МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Ипмагамбетов Амир Ерболатұлы

Разработка системы автоматического регулирования силовой турбиной

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Специальность 5В070200 – Автоматизация и управление

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления



дипломный проект

На тему: "Разработка системы автоматического регулирования силовой турбиной"

по специальности: 5В070200 - Автоматизация и управление

Выполнил

Ипмагамбетов А. Е.

Рецензент доктор PhD руководитель ЦКиТТвОАиМ _____Порубов Д.А (подпись) "_____ мая 2022 г. Научный руководитель доктор PhD, синь р дектор

Ин - Кулакова Е. А. (подпись) "<u>6</u>" мая 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

5В070200 - Автоматизация и управление

ини конструктически кафедрой АиУ Автории Кафедрой АиУ Автории Кафедрой АиУ ассоц. профессор Алдияров Н. У. 1000 - 1

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Ипмагамбетову А. Е.

Тема: <u>"Разработка системы автоматического регулирования силовой</u> турбиной".

Утвержден приказом ректора Университета № __от "___2021 г.

Срок сдачи законченной работы: "___ мая 2022 г.

Исходные данные дипломного проекта: <u>технологическая схема</u> турбоагрегата.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломного проекта: <u>а) анализ технологического</u> <u>процесса; б) разработка функциональной схемы автоматизации и</u> <u>структурный схемы системы автоматического регулирования; в) решение</u> задач анализа и синтеза системы. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): <u>принципиальные схемы</u> <u>турбины и генератора, функциональная схема автоматизации турбоагрегата.</u> Рекомендуемая основная литература: Р. Kundur. Power System Stability and Control 1994; Oscillations and Power System Stabilizers – PowerWorld Corporation 2001 S. First St, Suite 203 Champaign, IL 61820; М. Гринберг. Разработка вебприложений с использованием Flask на языке Python, 2018.

ГРАФИК

подготовки дипломного проекта

		Примечание
Наименования	Сроки представления	
разделов, перечень	научному руководителю и	
разрабатываемых	консультантам	
вопросов		
Технологический	02.03.2022 г.	
раздел		
Специальный раздел	15.04.2022 г.	Υ.

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись	
Технологический раздел	PhD, синьор лектор Кулакова Е. А.	P3. P2. 225.	Oh	
Специальный раздел	PhD, синьор лектор Кулакова Е. А.	28.04.221.	391	
Нормоконтролер	Ассистент-профессор Сарсенбаев Н. С.	12.05 2012	A	

Научный руководитель _____

SAN

Кулакова Е. А.

Задание принял к исполнению обучающийся _____ Ипмагамбетов А. Е.

"*Об*" <u>*О1* 2022 г.</u>

Дата

АНДАТПА

Бұл дипломдық жоба турбина мен генераторды автоматты басқару процесін сипаттайды.

Басында процестердің құрылымдық және функционалдық схемалары, сондай-ақ AVR (Automatic Voltage Regulator) және PSS (Power System Stabilizer) кернеу реттегіші арқылы реттеудің әртүрлі әдістері қарастырылады.

Алынған АТС параметрлері, тұрақтылықты зерттеу және реттеу әдістерін салыстыру есептелетін болады.

Ecentey мен модельдеудің негізгі құралы MPI, Control кітапханалары бар Python, Matplotlib графиктерін шығару үшін, сонымен қатар объектілердің Функционалды және құрылымдық схемаларын құру үшін Drawio болады.

Жобаның түпкі мақсаты-Flask шеңберін қолдана отырып, жүйелік тұрақтандырғышты синтездеу және модельдеу үшін веб-қосымшаны жасау.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте описан процесс автоматического регулирования турбины и генератора.

В начале будут рассмотрены структурные и функциональные схемы процессов, а также различные методы регулирования при помощи регулятора напряжения AVR (Automatic Voltage Regulator) и PSS (Power System Stabilizer).

Будут рассчитаны параметры полученных САР, исследование устойчивости и сравнение методов регулирования.

Основным инструментом расчетов и моделирования будет Python с библиотеками NumPy, Control, для вывода графиков Matplotlib, а также Drawio для построения функциональных и структурных схем объектов.

Конечной целью проекта является разработка веб-приложения для синтеза и моделирования стабилизатора энергосистемы с использованием фреймворка Flask.

ABSTRACT

This thesis project describes the process of automatic regulation of the turbine and generator.

At the beginning, structural and functional schemes of processes will be considered, as well as various methods of regulation using the AVR (Automatic Voltage Regulator) and PSS (Power System Stabilizer) voltage regulator.

The parameters of the obtained ATS, the study of stability and the comparison of control methods will be calculated.

The main tool for calculations and modeling will be Python with Mpi, Control libraries for displaying Matplotlib graphs, as well as Drawio for constructing functional and structural diagrams of objects.

The ultimate goal of the project is to develop a web application for the synthesis and simulation of a power system stabilizer using the Flask framework.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Технологическая часть	10
1.1 Описание объекта управления	10
1.2 Система автоматического регулирования паровой турбины	11
1.3 Система автоматического регулирования генератора	13
1.4 Тиристорная система возбуждения с регулированием напряжения	14
1.5 Регулятор PSS1A	15
1.6 Функциональная схема автоматизации	16
2 Расчетная часть	19
2.1 Методы оптимизации регулирования турбины	19
2.2 Моделирование и сравнение оптимизаторов	23
2.3 Расчет параметров генератора	26
2.4 Синтез стабилизатора энергосистемы	32
2.5 Краткий обзор веб-приложения	36
Заключение	40
Список литературы	41

введение

Турбоагрегат, состоящий из паровой турбины, приводящей генератор и приводимой паром с котлоагрегата, является одним из самых значимых объектов оборудования электростанций, а также самым популярным способом добычи электроэнергии - 39.8% от общей генерации электричества в мире. Это объясняется неплохим КПД - до 60%, широким диапазоном частот и длинным сроком службы паровых турбин. Несмотря на это, паровая турбина не всегда являлась таковой и до сих пор имеет недостатки, связанные с высокой стоимостью самой турбины и её обслуживания, а также вредными выбросами в атмосферу. На протяжении последних веков конструкция турбины постоянно совершенствовалась чтобы из ненадежной и неэффективной машины стать стабильным и продуктивным объектом промышленности.

