

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизации и управления

Ергалиев Милат Дулатович

Разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к дипломному проекту

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



**ДОПУШЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой АиУ  
к.ф.м.н., ассоц. профессор  
Алдияров Н. У.  
"\_\_\_" мая 2022 г.

### ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

На тему: "Разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада"

по специальности: 5В070200 - Автоматизация и управление

Выполнил

Ергалиев М. Д.

Рецензент

Доктор PhD, зав. кафедрой

ЭМиЭП, АУЭИС

Шыныбай Ж.С.

(подпись)

"\_\_\_" мая 2022 г.

Научный руководитель

канд.тех.наук, ассис. проф.

Сарсенбаев Н. С.

(подпись)

"\_\_\_" мая 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра автоматизация и управление



**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой АиУ

кандидат физ-мат наук

ассоциированный профессор

Алдияров Н.У.

«  » 2022 г.

### **ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Ергалиеву М.Д.

Тема: Разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада.

Утвержден приказом ректора Университета № 489-П/Ө, от «24» декабря 2021 г.

Срок сдачи законченной работы «  » 2022 г.

Исходные данные дипломной работы: структурная схема системы асинхронного вентильного каскада.

Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов или краткое содержание дипломной работы: а) разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада; б) на основе теоретического материала будет рассмотрен принцип работы асинхронного вентильного каскада; в) по имеющейся структурным схемам и передаточным функциям получение математической модели; г) математическое описание системы и оценка ее устойчивости; д) постановка задачи и построение П, ПИ, ПИД регулятора.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рекомендуемая основная литература: 1 I.Doroshchenko, V.Zakharenko, Simulation Model of an Asynchronous Machine with Wound Rotor in Matlab Simulink. – E3S Web Conf., Volume 288,2021

2 T.Baranenko, V.Saravas, Spectral composition of input voltage of the asynchronous drive with valve cascade converter. - International Journal of Control and Intelligent, Vol. 12, 2015. – С.41-50

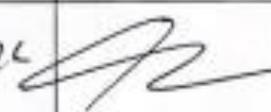
## ГРАФИК

подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	05.03.2022 г.	
Практическая часть	16.04.2022 г.	

## Подписи

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

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Н.С. Сарсенбаев, канд. техн. наук, ассистент профессор	18.05.22	
Практическая часть	Н.С. Сарсенбаев, канд. техн. наук, ассистент профессор	18.05.22	
Нормоконтроллер	А.М. Искакова, магистр техн. наук, тех. секретарь, лектор		

Научный руководитель  Сарсенбаев Н.С.

Задание принял к исполнению обучающийся  Ергалиев М.Д.

Дата \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста асинхронды вентильді каскадты басқарудың автоматтандырылған жүйесі әзірленіп, зерттелді. Асинхронды клапан каскадының жұмыс принципі сипатталған, негізгі принциптік және құрылымдық схемалар келтірілген. Басқару объектісі ретінде асинхронды клапан каскады таңдалды, ол электр энергиясын механикалық энергияға айналдыруда маңызды рөл атқарады. Содан асинхронды клапан каскадының математикалық моделі құрылды, ашық және жабық жүйенің өтпелі процесінің графиктері алынды, математикалық модельдің динамикалық қасиеттеріне талдау жасалды, жүйенің тұрақтылығы тексерілді, жүйенің шекті параметрлері есептелді, жүйенің өтпелі процесінің сапасына тікелей және жанама бағалау алынды. Негізінде қойылған салынды П-реттеуіш ПИ-реттеуіш, АИТ-реттеуші.

## АННОТАЦИЯ

В данном дипломной работе была разработана и исследована автоматизированная система управления асинхронного вентильного каскада. Описывается принцип работы асинхронного вентильного каскада, приведены основные принципиальные и структурные схемы. В качестве объекта управления был выбран асинхронный вентильный каскад, была построена математическая модель асинхронного вентильного каскада, получены графики переходного процесса разомкнутой и замкнутой системы, произведен анализ динамических свойств математической модели, проведена проверка на устойчивость системы, вычислены предельные параметры системы, получены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса системы. На основе постановки задачи был построен П-регулятор, ПИ-регулятор, ПИД-регулятор.

## **ANNOTATION**

In this thesis an automated control system for asynchronous valve cascade has been developed and investigated. The principle of operation of asynchronous valve cascade is described, the main principle and structural diagrams are given. Asynchronous valve-selective cascade was chosen as a control object, mathematical model of asynchronous valve-selective cascade was built, transient process diagrams of the open and closed system were received, analysis of dynamic properties of mathematical model was produced, system stability was tested, critical parameters of the system were calculated, direct and indirect quality evaluation of transient process of the system was obtained. Based on the problem statement, a P-regulator, a PI-regulator, a PID-regulator have been constructed.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение		
1	Технологическая часть	10
1.1	Описание асинхронного вентильного каскада	10
1.2	Асинхронный двигатель	14
1.3	Применение асинхронного двигателя на заводе	15
1.4	Выбор средств автоматики	16
2	Расчётная часть	18
2.1	Построение математической модели асинхронного вентильного каскада	18
2.2	Критерий Найквиста	22
2.3	Оценки качества замкнутой системы	23
2.4	Построение ПИД-регулятора для системы асинхронного вентильного каскада	25
	Заключение	32
	Список литературы	33

## ВВЕДЕНИЕ

На данный момент любое технический комплекс оборудования в промышленности нельзя применить без компонентов автоматизации. Во многих технологических процессах важнейшую играет превращения электрической энергии в механическую, которую невозможно представить без асинхронный вентильный каскад. Для эффективного использования асинхронного вентильного каскада необходимо разработать автоматизированную систему управления.

Целью данной работы является разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада.

На основе теоретического материала будет рассмотрен принцип работы асинхронного вентильного каскада. Также будет рассматриваться существующие виды вентильного каскада и будут приведены основные различия.

По существующим структурным схемам и передаточным функциям всех звеньев асинхронного каскада, будет получена математическая модель. Для полученной математической модели будет произведен анализ переходного процесса, получены прямые и косвенные оценки качества.

На основе полученных оценок качества будет выполнена постановка задачи и будет построен П, ПИ, ПИД регуляторы.

В заключении анализируются результаты, оценивается целесообразность внедрения регуляторов, а также подводятся итоги работы.

## 1 Технологическая часть

### 1.1 Описание асинхронного вентильного каскада

Асинхронный вентильный каскад, проще говоря, это система регулируемого электропривода переменного тока. С глобальным развитием техники во многих областях народного хозяйства повысился интерес к электроприводам, в котором существует регулирование скорости вращения. Во многом, усовершенствование техпроцесс часто идет в связке с требованием автоматизированного управления мощностью машин и устройств, за счет увеличения или уменьшения скорости работы приводного двигателя, что является наиболее экономичным вариантом. При эксплуатации электропривода возрастает качество продукции и даже снижается потребление энергии. Регулируемый привод является силовой основой комплексной автоматизации рабочих механизмов и технологических процессов.

Процесс регулирования скорости асинхронного двигателя в двигателях двойного питания и схемах вентильного каскада производится при помощи изменения скольжения двигателя при непрерывном вращении электромагнитного поля. Статорные обмотки двигателя напрямую подключаются к питающей сети. Основная идея данных схем заключается в полезном использовании мощности скольжения, трансформируемой в цепь ротора. Поэтому в цепь ротора асинхронного фазного двигателя вводят добавочную ЭДС. Схема асинхронного вентильного каскада показана на рисунке 1.1.

