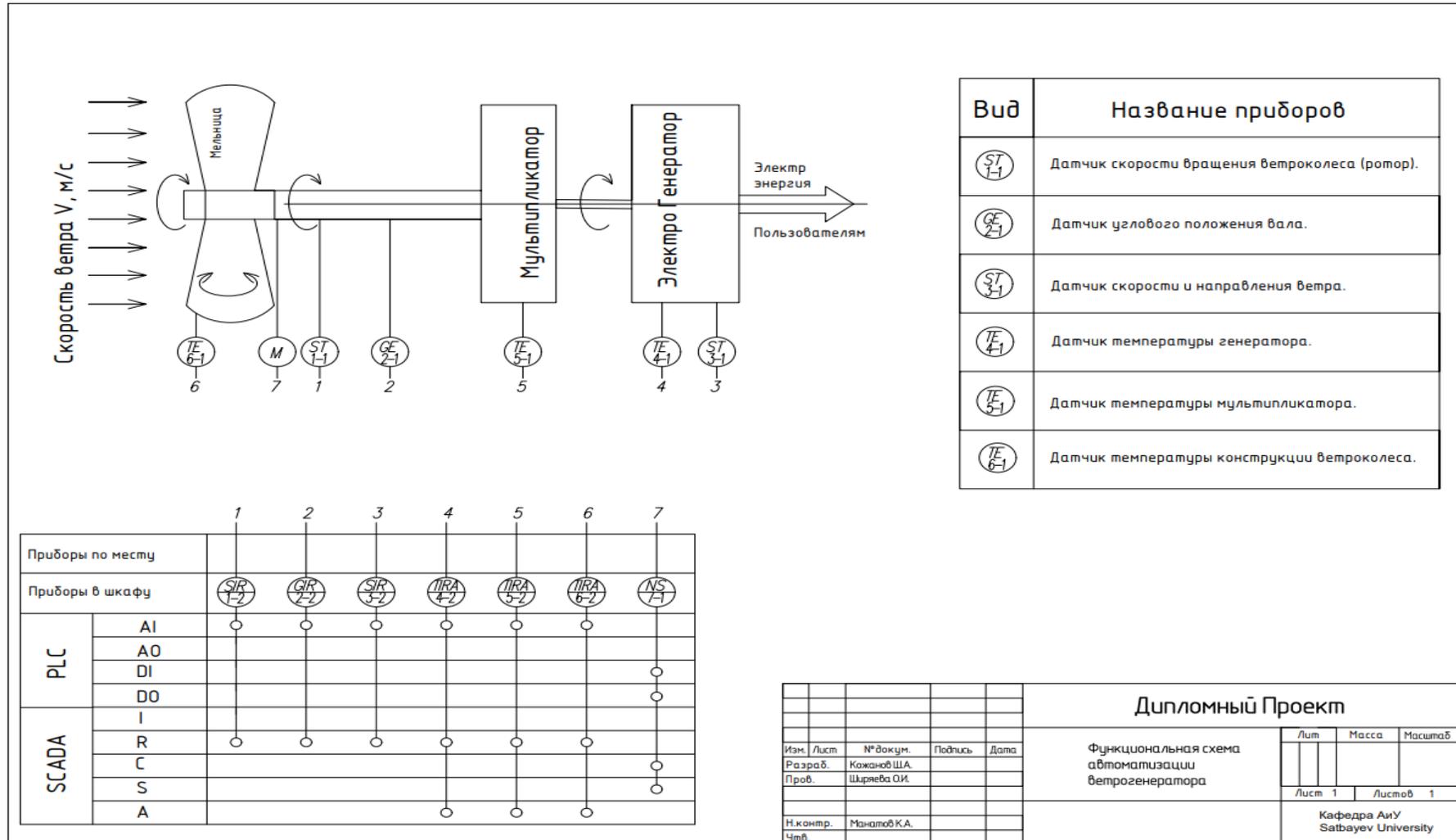
Поставленные в работе задачи были успешно решены, и цель проекта – создание адаптивной системы автоматического регулирования для ветрогенератора – достигнута в полном объёме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Siemens AG. SIMATIC TIA Portal V17. Getting Started. – Германия: Siemens, 2022.
- 2 Siemens AG. SIMATIC STEP 7 Basic/Professional V17. Manual. – Siemens, 2021.
- 3 Кузнецов Д.С. Программируемые логические контроллеры Siemens S7-1200. – СПб.: Питер, 2023.
- 4 Жуков А.А. SCADA-системы: основы построения и применения. – М.: ДМК Пресс, 2021.
- 5 Исаев И.А. SCADA и HMI-системы в промышленной автоматике. – СПб.: Питер, 2023.
- 6 Артемьев А.С. Программирование ПЛК в TIA Portal: практическое руководство. – М.: Лань, 2022.
- 7 Смагин В.Н. Автоматизация и управление технологическими процессами. – М.: Академия, 2020.
- 8 Дьяков В.Ю. Информационные технологии в системах автоматизации. – М.: Форум, 2021.
- 9 Приложение к паспорту контроллера Siemens S7-1200. – Siemens, 2021.
- 10 Siemens Industry Online Support. [Электронный ресурс] – <https://support.industry.siemens.com> – (дата обращения: 10.05.2025)
- 11 Siemens. TIA Portal documentation. [Электронный ресурс] – <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/tia-portal.html> – (дата обращения: 10.05.2025)
- 12 Чепурнов Д.А. Электроснабжение и автоматизация ветроэнергетических установок. – Екатеринбург: УрФУ, 2021.
- 13 Козлов А.П. Автоматизация ветроустановок: учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 2020.
- 14 Kaldellis J.K., Zafirakis D. Wind energy: recent advances and future perspectives. – Renewable Energy, 2020.
- 15 Мишин Д.А. Ветроэнергетические установки: принципы и эксплуатация. – М.: Лань, 2022.
- 16 Хасанова С.Н. Адаптивные системы автоматического управления. – Алматы: Эверо, 2021.
- 17 Романов С.Е. Микропроцессорные системы управления. – М.: Инфра-М, 2022.
- 18 Министерство энергетики РК. Энергетическая стратегия Казахстана до 2030 года. – Нур-Султан, 2021.
- 19 Ackermann T. Wind Power in Power Systems. – 2nd ed. – Wiley, 2012. (классика – допустимо)
- 20 Электронный ресурс: <https://energybase.kz/articles/wind-energy-kz> (Анализ ветроэнергетики в Казахстане)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Функциональная схема автоматизации системы регулирования ветрогенератора



ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект
Кожанова Шахрияра Айдаровича
6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема: Разработка системы управления реверсивным конвейером для отгрузки и погрузки палет роботизированного склада

Перед студентом ставилась задача разработки системы автоматического регулирования параметров ветрогенератора, адаптирующейся к изменяющимся условиям окружающей среды.

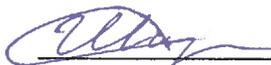
В рамках выполнения дипломного проекта был проведён анализ технологического процесса работы ветрогенератора, разработана функциональная схема автоматизации. На основе математического моделирования и идентификации объекта управления с использованием инструментария MATLAB построена модель системы.

В процессе синтеза регулятора применялись методы Циглера-Никольса и Скогестада. Также была разработана логика управления углом наклона лопастей с последующей реализацией в ПИА Portal и созданием SCADA-системы.

Проект отличается системным подходом, грамотным применением теоретических знаний и практических навыков, а также полным соответствием требованиям к дипломным проектам по специальности.

Заключение: дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам по направлению подготовки 6B07103 – «Автоматизация и роботизация». Дипломант Кожанов Шахрияр Айдарович заслуживает допуска к защите.

Научный руководитель
ассоциированный профессор. канд. техн. наук.

 Ширяева О.И.
(подпись)

«5» июня 2025 г.

**Протокол анализа Отчета подобия
заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения**

Заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения заявляет, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Кожанов Шахрияр Айдарович

Тип работы: Дипломный проект

Название работы: Разработка системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среды

Научный руководитель: Ольга Ширяева

Коэффициент Подобия 1: 0.5

Коэффициент Подобия 2: 0.2

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование: Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.5 и Коэффициент подобия 2: 0.2. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«16» июня 2025 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Кожанова Шахрияр Айдаровича
6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы регулирования ветрогенераторов с адаптацией к
изменяющимся условиям среды

Выполнено:

- а) презентация на 30 слайдах
- б) пояснительная записка на 65 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В дипломном проекте, представленном на рецензировании, рассмотрена актуальная тема разработки системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среды. Данная тема является актуальной.

Дипломный проект состоит из введения, трёх разделов и заключения.

В первом разделе приведено описание системы управления ветрогенераторной установкой, определены точки контроля, выбраны датчики, исполнительный механизм, ПЛК и разработана функциональная схема автоматизации объекта.

Во втором разделе получены результаты моделирования, анализа и синтеза системы автоматического регулирования частотой вращения ротора: разработана математическая модель объекта управления путем структурной и параметрической идентификации с помощью MatLAB Identification Toolbox, а также были получены математические модели регулирующего органа, исполнительного механизма и датчика. На основе полученной модели показан полный анализ системы, выполнена проверка на устойчивость, определены прямые и косвенные оценки качества для выявления основных требований для регулятора. В ходе синтеза регулятора были использованы эмпирические методы Циглера-Никольса 2 и метод Скогестада.

В третьем разделе предоставлена техническая реализация логического управления углом наклона лопастей, с адаптацией к изменяющимся условиям среды, в среде ПИА Portal, также разработана SCADA-система.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Замечания:

1. Не получены результаты моделирования замкнутой САР с регулятором с заданным сигналом (уставкой).
2. Необходимо более полно представлять блок-схему алгоритмов ПЛК.

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «B %» (45 %), а студент Кожанов Шахрияр Айдарович присвоения академической степени бакалавра по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

зав. кафедрой "АиУ"
АИЭС им. Г. Дауксева
доктор PhD
Абжанова Л. К.
дата: 16.06.20

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Кожанов Шахрияр Айдарович

Тип работы: Дипломный проект

Название работы: Разработка системы автоматического регулирования ветрогенераторов с адаптацией к изменяющимся условиям среды

Научный руководитель: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент Подобия 1: 0.5

Коэффициент Подобия 2: 0.2

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.5 и Коэффициент подобия 2: 0.2. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«16» июня 2025 г.
Дата


Подпись Научного руководителя