Работы по совершенствованию процесса выработки электроэнергии с применением паровой турбины и генератора ведутся и сегодня. С точки зрения управления систем автоматизации последним значимым нововведением можно считать связку из регулятора напряжения со стабилизатором энергосистемы. Современные САР угловой скорости турбины хоть и являются точными и быстродействующими, однако любые перепады угловой скорости вала и как следствие момента силы создают неблагоприятные условия эксплуатации генератора. Исследования последних лет позволили создать несколько методов, комбинации которых позволяют частично решить вызванные проблемы стабильности систем. На настоящий момент данный технологии все еще остаются малоизученными, однако их применение на ТЭЦ является лишь вопросом времени.

Целью дипломного проекта является разработка системы автоматического регулирования паровой турбины.

Основными задачами разработки САР турбоагрегата являются:

- описание классических систем управления турбины и генератора

- синтез регулятора и его доработка с использованием современных методов стабилизации

- разработка функциональной схемы автоматизации с использованием различных методов стабилизации

- моделирование и расчеты с использованием Python для сравнения методов регулирования, применение библиотеки control.matlab.

1 Технологическая часть

1.1 Описание объекта управления

Турбоагрегат представляет собой две локальные системы управления, состоящие из паровой турбины и генератора электроэнергии.

Паровая турбина предназначена для преобразования кинетической энергии пара, полученной из котлоагрегата, во вращательный момент вала. Она состоит из неподвижного (статора) и вращательного (ротора) элементов. Лопатки ротора являются частью вала турбины и приходят в движение за счет энергии пара диски из таких лопаток образуют секции, между которыми в противоположном направлении находятся лопатки статора являющиеся частью корпуса турбины, они предназначены для сжатия пара что приводит к увеличению давления и скорости, но уменьшению объема пара. На рисунке 1.1 представлено схематическое изображение турбины.



Рисунок 1.1 – Паровая турбина в разрезе

Генератор состоит из системы возбуждения и синхронного двигателя. Он преобразует вращательный момент турбины в выработку напряжения на обмотках вала двигателя – роторе, что приводит к появлению вращающегося магнитного поля, которое возбуждает обмотки статора, таким образом появляется электрический ток. Другими словами – обратный принцип работы электрического двигателя. На рисунке 1.2 представлено схематическое изображение генератора.



Рисунок 1.2 – Генератор в разрезе

1.2 Система автоматического регулирования паровой турбины

Как было описано выше, паровая турбина преобразует энергию пара во вращение. САР в свою очередь должна обеспечивать постоянную угловую скорость выходного вала для корректной работы генератора.

Управление турбиной необходимо для медленного запуска в целях предотвращения повреждений, а также точного регулирования скорости в соответствии с изменением нагрузки генератора.

На рисунке 1.3 показана система регулирования прямого действия, где входом и выходом является заданная и текущая угловые скорости соответственно, а также:

- С – связь вала турбины и регулятора

- ЧЭ – чувствительный элемент, в нашем случае центробежный регулятор

- ИМ – исполнительный механизм – рычаг

- РО – регулирующий орган – задвижка



Рисунок 1.3 – Структурная схема САР паровой турбины

Однако существуют и системы непрямого действия, как на рисунке 1.4



Рисунок 1.4 – Система непрямого действия

Системой прямого действия называют САР в которой регулирующий орган управляется непосредственно чувствительным элементов, основным преимуществом таких систем является их простота и надежность, однако точность работы таких систем снижается по мере увеличения мощности (в данном случае давления пара). Это объясняется увеличение требуемых усилий для перемещения регулирующего органа, поэтому данный метод регулирования подходит для систем с небольшой мощностью регулируемой величины.

В системах непрямого действия происходит усиление сигнала ошибки за счет внешних источников энергии, питающих усилительные и исполнительные элементы системы. Благодаря этому системы непрямого действия позволяют использовать маломощные, но точные измерительные приборы, что приводит к сильному увеличению точности регулирования.

ПИД-регулятор является важнейшим элементом САР, он стал стандартным инструментом, когда в 1940-х годах появилось управление технологическими процессами. Сегодня в АСУ ТП использование контуров управления ПИД достигло 95%.

Система ПИД-регулирования предназначена для управления основным потоком пара к паровой турбине во всех рабочих условиях с помощью управляющего оборудования, состоящего из регулятора, дроссельной заслонки турбины, впускных или выпускных регулирующих клапанов. Оптимальная производительность этих компонентов на протяжении всего срока службы паровых турбин улучшает жизненный цикл системы, а также экономическую эффективность. Оптимальная производительность, с другой стороны, еще более важна, чем раньше, поскольку предыдущие турбины работают сверх их первоначальной ожидаемой продолжительности жизни. После развития технологии цифровой обработки данных системы управления турбинами также заменяются цифровыми элементами управления, что обеспечивает более высокую скорость обработки, меньшую стоимость и компактность. Затем система ПИД-регулирования объединяется с логикой, последовательными функциями, селекторами и простыми функциональными блоками для создания более эффективной системы автоматизации, которая используется в энергетике,

Структурная схема, показанная на рисунке 1.4, состоит из контроллера, исполнительного механизма, турбины и технологического измерительного оборудования. В установившемся состоянии желаемый входной сигнал и значение ошибки являются входными данными контроллера. Контроллер сравнивает желаемый ввод и функцию ошибки и разрабатывает управляемую переменную для подачи на исполнительный механизм. Привод управляет регулирующим клапаном подачи пара для регулирования частоты вращения турбины. ПИД-регулятор будет оптимизирован двумя способами: методом роя частиц и генетическим алгоритмом, результаты оптимизаций и их сравнение будет рассмотрено в расчетной части.

