

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тульский государственный университет»

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ**

по дисциплине
ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Разработал:

ст. гр. 230711

Павлова В.С.

Руководитель:

проф. каф. ИБ

Фомичев А.А.

Тула, 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 АНАЛИЗ ЗАДАНИЯ	4
1.1 Содержательное описание системы автоматического регулирования	4
1.2 Изучение требований к качеству функционирования системы и точности регулирования при заданных входных сигналах.....	5
1.3 Выводы.....	5
2 СОСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСХОДНОЙ АСР.....	6
2.1 Выделение функционально значимых элементов системы и их классификация	6
2.2 Классификация объекта управления.....	7
2.3 Классификация системы управления.....	8
2.4 Выводы.....	9
3 ПЕРЕВОД ИНЖЕНЕРНОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСР НА ЯЗЫК АБСТРАКТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	10
3.1 Формализация содержательного описания всей системы и отдельных функциональных элементов	10
3.2 Структурная схема САР	10
3.3 Выводы.....	11
4 КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ АСР	12
4.1 Определение передаточной функции разомкнутой системы по каналу управления и по возмущению.....	12
4.2 Построение временных характеристик.....	12
4.3 Построение частотных характеристик.....	15
4.3.1 Амплитудная частотная характеристика	15
4.3.2 Фазовая частотная характеристика	16
4.4 Исследование устойчивости АСР	17
4.5 Исследование точности АСР в установившемся режиме	19
4.6 Постановка задачи синтеза.....	19
4.7 Выводы.....	20
5 СИНТЕЗ ФАЗОКОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА.....	21
5.1 Выбор способа включения, структуры и синтез передаточной функции фазокорректирующего устройства АСР	21
5.2 Синтез ПД-регулятора.....	22
5.2.1 Определение области устойчивости по методу Гурвица	22
5.2.2 Определение оптимальных параметров ПД-регулятора	23
5.3 Анализ скорректированной САР.....	24
5.4 Выводы.....	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26

Согласовано:		
Взам. инв. №		
Подпись и дата		
Инв. № подл.	Н. контроль	
	Гл. спец.	
	Проверил	Фомичев А.А.
	Разработал	Павлова В.С.
	Утв.	

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ			
Изм.	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата				
Н. контроль						Система автоматического регулирования скорости вращения двигателя	Стадия	Лист	Листов
Гл. спец.								3	31
Проверил	Фомичев А.А.						ТулГУ, гр. 230711		
Разработал	Павлова В.С.								
Утв.									

ВВЕДЕНИЕ

Тенденцией развития современной промышленности является появление множества автоматических систем, которые производят управление физическими процессами в различных областях техники. Эти системы включают в себя механические, электрические, электромагнитные и другие компоненты, образуя сложный комплекс взаимодействующих компонентов. Понимание принципов функционирования таких систем становится ключевым навыком для современных технических специалистов.

В данной курсовой работе рассматривается система автоматического регулирования скорости вращения двигателя. Целью данной курсовой работы является закрепление, углубление и обобщение знаний, полученных при изучении курса «Основы теории управления», а также развитие навыков их применения при решении задач управления автоматическими системами с использованием электронных вычислительных машин.

В рамках данной курсовой работы необходимо провести анализ статических и динамических свойств исходной системы автоматического регулирования, который включает в себя исследование устойчивости системы и качества регулирования. По результатам анализа ставится задача синтеза – выбор и расчёт корректирующего устройства, позволяющего повысить точность системы и достичь предъявленных к ней требований. После решения задачи синтеза необходимо провести повторный анализ скорректированной системы и сделать выводы о проделанной работе.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							3
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

1 АНАЛИЗ ЗАДАНИЯ

1.1 Содержательное описание системы автоматического регулирования

Принципиальная схема САР скорости вращения двигателя из альбома заданий [1] представлена на рисунке 1.