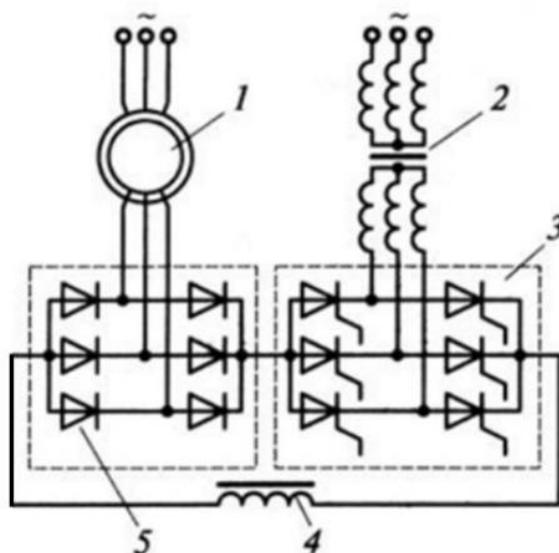


Рисунок 1.1 – Схема асинхронно вентильного каскада

На рисунке 1.1 представлен асинхронно вентильный каскад, в котором ток ротора асинхронного двигателя с фазным ротором 1 выпрямляется

неуправляемым выпрямителем 5, затем в цепь выпрямленного тока ротора вводят добавочную ЭДС постоянного тока, которой является ЭДС инвертора 3, получаемая путем регулирования угла  $\beta$  опережения тиристоров инвертора. Трансформатор 2 служит для сравнения и согласования напряжения между сетью и ротора двигателя. Энергия скольжения, индуктируется в энергию постоянного тока и инвертируется в питающую сеть.

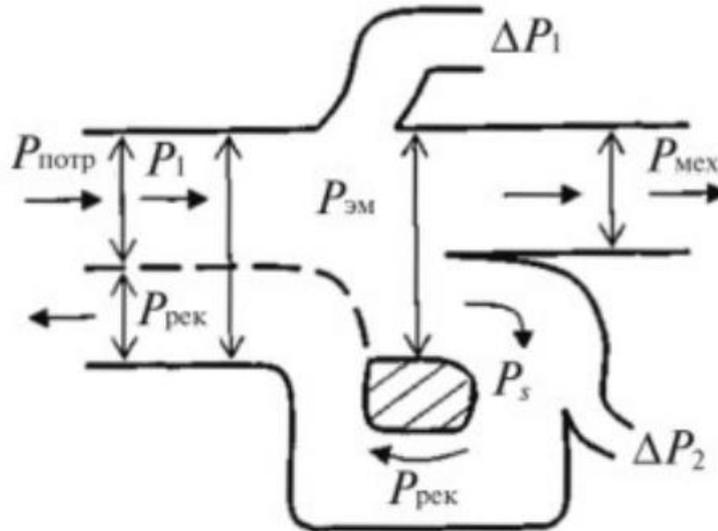


Рисунок 1.2 – Схема распределения мощности каскада

На рисунке 1.2 показана схема распределения мощности асинхронно вентильного каскада.

Мощность  $P_1$ , за исключением потерь в статоре  $\Delta P_1$ , видоизменяется в мощность вращающегося магнитного поля -  $P_{эм}$ , которая в свою очередь делится на механическую  $P_{мех}$ , реализуемую на валу асинхронного двигателя, и электрическую, трансформируемую в обмотки ротора - мощность скольжения  $P_s$ . Мощность скольжения  $P_s$ , за исключением потерь  $\Delta P_2$  в роторе, выпрямителе, инверторе и трансформаторе возвращается в питающую сеть -  $P_{рек}$ . Т.о., результирующая, потребляемая приводом из сети мощность  $P_{потр} = P_1 - P_{рек}$ . Данный процесс хорошо обуславливает высокую эффективность и высокий КПД вентильного каскада.

Мощность скольжения имеет вид:

$$P_s = 1.35s(E_{ph}I_p - \frac{I_{dp}^2 x_p}{\sqrt{2}}),$$

где,  $E_{ph}$  - это номинальная линейная ЭДС ротора

$$I_{dp} = \frac{E_{dp} - E_{di}}{R_{ЭКВ}} = \frac{1.35E_{ph}s - 1.35U_2T \cos\beta}{R_{ЭКВ}} \text{ — это выпрямленный ток ротора}$$

$E_{di}$  – это ЭДС инвертора

$U_{2T}$  — это линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора

$x_p = \frac{x_k}{k_T^2}$  — это индуктивное сопротивление рассеяния фазы

асинхронного двигателя

$M = \frac{P_s}{\omega_0 s}$  – это Момент асинхронного двигателя

Каскадные схемы для запуска асинхронных двигателей позволяют эффективно использовать энергию скольжения при автоматизированном регулировании скорости, по сравнению со схемами, где энергия постепенно рассеивается проходя через цепь сопротивления.

По типу эксплуатации энергии скольжения каскадные соединения бывают двух видов: электромеханические и, собственно, электрические.

В электрических идет процесс возврата энергии в питающую цепь, исключая потери, тогда как в электромеханических после прохождения всей цепи энергия должна вернуться в вал двигателя.

Ток ротора асинхронного двигателя обладает частотой, прямо пропорциональной скольжению. Она изменяется при переменах в угловой скорости двигателя. ЭДС ротора тоже прямо пропорционален скольжению. Для того, чтобы энергия вернулась обратно, требуется, чтобы частоты ЭДС и сети были равны, из чего следует, что в цепи необходимо наличие преобразователя частоты, который прямо будет связан с самой сетью.

Обратное поступление энергии на вал асинхронного двигателя может произойти исключительно при условии наличия дополнительного двигателя. Если таковым является двигатель постоянного тока, то перед поступлением на него тока, необходим процесс преобразования одной из переменного в постоянный.

Каскады, в которых идет применение энергии переменного тока, эксплуатируются совместно с двигателями переменного тока. При таком исполнении каскадного устройства происходит преобразование механической энергии из энергии скольжения, после чего механическая энергия возвращается на вал, если присутствует каскад или же за счет преобразовательного звена, который состоит из коллекторного двигателя и дополнительной коллекторной машины, поступает обратно в электрическую сеть. Основным достоинством каскадных схем характеризуется преобразовательный механизм, который может быть использован исходя от мощности скольжения, в противовес другим системам автоматизированного регулирования электропривода, где преобразовательный механизм высчитывается из условия пропускания полной начальной мощности.

Каскадные схемы бывают двух видов: с обратной связью и с промежуточным звеном тока.

Вентильный двигатель – система автоматизированного регулируемого электропривода, которая состоит из электродвигателя переменного тока, конструктивно похожей на синхронную машину, силового преобразователя и

устройств управления, обеспечивающих коммутацию цепей обмоток электродвигателя в зависимости от положения ротора двигателя. Ротор может быть выполнен с постоянными магнитами или с обмоткой возбуждения, питаемой через контактные кольца постоянным током.

Электронная часть вентильного двигателя коммутует фазы статора таким образом, чтобы вектор магнитного потока статора был ортогонален вектору магнитного потока ротора, т.е. происходило векторное управление вентильного двигателя. При соблюдении ортогональности потоков статора и ротора происходит поддержание максимального вращающего момента вентильного двигателя в условиях изменения частоты вращения, что исключает возможность выпадения ротора из синхронизма и обеспечивает работу синхронной машины с максимально возможным для неё КПД.