1.3 Система автоматического регулирования генератора

В классических САР генераторов регулируемой величиной как правило является напряжение на выходе ротора, однако для исследования стабильности синхронных генераторов будет рассмотрена система автоматического регулирования угла отклонения ротора – Δδ. В свою очередь, угол смещения ротора зависит от механического и электрического моментов. Разница этих крутящих моментов дает нам ускоряющий момент:

$$T_a = T_m - T_e$$

Значение изменения этого угла получается путем интегрирования изменения частоты с учетом номинальной частоты ω_0 . Изменение частоты получается воздействием ускоряющего момента на инерционное звено ротора. Таким образом, получаем структурную схему, показанную на рисунке 1.5 и состоящую из прямой связи с ротором, звеном интегрирования и двумя обратными связями, характеризующими компоненты демпфирования и синхронизации момента.



 K_{S} – коэффициент синхронизирующего момента; K_{D} – коэффициент демпфирующего момента; H – постоянная инерции статора; $\Delta \omega_{r}$ – изменение угловой скорости; $\Delta \delta$ – отклонение (смещение) угла ротора

Рисунок 1.5 – Структурная схема САР генератора без стабилизации

В связи с большими мощностями моментов и напряжений для стабилизации нужно воспользоваться регулированием непрямого действия на систему возбуждения генератора. В рамках данной работы звено возбуждения будет упрощено до пропорционального звена для большей показательности регулирования. В качестве САР был выбрана тиристорная система возбуждения с регулятором напряжения. Для этого необходимо получать значение напряжения со статора генератора и через преобразователь напряжения сравнивать его с заданным напряжением. На рисунке 1.6 показана структурная схема данной системы.



 V_{ref} – заданное напряжение; E_{fd} – напряжение на выходе возбудителя; $\Delta \varphi$ – угол смещения статора; Δv – преобразованное напряжение Рисунок 1.6 – Структурная схема САР по напряжению

1.4 Тиристорная система возбуждения с регулированием напряжения

Для объединения структурных схем системы возбуждения со статором и САР генератора необходимо учитывать, что на обмотках ротора остается частичное напряжение от магнитного поля статора, поэтому синхронизирующий и демпфирующий моменты пойдут в обратную связь статора генератора. В итоге получим систему возбуждения генератора с автоматическим регулированием напряжения и смещением угла ротора на выходе системы, как на рисунке 1.7. По условию статической устойчивости генератора данная величина должна быть минимизирована.



Рисунок 1.7 – Структурная схема системы возбуждения генератора с регулятором напряжения

На рисунке 1.7 появился новый сигнал ΔE_i , который является напряжением полученным путем сравнения углов смещения статора и ротора, поэтому его необходимо отнимать от заданного напряжения через преобразователь для получения большей точности работы генератора.

1.5 Регулятор PSS1A

PSS1A (Power System Stabilizer) – стабилизатор напряжения энергосистем, таких как турбоагрегат. Основной функцией стабилизатора является увеличение демпфирования при колебаниях ротора путем управления системой возбуждения используя дополнительные сигналы управления. Для обеспечения демпфирования, стабилизатор должен производить момент с фазой смещения угла ротора.

Так как назначение стабилизатора производить демпфирующий момент, сигналом управления системой возбуждения должно быть изменение угловой скорости Δ*ω*_r.

На рисунке 1.7 показана структурная схема из предыдущего пункта, но уже со стабилизатором.



Рисунок 1.7 – Структурная схема САР со стабилизатором

Если передаточные функции возбудителя K_A и генератора K_2 являются пропорциональными звеньями, то единичная обратная связь изменения угловой скорости ротора должна создавать демпфирующий момент для стабилизации. Однако на практике возбудитель с генератором имею экспоненциальное усиление в зависимости от частоты и фазовых характеристик. Тогда передаточная функция стабилизатора должна компенсировать смещение фазы между входом возбудителя и электрическим моментом (выход генератора). Учитывая, что стабилизатор должен работать только с низкочастотным сигналом, добавляется washout фильтр или фильтр верхних частот.

На рисунке 1.8 показан фрагмент структурной схемы со стабилизатором для лучшего понимания принципа его работы.



Рисунок 1.8 – PSS1A

Таким образом, общая система регулирования будет состоять из САР угловой скорости турбины, преобразования ее в механический момент подаваемы на систему возбуждения, затем с регулятором, а после со стабилизатором. Данные исследования помогут увидеть влияние данных систем на стабильность работы турбоагрегата.

1.6 Функциональная схема

Для разработки функциональной схемы необходимо учесть измеряемые и регулируемые величины. В реальном технологическом процессе на вход турбины подается сжатый пар, поэтому необходимо измерять его температуру и давление, а также сигнализировать их превышение. Для регулирования угловой скорости вращения турбины необходимо ее измерять и подавать на аналоговый вход контроллера, также для работы стабилизатора необходимо измерять угловую скорость статора и ротора, они тоже подаются в качестве аналогового входа. Для работы регулятора напряжения необходимо измерять напряжения на обмотках. В итоге контроллер генерирует дискретный сигнал управления актуатором и аналоговый сигнал уставки по напряжению для системы возбуждения.

На рисунке 1.9 представлена функциональная схема автоматизации процесса регулирования турбоагрегата, в таблице 1.1 – условные обозначения приборов и средств автоматизации и в таблице 1.2 – перечень элементов. Дополнительно, пунктирными линиями отмечено применение стабилизатора энергосистемы и регулятора напряжения, так как логика их работы происходит внутри контроллера.