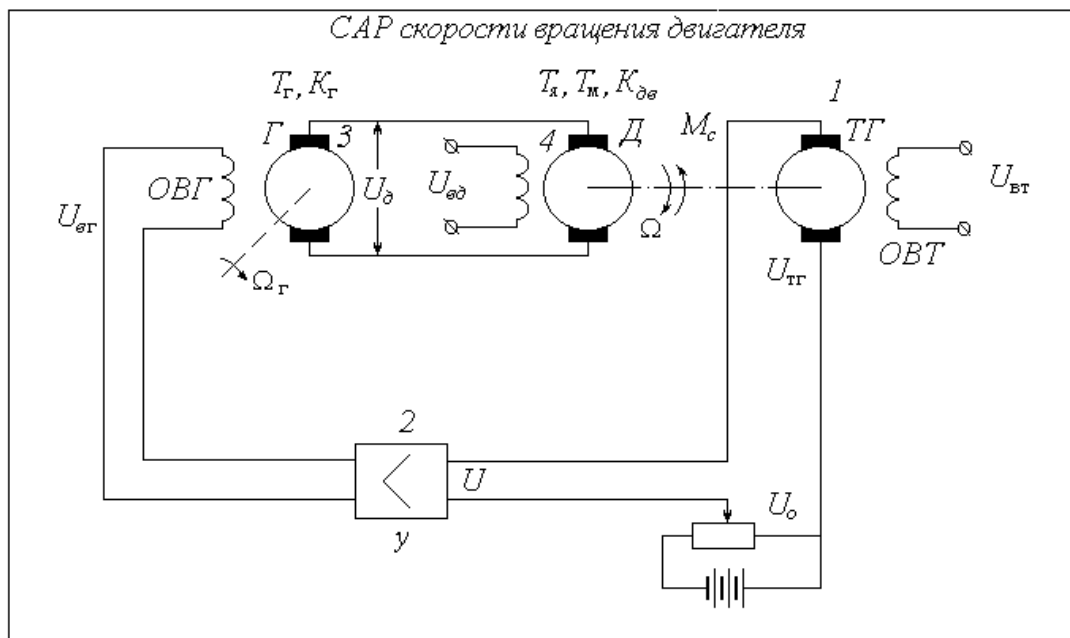


Рисунок 1 – Принципиальная схема САР скорости вращения двигателя

В данной системе задача регулятора состоит в том, чтобы поддерживать число оборотов двигателя Δ в заданных пределах при изменении нагрузки. Нагрузкой двигателя является момент сопротивления на его валу. Для измерения скорости вращения двигателя применяется тахогенератор ТГ , создающий напряжение $U_{\text{т}}$, пропорциональное числу оборотов. Напряжение U_o , соответствующее положению движка потенциометра, определяет заданное значение скорости двигателя. Напряжение $U_{\text{рас}}$ характеризует отклонение числа оборотов двигателя от заданного числа оборотов.

Генератор Γ , входящий в состав системы, представляет собой усилитель мощности. При неравенстве напряжений $U_{\text{т}}$ и U_o появляется напряжение на обмотке возбуждения генератора ОВГ , подключенной к выходу предварительного усилителя Y , которое пропорционально разности $U_o - U_{\text{т}}$. В результате число оборотов двигателя изменяется так, чтобы рассогласование $U_{\text{рас}}$ уменьшилось.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							4
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

Внешним воздействием в системе является сопротивление нагрузки, на котором падает часть напряжения, поступающего с генератора.

Допустим, что напряжение U_{pac} равно нулю. Тогда равно нулю также напряжение на обмотке возбуждения генератора и на якоре двигателя, следовательно, двигатель не вращается. Однако это противоречит исходному предположению, что в системе установилась некоторая ненулевая скорость вращения двигателя. Таким образом, предположение $U_{pac} = 0$ неверно и установившаяся ошибка в системе не равна нулю. Следовательно, можно сделать вывод о том, что система является статической.

1.2 Изучение требований к качеству функционирования системы и точности регулирования при заданных входных сигналах

Параметры функциональных элементов САР, взятые в соответствии с вариантом задания [1], приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры функциональных элементов САР

№ п/п	Мощность системы	Звенья линейной части системы						
		1	2	3		4		
		$K_{гг}$	K_y	K_g	T_g	$K_{дв}$	T_m	T_y
		-	-	-	с	-	с	с
1	средняя	0,5	8	0,08	2	0,1	0,9	1,6

Внешние воздействия на САР, взятые в соответствии с вариантом задания [1], приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры функциональных элементов САР

№ п/п	Внешние воздействия		Требования		
	U_0	$U_{вд}$	в статике	в динамике	
	$U_{г1}(t)$	$U_{вд}I(t)$	C_0	$t_{пп}$	σ
	В	В	рад	с	%
1	2	0,4	0.02	3,9	30

1.3 Выводы

Задание на курсовую работу предполагает проектирование системы автоматического регулирования скорости вращения двигателя с учётом приведённого ряда требований, которые заданы во временной области.