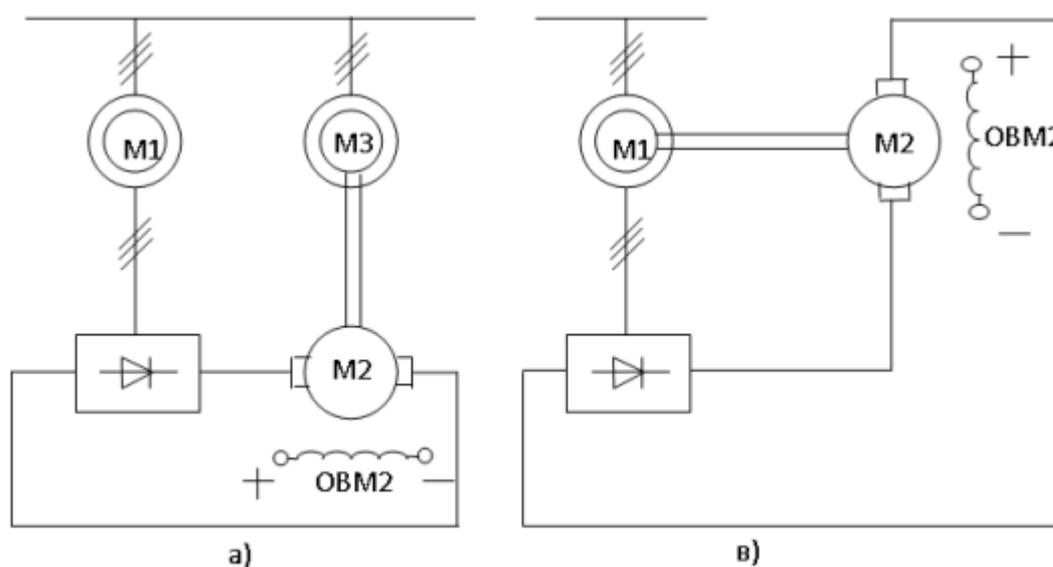


Рисунок 1.3 - схема вентильного каскада

На рисунке 1.3 показана схема вентильного каскада. Моторно-генераторный агрегат является также и инвертором. При этом есть две машины постоянного тока M2 и M3, причем M2 работает в режиме двигателя, тогда как M3 в режиме генератора, синхронного либо же асинхронного. M2 приводит в действие M3, который способствует возврату энергии скольжения в сеть. Питание идет от выпрямленного напряжения с ротора M1.

## 1.2 Асинхронный двигатель

Асинхронный двигатель является одним из самых эффективных устройств, который превращает электрическую энергию в механическую. Конструкция асинхронного двигателя состоит из статора цилиндрического, ротора, конструктивных деталей. Статор является неподвижной частью электрической, лопаточной и другой машины, которая взаимодействует с подвижной частью,

т.е. с ротором. На статоре двигателя постоянного тока расположен индуктор или обмотка возбуждения, на статоре синхронного и асинхронного двигателя расположена рабочая обмотка, которая по физическому принципу и правилу намотки статор синхронной и асинхронной машины ничем не отличается и наматываются совершенно одинаково. Статор имеет цилиндрическую форму, собранную из листов металла. Пазаы в сердечнике сдвинуты на угол  $2\pi/3$  друг от друга. Пазаы нужны, так как именно в них находится обмотка.

Ротор – подвижная часть, которая участвует в принятии либо отдаче энергии от либо же для рабочего тела. К ротору прикреплен вал, у рабочих машин он чаще всего приводной. Конструкция ротора обычно предполагает его изготовления в форме диска либо же барабана. Помимо этого элементами двигателя является целый ряд элементов, начиная от обычных подшипников и заканчивая кожухи для охлаждения и вентиляции.

Принцип действия асинхронного электродвигателя можно понять по его названию. Таким образом ротор и статор имеют разные частоты вращения. Вернее, они создают магнитные поля, частота вращения которых никогда не равна. Это и отличает их от синхронных двигателей. Причем для асинхронных двигателей актуален нерушимый закон: статор всегда должен вращаться с большей частотой, чем ротор. Поле вращения создают обмотки. Создаются они за счет того, что ЭДС, образуемая магнитным потоком, которая участвует в процессе образования электромагнитной силы в обмотке ротора, которая и приводит механизм в движение, вращая вал двигателя. Сам асинхронный двигатель возможно запустить различными способами. Прямой запуск асинхронного двигателя заключается в непосредственном подключении агрегата к сети.

Обмотки могут быть соединены звездой или треугольником. При треугольнике ток фазы гораздо меньше линейного, а при звезде они равны. Но стоит учесть, что перепады тока при смене режима почти не влияют на работу питания. Но главным минусом является уменьшение момента. Сама схема двигателя построена таким образом, чтобы при маленьких фазных токах создавать максимальный по величине момент. Работа асинхронных двигателей очень плавная, потому что запуск и нарастание мощности происходит линейно с постепенным разгоном. Таким же плавным является и торможение. Плавность пуска снижает аварийность и повышает надежность. Это является одним из решающих достоинств асинхронного двигателя над синхронными. К тому же они просты в настройке и эксплуатации.

### **1.3 Применение асинхронного двигателя на заводе**

Асинхронные двигатели имеют целый спектр преимуществ, которые и обусловили их популярность в условиях производства. Маркировка и

классификация двигателей осуществляется по количеству фаз в двигателе. Каждая фаза представляет собой независимый от других ток, которые активизирует катушки статора. Самыми популярными являются трехфазные двигатели.

Как понятно из названия, в таких двигателях есть три фазы, то есть, тока, которые запитывают катушки. Причем количество катушек обязательно должно быть кратко трем: 3, 6, 9. На то, как быстро будет вращаться ротор, влияет флуктуация индукции. Из-за нее ротор вращается медленнее магнитного поля статора.

Vuzachi Operating — операционная компания, активно разрабатывающая месторождения в Западном Казахстане. В промышленной компании Vuzachi Operating используется трехфазный асинхронный двигатель. Объясняется это простотой эксплуатации, надежностью этих машин, небольшим весом и удачными габаритными размерами.

На рисунке 1.5 показан трехфазный асинхронный двигатель, используемой на заводе Vuzachi Operating.



Рисунок 1.5 – Трехфазный двигатель

На рисунке 1.5 представлена модель трехфазного асинхронного двигателя АДМ 100S4.

Данная модель используется на Vuzachi Operating по той причине, что модель трехфазного асинхронного двигателя АДМ 100S4 является наиболее дешевым и практичным решением. Также данный двигатель удовлетворяет всеми стандартами и требованиями компании Vuzachi Operating. Модель проста в эксплуатации и имеет сравнительно низкую стоимость по сравнению с аналогами. Трехфазный асинхронный двигатель на данном производстве

используется для нагнетателей и средств автоматического управления. Еще один плюс использования такого двигателя на Buzachi Operating это универсальность использования, данную модель можно использовать для разных целей.

Очень часто идет включение к двигателю ЧПР. Нужно это для регуляции скорости двигателя. Конечной целью является уменьшенный расход энергии и энергопотери.

ЧРП считается основой сохраняющих энергию систем и используется там, где технологический процесс настоятельно просит конфигурации скорости вращения устройств в широком спектре, поддержание прочности характеристик, обеспечивая синхронной работы нескольких приводов. ЧРП, владея высочайшими динамическими чертами, просто встраивается в современные системы автоматизации и контроля. Частотное регулирование действительно используется на предприятиях энергетики, индустрии и коммунального хозяйства. Внедрение электродвигателей с управлением от частотных преобразователей накладывает ряд ограничений на выполнение мотора. Обоснованы эти ограничения как параметрами напряжения питания, которые сервируются с преобразователя на движок и электромеханическими особенностями поведения движков в составе частотно-регулируемого привода.

К общим достоинствам трехфазных двигателей можно отнести их мощность и самозапуск. Все это дает высокий КПД при работе, а также плавный ход и минимизацию энергетических потерь

#### **1.4 Выбор средств автоматики**

Для разработки и исследования системы асинхронного вентильного каскада необходимо подобрать средства автоматики.

В основе асинхронного вентильного каскада лежит асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. В качестве двигателя был взят Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИР 100 L4. С частотой вращения 1500об/мин, мощностью 4кВт и КПД в 84,2%. Данные параметры являются средними среди асинхронных электродвигателей. Двигатель имеет стандартное питание от сети 220/380В с частотой 50Гц. Частота вращения поля статора составляет 1500 об/мин.