Рисунок 1.9 – Функциональная схема автоматизации

Таблица 1.1 – Условные обозначения

Обозначение	Наименование
PT	Измеритель давления с дистанционной передачей
PIRA	Измеритель давления с регистрацией и сигнализацией
TT	Измеритель температуры с дистанционной передачей
TIRA	Измеритель температуры с индикацией, регистрацией
	и сигнализацией
SE	Первичный измеритель угловой скорости,
	установленный по месту
ST	Измеритель угловой скорости
SR	Прибор, регистрирующий угловую скорость
EE	Первичный измеритель напряжения, установленный
	по месту
ET	Измеритель напряжения с дистанционной передачей
NS	Магнитный пускатель

Таблица 1.2 – Перечень элементов

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
обозначение			
1a	Бесшкальный манометр с	1	
	электропередачей		
16	Потенциометр со шкалой давления	1	
2a	Термометр сопротивления с	1	
	электропередачей		
26	Потенциометр со шкалой температуры	1	
3a	Шестерная передача	1	
36	Тахометр	2	
3в	Датчик угла поворота с	3	
	электропередачей		
3г	Потенциометр	3	
4a	Чувствительный элемент вольтметра	2	
46	Аналоговый вольтметр	2	

2 Расчетная часть

2.1 Методы оптимизации регулирования турбины

Система автоматического регулирования паровой турбины будет построена на основе структурной схемы из первой главы. ПИД-регулятор будет оптимизирован для достижения оптимального режима работы установки. Оптимизатор используется для поиска оптимального решения коэффициентов усиления ПИД-регулирования K_P , K_I и K_D .



Рисунок 2.1 – Структурная схема САР

Для синтеза ПИД-регулятора воспользуемся такими методами оптимизации, как генетический алгоритм и метод роя частиц.

Генетический алгоритм (ГА) использует эволюционные операции, такие как отбор, скрещивание и мутация. В ГА расчетная переменная X состоит из коэффициентов усиления ПИД-регулирования, как показано в следующем уравнении.

Совокупность наборов этих переменных отправляется вперед для оценки целевой функции с помощью генетического алгоритма. После оценки каждой из n целевых функций результирующий набор значений целевой функции Y проверяется на соответствие критериям сходимости. Если нет, то n значений целевой функции возвращаются обратно в ГА. На основе этих значений ГА генерирует следующее поколение набора конструктивных переменных, выполняя генетические операции, а именно отбор, скрещивание и мутацию. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута сходимость, как показано на рисунке 2.2. Метод роя частиц (МРЧ), в котором каждая частица содержит $K_P K_I K_D$ и обновляет их на каждой итерации, чтобы найти лучшее из известных положений частицы (pbest) и роя в целом(gbest). Преимуществом данного метода является его скорость выполнения, а также универсальность. Разработка данного алгоритма имеет сходство с описанием нейронной сети искусственного интеллекта.









Результаты ГА	Значения
Время нарастания	2.5676e+001
Время регулирования	3.6717e+002
Перерегулирование	5.2701e+001
Первый максимум	1.3745e+002
Время достижения первого	6.8290e+001
максимума	
Время оптимизации	9.5064e+002
Количество итераций	35
Значение целевой функции	2.9404
Количество переменных	20
K _P	5.4999e - 001
K _I	9.1943e - 005
K _D	5.4930e - 002

Таблица 2.1 – Результаты расчета генетического алгоритма

Таблица 2.2 – Результаты расчета метода частиц роя

Результаты МРЧ	Значения		
Время нарастания	2.5495e + 001		
Время регулирования	3.6431e+002		
Перерегулирование	5.2664e+001		
Первый максимум	1.3735e+002		
Время достижения первого	6.7791e+001		
максимума			
Время оптимизации	891.431		
Количество итераций	35		
Значение целевой функции	2.9255		
Количество переменных	20		
K _P	5.5753e - 001		
K _I	4.0198e - 005		
K _D	6.7071e - 002		

2.2 Моделирование и сравнение оптимизаторов

Для моделирования будут применены Python и сопутствующие библиотеки, такие как: NumPy, Control, Math и Matplotlib. Первым делом необходимо описать вектор времени, состоящий из общего времени

моделирования и шага, а затем задать параметры турбины. Все это будет описано в файле data.py, который затем будет импортирован в файл с функциями

```
В этом файле хранятся данные:
время, входные/выходные сигналы,
параметры и т.п.
.....
from control.matlab import *
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
### TIME SETTINGS ###
TIME STEP = 1.0
''' Шаг времени '''
SIMULATION_TIME = 700.0
''' Время симуляции '''
TIME_VECTOR = np.arange(0, SIMULATION_TIME, TIME_STEP)
''' Вектор от 0 до времени симуляции '''
### TURBINE PARAMS ###
T1 = 50.0
''' Постоянная времени турбины '''
# ПИД регулирование
kp \, std = 0.5
ki_std = 0.0001
kd_std = 0.05
kp \, pso = 5.5753e-001
ki pso = 4.0198e-005
kd_pso = 6.7017e-002
kp ga = 5.4996e-001
ki_ga = 9.7845e-005
kd ga = 5.3235e-002
```

Рисунок 2.4 – Настройка времени и параметров турбины

На рисунке 2.5 показан код файла turbine.py, который нужен для описания функций моделирования турбины. В нем описвно три функции: расчет передаточной функции и воздействия на нее, для турбины с регулированием и без, а также вывод графика с настройками осей

```
# Турбина без регулятора
def turbine(w_set):
    g_turbine = tf(1, [T1, 1])
    g_actuator = tf(4, [1, 20, 0])
    g_sensor = tf(1, [0.5, 1])
    g = feedback(g_actuator*g_turbine, g_sensor)
    y = lsim(g, w_set, TIME_VECTOR)
    return y[0]
# Метод ПИД регулирования
def turbine_pid(w_set, kp, ki, kd):
   g_turbine = tf(1, [T1, 1])
g_actuator = tf(4, [1, 20, 0])
    g_sensor = tf(1, [0.5, 1])
    pid = tf([kd, kp, ki], [1, 0])
    g_pid = feedback(pid*g_actuator*g_turbine, g_sensor)
    y_pid = lsim(g_pid, w_set, TIME_VECTOR)
    return y_pid[0]
# Вывод графиков
def plot_turbine(input):
         = turbine(input)
    У
    y std = turbine pid(input, kp std, ki std, kd std)
    y_pso = turbine_pid(input, kp_pso, ki_pso, kd_pso)
    y_ga = turbine_pid(input, kp_ga, ki_ga, kd_ga)
    plt.title("Turbine PID control")
plt.ylabel("Angle speed (rad/s)")
    plt.xlabel("Time (s)")
    plt.plot([0, SIMULATION_TIME], [input, input] , color='grey', linestyle='--')
    plt.plot(TIME_VECTOR, y, color='black', label='without PID')
    plt.plot(TIME_VECTOR, y_std, color='red', linestyle='--', label='Non-optimized')
    plt.plot(TIME_VECTOR, y_pso, color='blue', linestyle='--', label='PSO
optimization')
    plt.plot(TIME_VECTOR, y_ga, color='green', linestyle='--', label='GA optimization')
    plt.legend()
```

```
Рисунок 2.5 – Функции моделирования турбины
```