Для питания двигателя выбран комплектный электропривод типа АТО4 - 5,5. Данный преобразователь является транзисторным электроприводом с автономным инвертором напряжения. Напряжение питающей сети такое же как у асинхронного электродвигателя – 380В с частотой питающей сети 50Гц.

Привод АТО4 -5,5 используется при условии предъявлений высоких требования регуляции параметров. Он состоит из силового кабеля, транзисторный ключ, внешнего блока резистора, источника питания и контролера.

Контролер отвечает за работоспособность системы. Он управления приводом и осуществляет переключение режимов работы в зависимости от значений входов.

Питание осуществляется многоканально. Происходит преобразование токов из переменных в постоянные. При этом соблюдаются требуемые значения токов.

Силовой кабель преобразует энергию, а именно выпрямляет напряжение. Делает он это с помощью выпрямителя. После этого идет процесс инверсии выпрямленных токов. Делается этого уже с помощью инвертора. В итоге образуется синусоидальная кривая тока, которая и нужна для работы.

Тормозной ключ нужен для режима реостатного торможения.

Кроме того, имеются датчики токов и напряжений, который нужны для постоянного анализа за текущими показаниями и при необходимости их регулировки. Помимо этого прибор оборудован защитой от перепадов напряжения, сверхвысоких токов и коротких замыканий.

## **Расчетная часть**

### **2.1 Построение математической модели асинхронного двигателя**

Первоначально необходимо составить структурную и функциональную схемы для объекта. Она будет составлена на основе анализа всех элементов системы и включения их в одну схему с указанием значений коэффициентов каждого звена.

Дифференциальное уравнение электродвигателя:

$$k_m U + k_b \omega - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

Исходя из уравнения структурная схема вентильного каскада показана на рисунке 2.1.

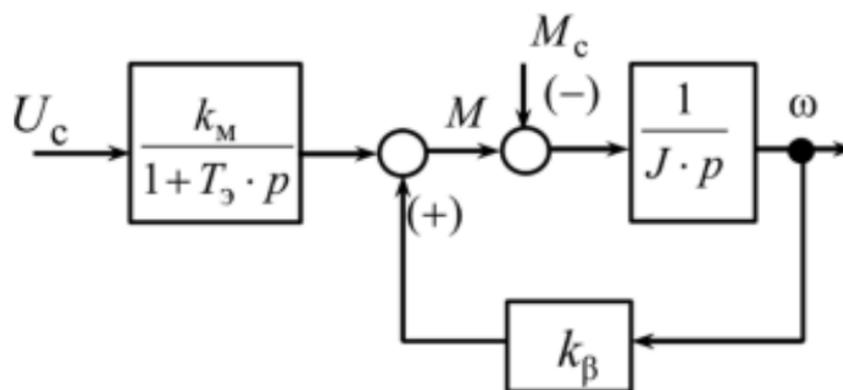


Рисунок 2.1 – Структурная схема асинхронного двигателя

На рисунке 2.1 показана структурная схема асинхронного вентильного каскада. Изменение напряжения на обмотках статора приводит к изменению момента.

Передаточная функция асинхронного двигателя состоит из электромагнитной и механической части, двух массовой системы электропривода, исходя из вышеописанной линеаризованной системы уравнений.

Передаточная функция асинхронного двигателя выглядит следующим образом:

$$G(s) = \frac{K_1}{T_{эм} s^2 + s}, \quad (2)$$

где  $T_{эм} = \frac{1}{\omega_0 s_{кр}}$  – электромагнитная постоянная времени;

$\beta$  – коэффициент жесткость механической характеристики;

$J$  – момент инерции;

$$K_1 = \frac{\beta}{J} = \frac{9,5}{0,19} = 50;$$

$$T_{эм} = \frac{1}{w_0 s_{кр}} = \frac{1}{324 \cdot 0,17} = 0,018c$$

Подставляя все значения в формулу (2) передаточная функция асинхронного двигателя имеет вид:

$$G(s) = \frac{50}{0,018s^2 + s} \quad (2)$$

Полученную передаточную функцию необходимо исследовать на устойчивость. Для этого необходимо получить график переходного процесса.. Исследование проведено при помощи программного обеспечения Matlab, показано на рисунке 2.2

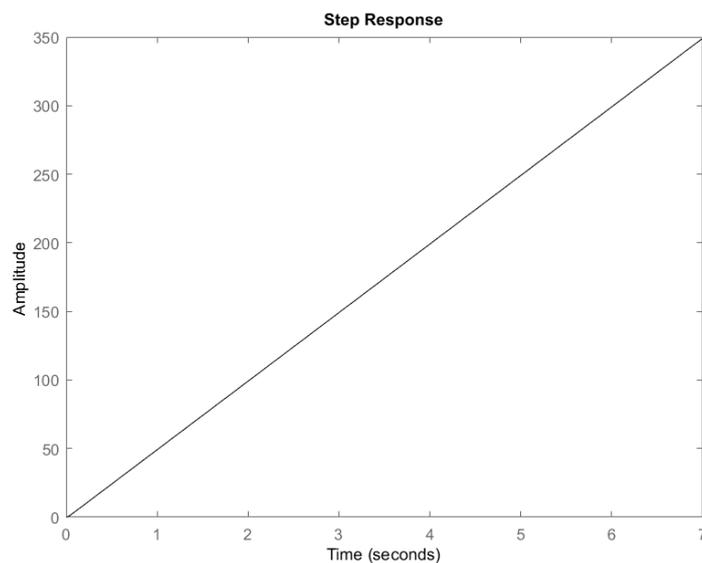


Рисунок 2.2 – График переходного процесса разомкнутой системы

На рисунке 2.2 показан график переходного процесса разомкнутой системы исходя из которого видно, что система находится на границе устойчивости.

Для дополнительной проверки найдены полюса передаточной функции (2) при помощи команды `pole`, показано на рисунке 2.3.

```
>> pole(g)

ans =

         0
    -55.5556
```

Рисунок 2.3 – Полюса разомкнутой системы

На рисунке 2.3 показаны полюса разомкнутой системы.

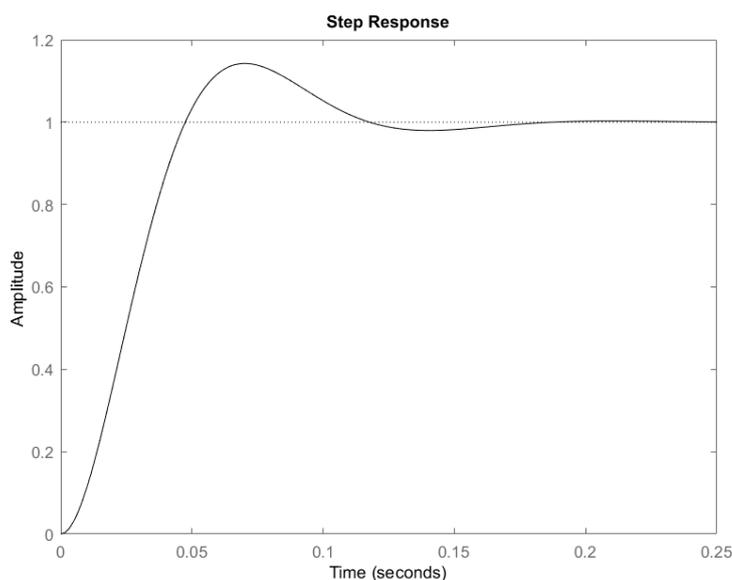
Из теоремы первого метода Ляпунова следует, что динамическая система на границе устойчивости, если она имеет хотя бы один нулевой или несколько только мнимых полюсов, при отрицательности остальных полюсов.

Для того чтобы система из неустойчивой или системы находящейся на границе устойчивости сделать устойчивой необходимо добавить регулятор и обратную связь. Обратная связь представляет собой замкнутый контур цепи. Сигнал с выхода нашей системы мы повторно подаем в саму систему.

После добавления обратной связи передаточная функция (2) выглядит следующим образом:

$$G(s) = \frac{50}{0,018s^2+s+50} \quad (3)$$

Таким образом из разомкнутой системы была сделана замкнутая. Необходимо проверить ее на устойчивость. Переходной процесс выглядит следующим образом и показана на рисунке 2.4.



## Рисунок 2.4. – График переходного процесса замкнутой системы

На рисунке 2.4 показан график переходного процесса замкнутой системы исходя из которого видно, что система устойчива.

Для дополнительной проверки найдены полюса передаточной функции (3) при помощи команды `pole`, показана на рисунке 2.5.

```
>> pole(g)
ans =
-27.7778 +44.7903i
-27.7778 -44.7903i
```

## Рисунок 2.5 – Полюса замкнутой системы

На рисунке 2.5 показаны полюса замкнутой системы. Из теоремы первого метода Ляпунова следует, что система устойчива, если все ее полюса имеют отрицательные действительные части.

## 2.2 Критерий Найквиста

Система является устойчивой так как ЛАЧХ проходит точку среза раньше прохождения ФЧХ точки Пи. График ЛАЧХ и ЛФЧХ изображен на рисунке 2.6.

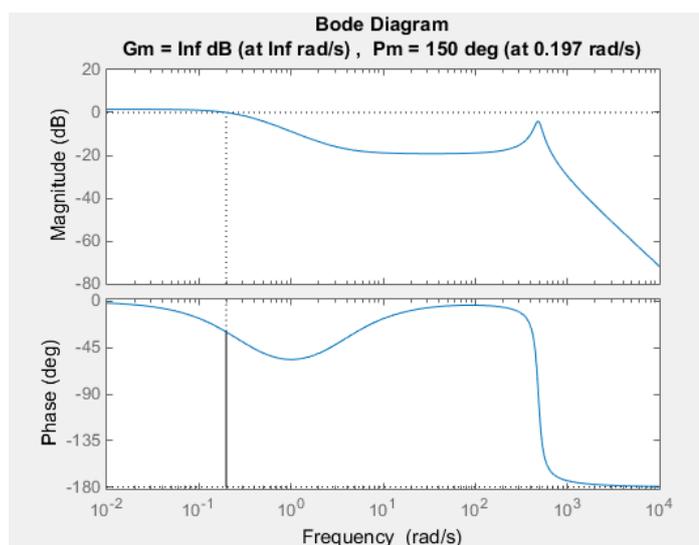


Рисунок 2.6 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы

На рисунке 2.6 показан график ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы для определения устойчивости по логарифмическому критерию устойчивости Найквиста.

Также с помощью этого критерия можно определить запас устойчивости. Для этого подбираем частоту, при которой ФЧХ принимает значение  $\pi$ . Берем отрицательным это значение, и из него находим амплитудный запас устойчивости. Согласно рисунку 2.6 он бесконечен.

Фазовый запас определяется, когда АЧХ становится нулевым. На рисунке видно что запас составляет  $5\pi/6$  или же 150 градусов.

### 2.3 Оценки качества замкнутой системы

На рисунке 2.7 изображен переходной процесс системы, с обозначенными на нем параметрами. Они являются оценкой качества.

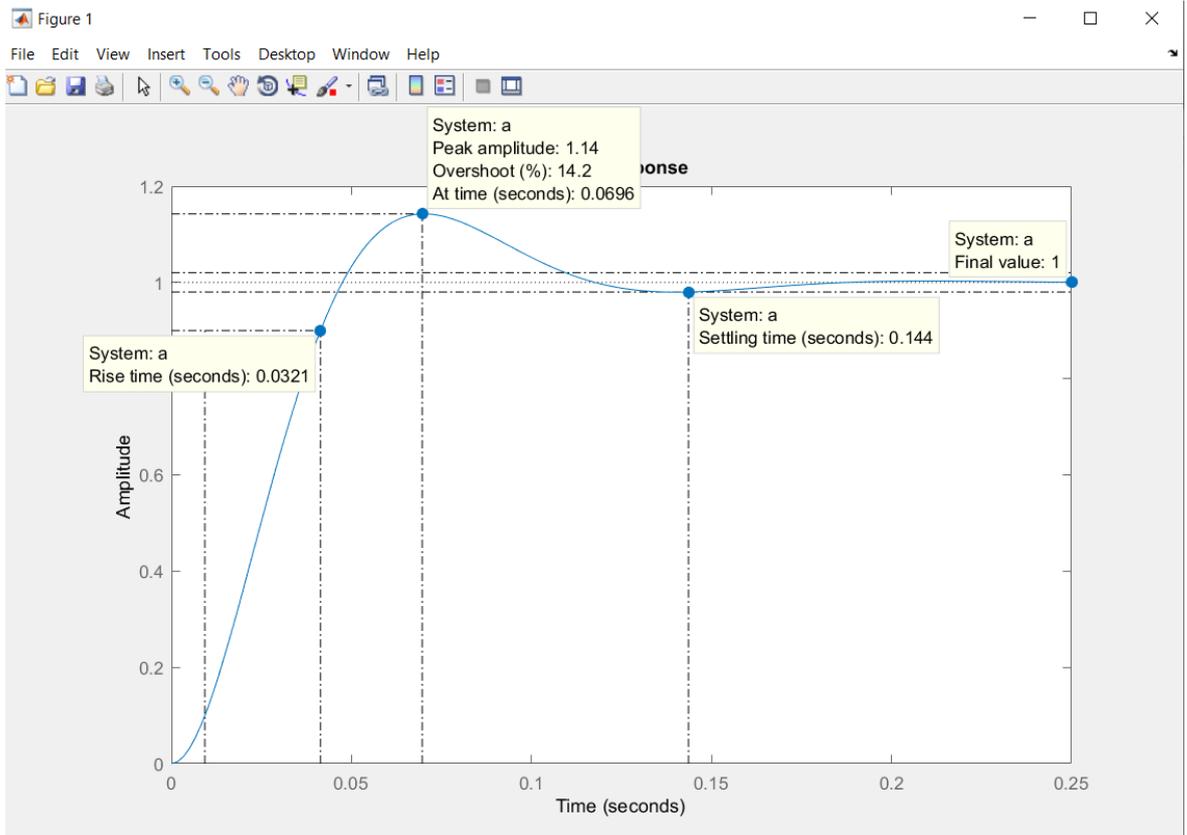


Рисунок 2.7 - Переходной процесс

На рисунке 2.7 показан переходной процесс системы. Отсюда следует, что:

Время регулирования,  $T_{SET} = 0.144\text{c}$ ;

1) Время нарастания,  $T_R=0.321\text{ c}$ ;

2) Время достижения максимума,  $T_p=0.06\text{ c}$ ;

4) Перерегулирование,  $P_{ov} = 14.2\%$ ;

5) Число колебаний – 1;

6) Частота колебаний:  $\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T} = 0.48$  ;

7) Колебательность:  $\mu = \frac{\Delta y_{\max 2}}{\Delta y_{\max 1}} * 100\% = \frac{0.97}{0.68} * 100\% = 4.41\%$  ;

8) Статическая ошибка:  $\epsilon_{ss} = y_{ss} - y = 0$  ;

9) Декремент затухания колебаний:  $\chi = \frac{|y_{\max 1} - y_{ss}|}{|y_{\max 2} - y_{ss}|} = \frac{1.88 - 1}{1.69 - 1} = 1.275$  .