Здесь функция tf создает передаточную функцию и принимает два полинома – числитель и знаменатель соответственно. Функция feedback создает обратную связь, если не задавать параметр знака, то по умолчанию она будет отрицательной. Функция lsim симулирует воздействие U на систему G за время T и возвращает массивы с выходным значением, входным значением и вектор времени моделирования, поэтому берем только параметр 0.

На рисунке 2.6 показан вызов функции и график воздействия при частоте оборотов 90 рад/с.



Рисунок 2.6 – Результаты моделирования и оптимизации

Для сравнения алгоритмов оптимизации воспользуемся написанной функцией вывода графиков и сравним время настройки при одинаковом количестве роя/популяции



Рисунок 2.7 – Сравнение алгоритмов оптимизации

Вывод к главе 2.2: для сравнения обоих алгоритмов процесс оптимизации был проведен с различным количеством роя/популяции. При одинаковом количестве роя/популяции время, затраченное на выполнение алгоритма оптимизации, в МРЧ меньше по сравнению с ГА. Более того, время настройки и время нарастания МРЧ намного ниже, чем ГА.

2.3 Расчет параметров генератора

Основной регулируемой величиной в данной главе будет $\Delta \delta$ – смещение угла ротора. Оно зависит от изменения частоты вращения, преобразованной из разницы моментов. За единицу времени изменение частоты вращения и угол ротора описывается уравнениями

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r) \tag{2.1}$$

$$p\delta = \omega_0 \Delta \omega_r \tag{2.2}$$

Для 60 Гц сети номинальная частота вращения находится по формуле

$$\omega_0 = 2\pi f = 3.14 * 2 * 60 = 377$$
 Гц

Если линеаризовать уравнение 1 и заменив ΔT_e , получим

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_S \Delta \delta - K_D \Delta \omega_r)$$
(2.3)

Линеаризуя уравнение 2 и подставив в уравнение 3, получим

$$\Delta \delta = \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2H} \left(-K_S \Delta \delta - K_D \Delta \omega_r + \Delta T_m \right) \right] =$$
$$= \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2H} \left(-K_S \Delta \delta - K_D s \frac{\Delta \delta}{\omega_0} + \Delta T_m \right) \right]$$

Переставив, получим

$$s^{2}(\Delta\delta) + \frac{K_{D}}{2H}s(\Delta\delta) + \frac{K_{S}}{2H}\omega_{0}(\Delta\delta) = \frac{\omega_{0}}{2H}\Delta T_{m}$$

Тогда, характеристическое уравнение будет иметь вид

$$s^{2} + \frac{K_{D}}{2H}s + \frac{K_{S}\omega_{0}}{2H} = 0$$
(2.4)

где *Т_m* – механический момент;

 T_e – электрический момент; ω_0 – номинальная частота вращения ротора в эл. рад.;

*К*_{*D*} – коэффициент момента демпфирования;

*К*_{*S*} – коэффициент синхронизирующего момента;

Н – постоянная инерции.

По формуле 2.4, зная разницу моментов $T_a = T_m - T_e$, структурная схема будет иметь вид как на рисунке 2.8



Рисунок 2.8 – Структурная схема САР генератора

Тогда собственная незатухающая частота находится по формуле

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}}$$

Коэффициент демпфирования находится по формуле

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H\omega_n} = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_S 2H\omega_0}}$$

Таким образом, с увеличением коэффициента синхронизирующего момента K_S , увеличивается собственная частота, а коэффициент демпфирования уменьшается. Увеличение K_D увеличивает ζ , а постоянная инерции H уменьшает как ω_n так и ζ .

Матрица управления

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_r' \\ \Delta \delta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$
(2.5)

Для примера применения расчетных формул была выбрана стандартная схема с мощностью 2220 МВт, 24кВ и 60 Гц. Рассчитав все параметры по вышеприведенным формулам, можно будет оценить влияние коэффициента демпфирующего момента на поведение системы.



Рисунок 2.9 – Пример принципиальной схемы генератора

Рассчитав и подставив значения в формулу 2.5, матрица управления примет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_r' \\ \Delta \delta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m =$$
$$= \begin{bmatrix} -0.143K_D & -0.108 \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.143 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$

Полюса данной матрицы можно найти так

$$\begin{bmatrix} -0.143K_D - \lambda & -0.108\\ 377 & -\lambda \end{bmatrix} = 0$$

или так

$$\lambda^2 + 0.143K_D\lambda + 40.79 = 0$$

Результаты приведены в таблице 2.3 и на рисунке 2.11.