Таблица 2.1 – Оценки качества замкнутой системы

Оценка качества		Значение	Соответствие требованиям
Время регулирования (Settling time)	$T_{set}$	0.144 с	
Перерегулирование (Overshoot)	$P_{ov}$	14.2 %	Не соответствует
Время достижения максимума (peak time)	$T_p$	0.06	
Время нарастания (rise time)	$T_R$	0.321	
Установившаяся ошибка (steady-state error)	$\epsilon_{ss}$	0	Соответствует
Число колебаний	$M$	1	Соответствует
Колебательность (Oscillation)	$\mu$	4.41 %	Не соответствует
Частота колебаний (oscillation frequencies)	$\omega_{osc}$	$0.48 \text{ с}^{-1}$	
Декремент затухания	$\chi$	1.275	

В таблице 2.1 показаны оценки качества замкнутой системы вентильного каскада.

#### 2.4 Построение ПИД-регулятора для системы асинхронного вентильного каскада

Постановка задачи: для системы асинхронного вентильного каскада необходимо синтезировать типовой ПИД-регулятор, при которой квадратичная интегральная оценка качества становится минимальной:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min \quad (4)$$

Система с Р-регулятором.

Для построения системы асинхронного вентильного каскада с Р-регулятором необходимо собрать схему в среде Simulink, как показано на рисунке 2.8.

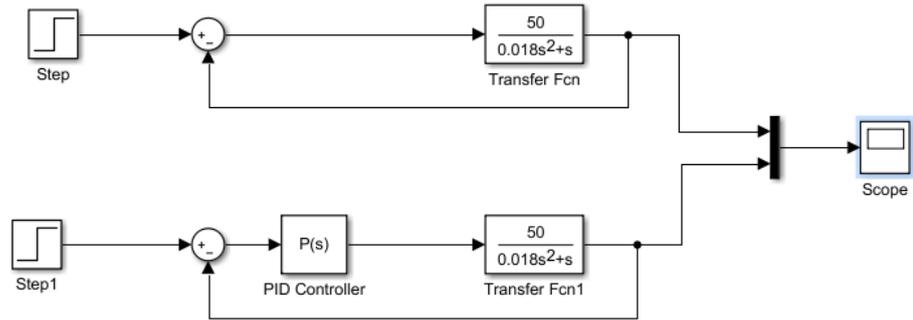


Рисунок 2.8 – модель с P-регулятором в среде Simulink

На рисунке 2.8 показана собранная схема системы асинхронного каскада с P-регулятором, также собрана схема асинхронного каскада без регулятора для сравнения.

Далее подставив параметры P-регулятора, получим графики переходного процесса системы с P-регулятором и без, показаны на рисунке 2.9

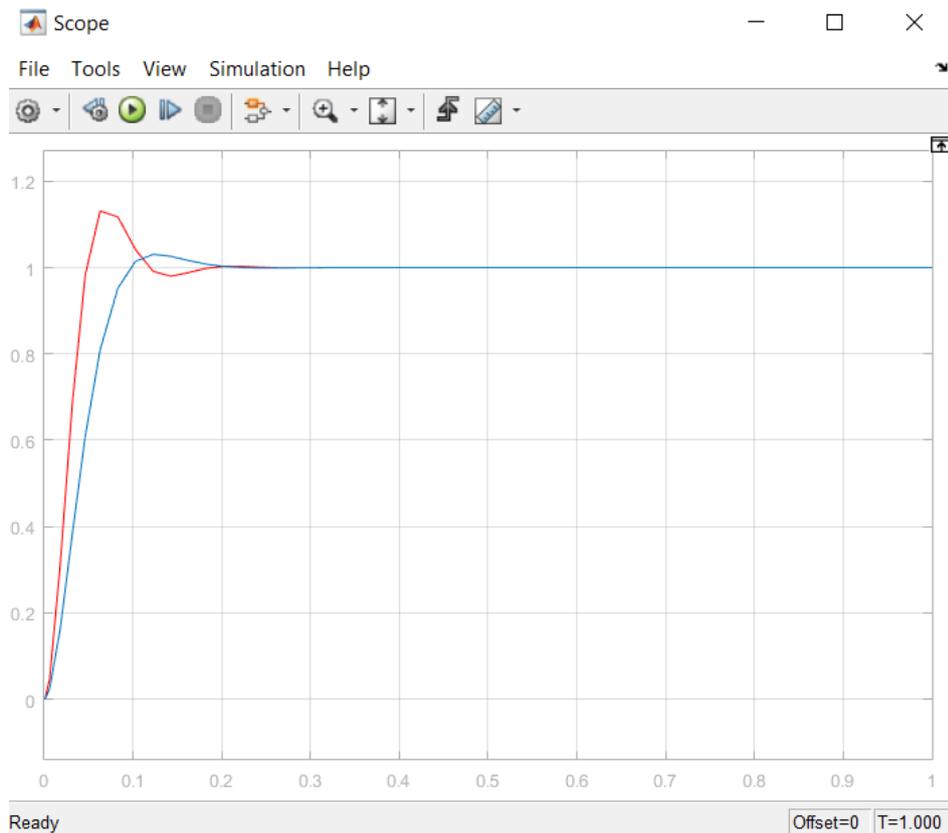


Рисунок 2.9 – Переходной процесс системы с P-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.9 показан переходной процесс системы с P-регулятором и без регулятора. Система с P-регулятором показана синим цветом, без регулятора – красным.

Для более точного сравнения систем выведены основные оценки качества, показаны на рисунке 2.10.

	Tuned	Block
Rise time	0.0416 seconds	0.0605 seconds
Settling time	0.132 seconds	0.155 seconds
Overshoot	8.77 %	3.07 %
Peak	1.09	1.03
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	60 deg @ 32.1 rad/s	67.3 deg @ 23.2 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 2.10 – сравнение систем с P-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.10 показано детальное сравнение систем с P-регулятором и без регулятора. Как видно из рисунка, перерегулирование уменьшилось с 16.8% до 8.77%, что соответствует нормам. Время регулирования и время нарастания при этом изменились незначительно.

Для построения системы асинхронного вентильного каскада с PI-регулятором необходимо собрать схему в среде Simulink, как показано на рисунке 2.11.

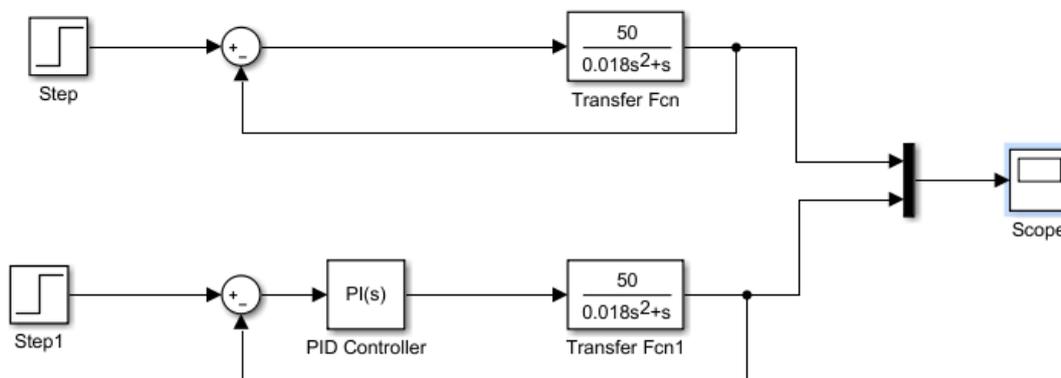


Рисунок 2.11 - модель с PI-регулятором в среде Simulink

На рисунке 2.11 показана собранная схема системы асинхронного каскада с PI-регулятором, также собрана схема асинхронного каскада без регулятора для сравнения.

Далее подставив параметры PI-регулятора, получим графики переходного процесса системы с PI-регулятором и без, показаны на рисунке 2.12

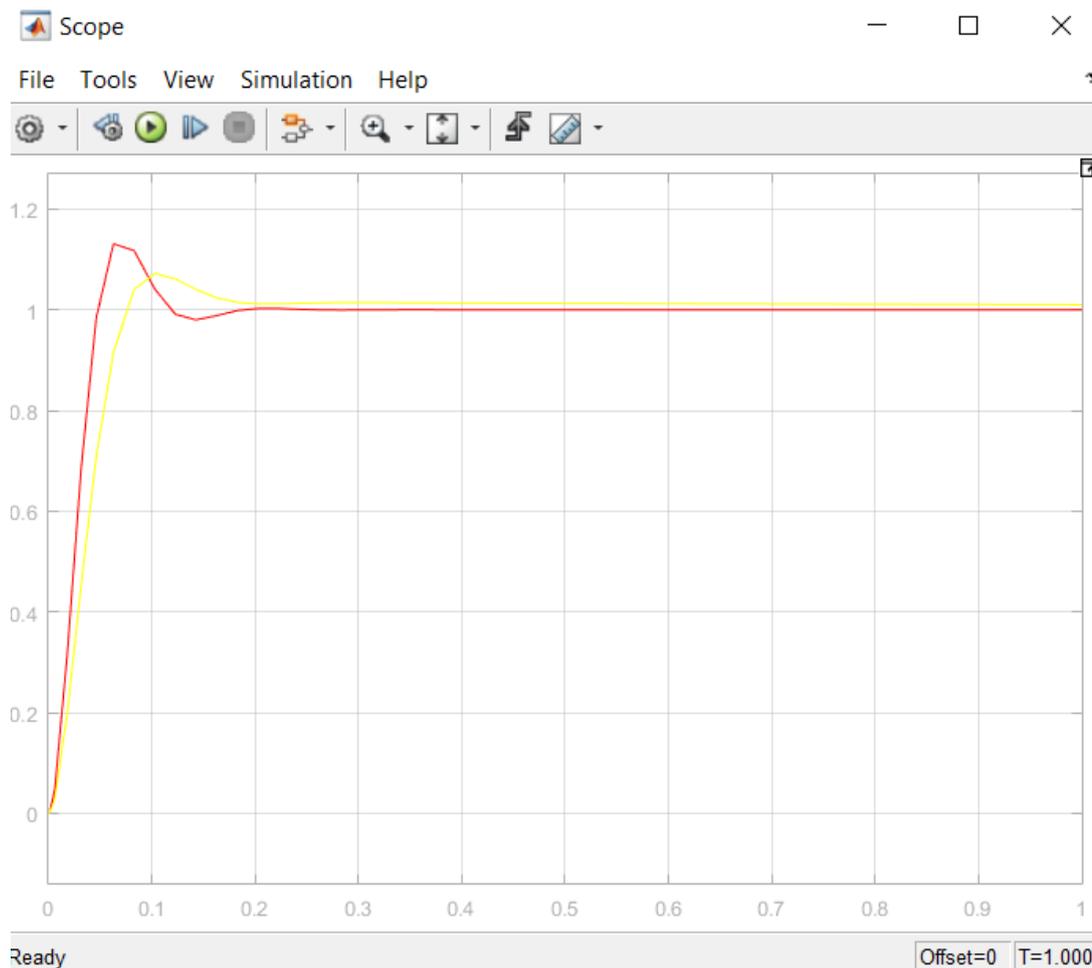


Рисунок 2.12 – Переходной процесс системы с PI-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.12 показан переходной процесс системы с PI-регулятором и без регулятора. Система с PI-регулятором показана жёлтым цветом, без регулятора – красным.

Для более точного сравнения систем выведены основные оценки качества, показаны на рисунке 2.13.

	Tuned	Block
Rise time	0.0492 seconds	0.0315 seconds
Settling time	0.169 seconds	0.118 seconds
Overshoot	7.23 %	16.8 %
Peak	1.07	1.17
Gain margin	-Inf dB @ 0 rad/s	-Inf dB @ 0 rad/s
Phase margin	62.9 deg @ 27.2 rad/s	52.5 deg @ 40.4 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 2.13 – сравнение систем с PI-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.13 показано детальное сравнение систем с PI-регулятором и без регулятора. Как видно из рисунка, перерегулирование уменьшилось с 16.8% до 7.23%, что соответствует нормам. Время регулирования и время нарастания при этом изменились незначительно.

Система с PID-регулятором.

Для построения системы асинхронного вентильного каскада с PID-регулятором необходимо собрать схему в среде Simulink, как показано на рисунке 2.14.

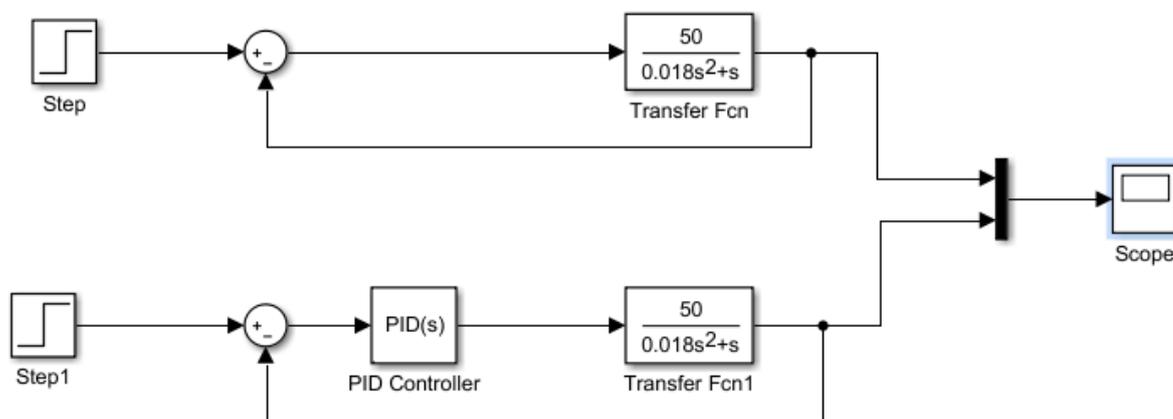


Рисунок 2.14 - модель с PID-регулятором в среде Simulink

На рисунке 2.14 показана собранная схема системы асинхронного каскада с PID-регулятором, также собрана схема асинхронного каскада без регулятора для сравнения.

Далее подставив параметры PID-регулятора, получим графики переходного процесса системы с PID-регулятором и без, показаны на рисунке 2.15.