Таблица 2.3 – Влияние коэффициента демпфирующего момента на параметры системы

K _D	0	10	-10	
Полюса λ	0 ± <i>j</i> 6.39	-0.714 ± <i>j</i> 6.35	0.714 ± <i>j</i> 6.36	
Затухающая частота <i>ω_d</i>	1.0165 Гц	1.0101 Гц	1.0101 Гц	
Коэффициент демпфирования ζ	0	0.112	-0.112	
Собственная частота <i>w_n</i>	1.0165 Гц	1.0165 Гц	1.0165 Гц	

На рисунке 2.10 показано моделирование полученной математической модели. В файле data.py данные о роторной части генератора и в файле generator.py функции расчета и вывода графика

```
Kd = 0.0
''' Коэффициент демпфирующего момента '''
Ks = 0.72
''' Коэффициент синхронизирующего момента '''
w0 = 377
''' Номинальная частота '''
def rotor(dTm):
    rotor = tf(1, [2*H, Kd])
    integrator = tf(w0, [1, 0])
    g = feedback(
             feedback(
                rotor, Kd
             ) * integrator, Ks
    y = lsim(g, dTm, TIME_VECTOR)
    return y, g
def plot_rotor(input):
    y = rotor(input)[0]
    plt.title("Generator model")
    plt.ylabel("Rotor angle deviation (rad)")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.plot(y[1], y[0])
```

```
Рисунок 2.10 – Код моделирования генератора
```



Рисунок 2.11 – График переходного процесса системы

По графику на рисунке 2.11 видно, что при подаче постоянного изменения механического момента смещение угла ротора будет постоянно колебаться. Изза этого необходимо добавить регулятор напряжения, рассмотренным в главе 1.4.



Рисунок 2.12 – Структурная схема системы возбуждения генератора с регулятором напряжения

Сигнал ошибки по напряжению, который формирует сигнал для преобразователя напряжения описывается уравнением

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi$$

Коэффициент K_6 всегда больше нуля, тогда как K_5 может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от условий внешнего сопротивления сети. Коэффициент K_5 имеет значительное влияние на демпфирование колебаний системы.

Уравнение напряжения с обмоток статора описывается уравнением

$$\Delta \psi = \frac{K_3}{T_3 s + 1} \left[-K_4 \Delta \delta - \frac{K_A}{T_R + 1} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi) \right]$$
(2.6)

Сгруппировав и переставив уравнение 2.6, получим

$$\Delta \psi = \frac{-K_3 [K_4 (T_R + 1) + K_5 K_A]}{s^2 T_3 T_R + s (T_3 + T_R) + 1 + K_3 K_6 K_A} \Delta \delta$$

Имея набор коэффициентов определенной системы, исследуем влияние значения *K*_A на демпфирование колебаний системы

$$K_1 = 1.591 K_2 = 1.5 K_3 = 0.333 K_4 = 1.8$$

 $K_5 = -0.12 K_6 = 0.3 T_R = 0.02 T_3 = 1.91$

Коэффициент синхронизирующего момента статора находим по формуле

$$K_{S(\Delta\psi)} = \frac{-K_2 K_3 (K_4 + K_5 K_A)}{1 + K_3 K_6 K_A} \Delta\delta$$
$$= \frac{0.06 K_A - 0.9}{1 + 0.1 K_A} \Delta\delta$$

Эффект регулирования увеличивает синхронизирующий момент, при $K_A = 0, K_{S(\Delta\psi)} = -0.9$, а при $K_A = 200, K_{S(\Delta\psi)} = 0.529$. Тогда итоговый коэффициент синхронизирующего момента будет равен

$$K_S = K_1 + K_{S(\Delta \psi)}$$

В данном случае рассмотрена система с отрицательным K_5 , в случае, когда K_5 больше нуля эффект регулирования будет противоположным.

Код для расчета и моделирования показан на рисунке 2.13, а результаты в таблице 2.4 и рисунке 2.14.

```
def generator_avr(Vref, dTm):
    g_rotor = -rotor(dTm)[1]
    g_stator = feedback(Ka * tf(K3, [T3, 1]), (K6 + K5/g_rotor) * tf(1, [Tr, 1]))
    g = feedback(g_stator * g_rotor, Ks/Ka)
    y = lsim(g, Vref, TIME_VECTOR)
    return y, g
def plot_generator_avr():
    y = generator_avr(90, 0)[0]
    plt.title("Generator with AVR")
    plt.ylabel("Rotor angle deviation (rad)")
    plt.xlabel("Time (s)")
    plt.plot(y[1], y[0])
```



K _A	$K_{S(\Delta\psi)}$	$K_S = K_1 + K_{S(\Delta\psi)}$	K _D
0	-0.0025	1.5885	1.772
15	-0.0093	1.5817	0.024
50	0.0029	1.5939	-4.09
200	0.2804	1.8714	-12.272
x	0.6	2.191	0

Таблица 2.4 – Влияние КА на параметры системы



Рисунок 2.14 – Реакция системы на постоянное напряжение

Однако, по графику видно, что система является неустойчивой и в какойто момент выходной сигнал стремится к бесконечности. Это объясняется малым демпфированием колебаний ротора. Самым эффективным способом исправить это является стабилизатор энергосистемы (PSS), рассмотренный в пункте 1.5.

2.4 Синтез стабилизатора энергосистемы

Стабилизатор PSS1A, подключается отрицательной обратной связью, преобразуя колебания угловой скорости вращения ротора.





Для иллюстрации работы стабилизатора воспользуемся данными из предыдущего примера:

```
### GENERATOR PARAMS ###
T3 = 1.91
 '' Постоянная времени статора '''
K1 = 1.591
 '' Коэффициент демпфирующего момента '''
K2 = 1.5
''' Передаточная функция генератора '''
K3 = 0.333
 '' Коэффициент усиления статора '''
K4 = 1.8
 '' Коэффициент синхронизирующего момента '''
K5 = -0.12
 '' Коэффициент обратной связи ротора '''
K6 = 0.3
 '' Коэффициент обратной связи статора '''
Ka = 200
 '' Передаточная функция возбудителя '''
```





Рисунок 2.17 – Структурная схема PSS

Параметры компенсации фазы стабилизатора T_1 , T_2 находятся по формулам:

$$\frac{sT_1+1}{sT_2+1} = \frac{sT_1+1}{saT_1+1} = \frac{saT+1}{sT+1}$$

Так мы получили компенсатор опережающего запаздывания, где а - сдвиг по фазе

$$a = \frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}$$
$$T_1 = \frac{1}{2\pi f \sqrt{a}}$$
$$T_2 = aT_1$$

Здесь φ – выбранная частота для стабилизации системы, она должна находиться в промежутке от 0.2 до 2.5 Гц

Теперь, необходимо реализовать четыре основные функции:

- Расчет частоты и фазы системы для выбора φ работы стабилизатора

- Расчет параметров стабилизатора и составления общей передаточной функции системы

- Моделирование системы с учетом φ и рассчитанными параметрами

- Вывод графиков

В качестве дополнения можно реализовать ручную настройку параметров стабилизатора для сравнения влияния их на поведение системы.

```
### PSS PARAMS ###
\mathsf{Tw} = 10
<u>''' Постоя</u>нная времени washout филтра '''
F MIN = 0
''' МИнимальная частота '''
F MAX = 30
def freq(G):
    Данная функция предназначена для расчета
    фазо-частотных характеристик объекта
    .....
    # damp() возвращает частоту дэмпинг и полюса системы
    dmp = damp(G, doprint=False)
    f = dmp[0].tolist() # частота
    d = dmp[1].tolist() # дэмпинг
    frequency = []
    damping = []
    # Добавляем только частоты и дэмпинг при F_MIN < f < F_MAX (смотреть
методику)
    for i in range(len(f)):
        if f[i] > F_MIN and f[i] < F_MAX:
            if f[i] not in frequency:
                frequency.append(f[i])
                damping.append(d[i])
    # Расчет фазы и перевод в градусы
    mag, phase, wout = bode(G, frequency, plot=False)
    phase = phase.tolist()
    phase.reverse()
    for i in range(len(phase)):
        phase[i] = math.degrees(phase[i])
    freq_data = []
    for i in range(len(frequency)):
        freq_data.append({
            "Frequency": frequency[i],
            "Phase": phase[i],
            "Damping": damping[i]
        })
    return freq_data
```



```
def
   pss1a_default(G, freq_data):
    .....
    Данная функция предназначена для расчета
    параметров регулятора по умолчанию
    # Принимаем фазо-частотные характеристики объекта
    f = freq data['Frequency']
    phi = freq_data['Phase']
    ksi = freq_data['Damping']
    a_pss = (1 - math.sin(math.radians(phi))) / (1 + math.sin(math.radians(phi)))
    T1_pss = 1/(2*math.pi*float(f)*math.sqrt(a_pss))
    T2_pss = a_pss * T1_pss
    g_pss = K_stab * tf([Tw, 0], [Tw, 1]) * tf([T1_pss, 1], [T2_pss, 1])
    g = feedback(G, g_pss, sign=1)
    return g
def generator_pss(Vref, dTm):
    g = generator_avr(Vref, dTm)[1]
    freqs = freq(g)
    g_pss = pss1a_default(g, freqs[0], Vref)
   y = lsim(g_pss, Vref, TIME_VECTOR)
    return y, g_pss
def generator_pss(Vref, dTm):
    g = generator_avr(Vref, dTm)[1]
    freqs = freq(g)
    g_pss = pss1a_default(g, freqs[0], Vref)
    y = lsim(g_pss, Vref, TIME_VECTOR)
    return y, g_pss
```

```
Рисунок 2.17 – Основной код программы
```

Если вывести лог полученной программы, можно увидеть итоговую передаточную функцию системы:

1.162e+04 s^3 + 2.476e+06 s^2 + 9.491e+07 s + 9.466e+06 -22.97 s^6 - 4012 s^5 - 4.881e+04 s^4 - 8.151e+05 s^3 - 4.367e+06 s^2 - 7.456e+07 s - 2.702e+06

Рисунок 2.18 – Передаточная функция генератора с регулятором напряжения и стабилизатором

2.5 Краткий обзор веб-приложения

В полной реализации моего приложения с использованием фреймворка Flask все вышеописанные скрипты выполняются на сервере, поэтому присутствуют еще дополнительные функции для передачи данных на клиентскую часть в формате JSON, а также функции тестирования, поэтому в данной работе представлена сильно упрощенная реализация.

В полной версии проекта реализовано построение структурных схем прямо в браузере, настройка каждого компонента, а также выбор различных фазочастотных характеристик для анализа системы.

Первым делом выполняется запуск сервера на хосте – рисунок 2.19, затем на клиенте в браузере входим в приложение.



Рисунок 2.19 – Запуск сервера

На рисунке 2.20 показан экран с выбором готового шаблона или пустой схемы.



Рисунок 2.20 – Выбор шаблона

На рисунке 2.21 показан пример построения функциональной схемы энергосистемы, функционал данного экрана напоминает работу в Simulink, однако сами блоки представляют собой более комплексные объекты с множественным выбором параметров, что продемонстрировано на рисунке 2.22

Ввод данных для расчета Редактор схем	Новая схема	Импорт Эксі	торт Удалить элемент		Сохранить Выполни
ьекты	«				
поиск объктов					
сновные Прочие	АРВ		PSS		
Трансформатор Краткое описание объекта	по умолчанию		PSSTA		
Линия электропередачи Краткое описание объекта			🧿 Синхронны	й генератор	тт Линия электропередачи
К ина беск. мощности Краткое описание объекта	😽 Сист. возбужд	ения	sample_generator		кадельная липия
Краткое описание объекта	модель АС1А		• -		
АРВ Краткое описание объекта			тил SSC	иатор	
PSS Краткое описание объекта					
Выход					

Рисунок 2.21 – Построение структурных схем

× Параметры				
Настройки Описание			Выбор	9 частоты для анализа
Параметры для Сист. возбуждения модель АС1А		ЧАСТОТА (ГЦ)	ФАЗА	
модель AC1A модель ST2A модель ST5B	0	1.0000000	-87.14470343	Демпфирование(%): 0.00000000 Лямбда: 0.000 Самый большой компонент в режиме: 0.000
	0	1.0000000	-177.14470343	Демпфирование(%): 1.00000000 Лямбда: 0.000 Самый большой компонент в режиме: 0.000
	\bigcirc	1.0000000	-177.14470343	Демпфирование(%): 1.00000000 Лямбда: 0.000 Самый большой компонент в режиме: 0.000
Применить				Перейти к анализу

Рисунок 2.22 – Настройка параметров системы возбуждения и выбор частоты

В результате проделанных процедур на основе выбранных характеристик получаем графики энергосистемы с примененным стабилизатором и без него – рисунок 2.23.



Рисунок 2.23 – График стабилизированного генератора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе разработки дипломного проекта были проделаны следующие процедуры: Рассмотрена САР паровой турбины с ПИД-регулированием и сравнением различных методов подбора параметров регулятора. Рассмотрена САР генератора, разработана структурная схема с AVR регулятором, рассчитаны параметры полученной системы. Синтезирован стабилизатор полученной энергосистемы, дополнена структурная схема, пересчитаны параметры. Построена функциональная схема автоматизации с применением ПЛК. Создан и протестирован интерфейс моделирования с использованием Flask Python,

На основе полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы: Благодаря ПИД-регулированию турбины можно добиться меньшего значения перерегулирования и пиковой величины угловой скорости, что положительно сказывается при пуске турбины и перепадах давления пара. Использование AVR является недостаточным методом регулированием генератора, который приводит к нарушению условия статической устойчивости энергосистемы. Использование PSS помогает решить проблему с устойчивостью, однако является весьма сложным методом регулирования, так как требует тонкой настройки параметров и обязательного моделирования

Именно в целях последнего пункта выводов и было разработано вебприложение с графическим пользовательским интерфейсом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Dr. M. V. Subramanyam, Dr. K. Satya Prasad. Robust Control of Steam Turbine System Speed Using Improved IMC Tuned PID Controller – Procedia Engineering 38, 2012.

2 Ali Tarque, Hossam A. Gabbar. Particle Swarm Optimization (PSO) Based Turbine Control, 2013.

3 P. Kundur. Power System Stability and Control, 1994.

4 Oscillations and Power System Stabilizers – PowerWorld Corporation 2001 S. First St, Suite 203 Champaign, IL 61820.

5 Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.

6 Яшкин И. И. Курс теории автоматического управления. М., Наука, 1986

7 Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М., Наука, 2002.

8 E. V. Larsen; D. A. Swann. Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts, 1981.

9 SSE ACADEMY INDUSTRIAL MACHINES - Steam Turbine (Protection and Control)

10 А.Л. Кислицын. Синхронные машины. Учебное пособие по курсу «Электромеханика» – Ульяновск: УлГТУ, 2000.

11 Лурье Б Я., Энрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления. Учебное пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004.

12 М. Гринберг. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python, 2018.

13 Flask Documentation - Flask (A Python Microframework)

14 Паровые и газовые турбины для электростанций [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний ; под ред. А.Г. Костюка. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016.

15 A. Bekishev, D. Qurbonboyeva, G. Mustafakulova. Статическая устойчивость синхронных генераторов, 2020.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ипмагамбетов А. Е.

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка системы автоматического регулирования силовой турбиной

Научный руководитель: Нурлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1:0.9

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 95

Знаки из здругих алфавитов: 1

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:

Дата

Заведующий кафедрой

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

<u>на дипломный проект студента</u> <u>Ипмагамбетова Амира Ерболатулы</u> <u>5В070200 – Автоматизация и управление</u>

На тему: <u>Разработка системы автоматического регулирования силовой</u> турбиной

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы автоматического регулирования турбоагрегата.

В первой главе рассмотрены принципы работы турбоагрегата, его отдельных частей, таких как паровая турбина и синхронный генератор, рассмотрены основные проблемы управления данными объектами и методы регулирования, а также описана функциональная схема автоматизации.

Во второй главе приведены сравнения алгоритмов оптимизации САР турбины, стабилизации САР генератора, расчеты параметров и синтез регуляторов. Детально показан и исходный код приложения для моделирования стабилизатора энергосистемы с использованием языка Python.

В результате моделирования в разработанном веб-приложении показано сравнение алгоритмов оптимизации, а также оценка влияния регулятора и стабилизатора энергосистем с удобным пользовательским интерфейсом.

В процессе работы автор работы показал себя дисциплинированным, исполнительным и трудолюбивым, с высоким уровнем теоретической подготовки. Проведенные исследования доказывают не только отличную теоретическую подготовку дипломанта, но наличие навыков решения практических задач управления.

Заключение: Считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломная работа соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным работам по специальности 5В070200 – Автоматизация и управление. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Ипмагамбетов А. Е. допускается к защите.

Научный руководитель PhD, сениор-лектор Кулакова Е.А. «6» мая 2022 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

РЕЦЕНЗИЯ

<u>на дипломный проект студента</u> <u>Ипмагамбетова Амира Ерболатулы</u> <u>5В070200 – Автоматизация и управление</u>

На тему: Разработка системы автоматического регулирования силовой турбиной

а) пояснительная записка на 40 страницах.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В пояснительной записке, представленной на рецензирование, показана разработка системы автоматического регулирования турбоагрегата.

В первой главе рассмотрены принципы работы турбоагрегата, его отдельных частей, таких как паровая турбина и синхронный генератор, рассмотрены основные проблемы управления данными объектами и методы регулирования, а также описана функциональная схема автоматизации.

Во второй главе приведены сравнения алгоритмов оптимизации САР турбины, стабилизации САР генератора, расчеты параметров и синтез регуляторов. Детально показан и исходный код приложения для моделирования стабилизатора энергосистемы.

В результате моделирования в разработанном веб-приложении показано сравнение алгоритмов оптимизации, а также оценка влияния регулятора и стабилизатора энергосистем с удобным пользовательским интерфейсом.

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

Данный дипломный проект отличает научно-исследовательский подход и использование современных средств моделирования, таких как языки программирования. Приведенные исследования доказывают отличную теоретическую подготовку дипломанта.

Оценка работы

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «отлично», а студент Ипмагамбетов А. Е. присуждения академической степени бакалавра по специальности 5В070200 – Автоматизация и управление.

Рецензент

Руководитель центра компетенций и трансфера технологий в области в томатизации и мехатроники. ВКТУ им. Серикбаева

« <u>6</u> » мая 2022 г.

Ф КазНИТУ 706-17. Рецензия