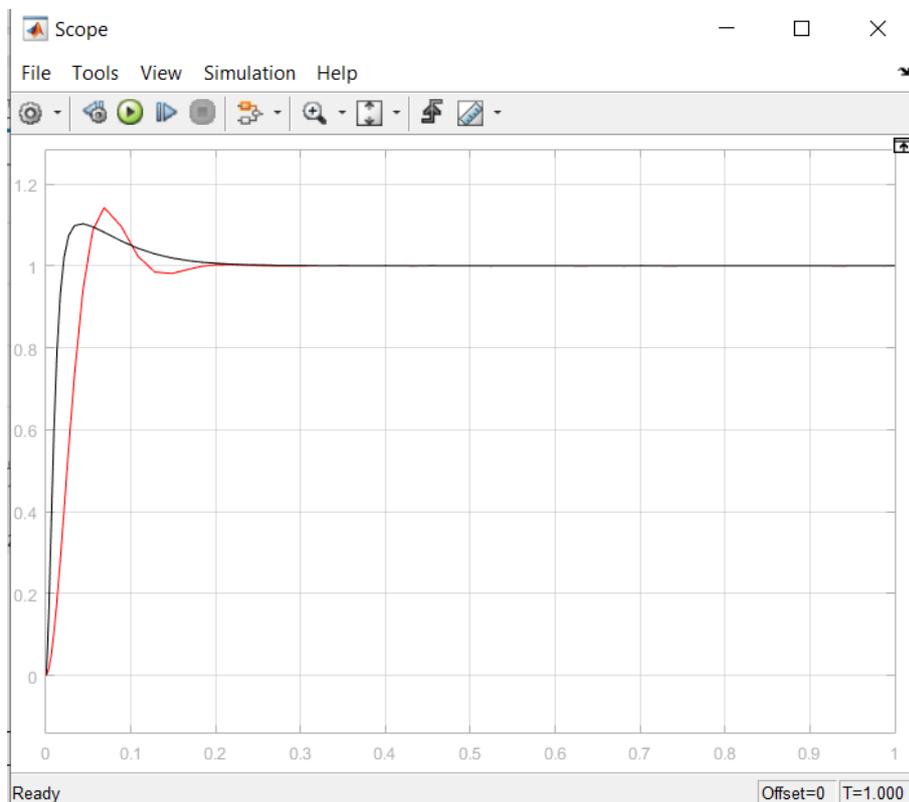


Рисунок 2.15– Переходной процесс системы с PID-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.15 показан переходной процесс системы с PID-регулятором и без регулятора. Система с PID-регулятором показана черным цветом, без регулятора – красным.

Для более точного сравнения систем выведены основные оценки качества, показаны на рисунке 2.16.

	Tuned	Block
Rise time	0.0133 seconds	0.0315 seconds
Settling time	0.146 seconds	0.118 seconds
Overshoot	10.3 %	16.8 %
Peak	1.1	1.17
Gain margin	-Inf dB @ 0 rad/s	-Inf dB @ 0 rad/s
Phase margin	69 deg @ 98.9 rad/s	52.5 deg @ 40.4 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 2.16 – сравнение систем с PID-регулятором и без регулятора

На рисунке 2.16 показано детальное сравнение систем с PID-регулятором и без регулятора. Как видно из рисунка, перерегулирование уменьшилось с 16.8% до 10.3%, что соответствует нормам. Время регулирования и время нарастания при этом изменились незначительно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе был рассмотрен технологический процесс системы асинхронного вентильного каскада. Проведен обзор на классификацию вентильных каскадов, обосновано преимущество выбора асинхронного вентильного каскада. В качестве объекта управления был выбран асинхронный вентильный каскад, применяемый на месторождениях компании Vuzachi Operating. Были выбраны средства автоматизации для процесса с асинхронным вентильным каскадом. На основе существующих структурных схем и передаточных функций всех звеньев асинхронного вентильного каскада, была получена математическая модель объекта управления. Для полученной математической модели был произведен анализ переходного процесса, получены прямые и косвенные оценки качества. Были рассчитаны предельные коэффициенты запаса устойчивости по критерию Найквиста. Система без регулятора не приходила к заданному значению. Для улучшения технологического процесса был построен ПИД-регулятор. В качестве оценки влияния ПИД-регулятора на системы также был построен П-регулятор и ПИ-регулятор. Система с ПИД-регулятором, по сравнению с системами П-регулятором и ПИ-регулятором, приходит к установившемуся значению, сделав систему точной. При этом система с ПИД-регулятором также превосходит систему с П-регулятором и ПИ-регулятором в быстродействии, и уменьшении процента перерегулирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления с микроЭВМ. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1987. -320с
- 2 Воронов А.А. Теория автоматического управления. Часть 1. - Москва: Высшая школа, 1986. – 367 с
- 3 Воронов А. А. Теория автоматического управления. Часть 2. - Москва: Высшая школа, 1986. – 367 с
- 4 И.В. Жежеленко, Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 375с.
- 5 I.Doroshchenko, V.Zakharenko, Simulation Model of an Asynchronous Machine with Wound Rotor in Matlab Simulink. – E3S Web Conf., Volume 288,2021
- 6 T.Baranenko, V.Saravas, Spectral composition of input voltage of the asynchronous drive with valve cascade converter. - International Journal of Control and Intelligent, Vol. 12, 2015. – С.41-50

**Протокол**

**о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)**

**Автор:** Ергалиев Милат

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада

**Научный руководитель:** Нурлан Сарсенбаев

**Коэффициент Подобия 1:** 2.7

**Коэффициент Подобия 2:** 1.5

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 4

**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*



## РЕЦЕНЗИЯ

На дипломный проект студента 4 курса Казахского национального исследовательского технического университета по специальности 5B070200 –Автоматизация и управление **Ергалиева Милата Дулатовича**, на тему: «Разработка и исследование системы асинхронного вентильного каскада»

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ:

На сегодняшний день любое технологические оборудования в промышленности невозможно представить без элементов автоматизации. Автоматизация является неотъемлемой частью любой сферы производства. Во многих технологических процессах важнейшую играет превращения электрической энергии в механическую, которую невозможно представить без асинхронного вентильного каскада.

В данном дипломном проекте на основе теоретического материала был рассмотрен принцип работы асинхронного вентильного каскада. Также были рассмотрены существующие виды вентильного каскада и были приведены основные различия. По существующим структурным схемам и передаточным функциям всех звеньев асинхронного каскада, была получена математическая модель. Для полученной математической модели был произведен анализ переходного процесса, получены прямые и косвенные оценки качества.

На основе полученных оценок качества была выполнена постановка задачи и был построен П, ПИ, ПИД регуляторы.

Дипломная работа оформлена согласно с требованиями ГОСТ, предъявляемых к оформлению учебных работ.

**К дипломной работе имеются следующие замечания:**

- не обоснован выбор новых контроллеров,
- некоторые графические изображения не четкие.

#### Оценка работы

Дипломный проект соответствует требованиям, актуален и имеет практическую значимость, дипломный проект выполнен на оценку 75% «хорошо», а дипломант **Ергалиев Милат Дулатович** заслуживает присвоения ему академической степени «бакалавр» по специальности «5B070200– Автоматизация и управление»

Рецензент

Доктор PhD зав. кафедрой

ЭМЭП, АУЭИС

Шыныбай Ж-С

(подпись)

«    »    2022 г.

### **Отзыв научного руководителя**

На дипломный проект студента 4 курса Казахского национального исследовательского технического университета по специальности 5В070200 – Автоматизация и управление **Ергалиева Милата Дулатовича**, на тему: «Разработка и исследование асинхронного вентильного каскада»

В данном дипломном проекте был описан асинхронный вентильный каскад, применяемый для асинхронного электродвигателя с целью смягчения пуска и регулирования скорости. По функциональной схеме изучаемого объекта были подобраны технические средства автоматизации с указанием их технических характеристик и принципов работы. С помощью математического описания элементов структурной схемы, были рассчитаны передаточные функции замкнутой и разомкнутой системы. Моделирование работы системы проводилось в среде «MATLAB» с получением графика переходного процесса. Основываясь на результатах моделирования был проведен анализ устойчивости системы, прямых оценок качеств и был синтезирован регулятор.

Дипломная работа оформлена согласно с требованиями ГОСТ, предъявляемых к оформлению учебных работ.

Дипломный проект выполнен **Ергалиевым Милатом** самостоятельно. Автором был рассмотрен принцип работы асинхронного вентильного каскада. По структурным схемам и передаточным функциям была получена математическая модель, после чего анализ переходного процесса и были получены оценки качества на основе которых был построен регулятор.

#### **Оценка работы**

Дипломный проект соответствует требованиям, актуален и имеет практическую значимость. Дипломант **Ергалиев Милат Дулатович** заслуживает присвоения ему академической степени «бакалавр» по специальности «5В070200 – Автоматизация и управление»

Научный руководитель



Сарсенбаев Н.С.