2 СОСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСХОДНОЙ АСР

2.1 Выделение функционально значимых элементов системы и их классификация

В состав данной САР скорости вращения двигателя в соответствии с рисунком 1 входят следующие элементы:

- 1 – усилитель (У);
- 2 – тахогенератор (ТГ);
- 3 – электрический двигатель (Д);
- 4 – генератор (Г);

В данной системе *объектом управления* является электрический двигатель постоянного тока, обозначенный на схеме буквой Д. *Управляемая величина* в данной системе — это скорость вращения вала двигателя Д (об/мин). *Управляющим воздействием* является напряжение, которое снимается с якоря генератора Г и подается на якорь двигателя Д.

Измерительным устройством управляемой величины в данной системе является тахогенератор ТГ (рис. 1). Тахогенератор представляет собой обычный генератор, вал которого подсоединен к валу двигателя Д. В результате тахогенератор вырабатывает напряжение, пропорциональное скорости вращения вала двигателя Д. *Задающим воздействием* в данной системе является напряжение, а задающим устройством делитель, представляющий собой «переменное» сопротивление.

В данной схеме *сравнивающее устройство* в явном виде отсутствует. Сигнал рассогласования получается вычитанием. *Усилительным устройством* в данной САУ является предварительный усилитель У и генератор Г, представляющий собой усилитель мощности. *Возмущающими воздействиями* в данной системе являются: напряжение возбуждения обмотки тахогенератора; напряжение, выдаваемое постоянным источником; напряжение возбуждения обмотки двигателя; момент силы сопротивления; скорость вращения вала генератора. *Корректирующее устройство* в данной САУ отсутствует.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							6
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

На рисунке 2 приведена функциональная схема САР скорости вращения двигателя.

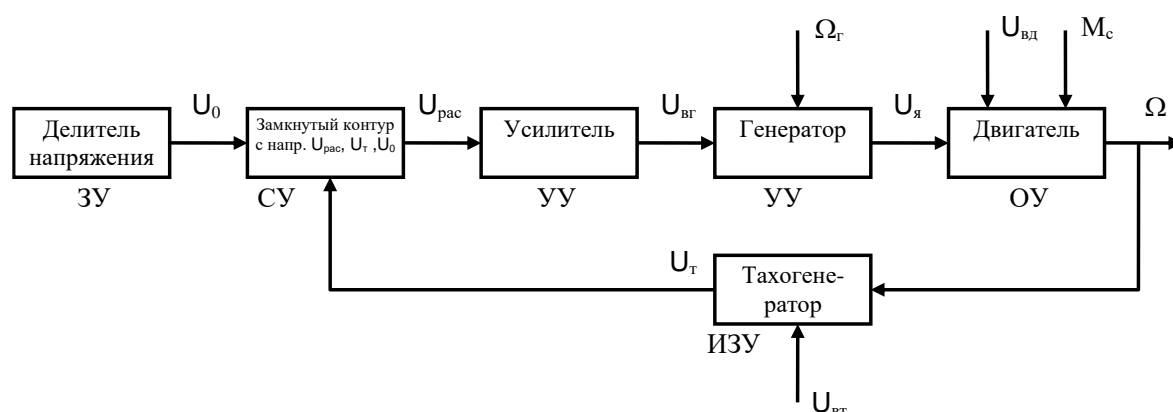


Рисунок 2 – Функциональная схема САР скорости вращения двигателя

2.2 Классификация объекта управления

Данная САР предназначена для поддержания скорости вращения двигателя, следовательно, объектом управления в ней является двигатель. Его, как динамическую систему, описывает следующая классификация:

- 1) По числу входных воздействий и выходных переменных данный объект является **одномерным**, то есть имеется один управляющий вход и один выход.
- 2) По условиям функционирования объект является **детерминированным**, то есть выход объекта определяется однозначно по текущему состоянию.
- 3) По способу задания области определения объект является **непрерывным**, то есть для данного объекта управления множество моментов времени является множеством вещественных чисел.
- 4) По реакции на внешнее воздействие в зависимости от промежутка времени, в котором происходит это воздействие, объект **стационарен**, так как его реакция на внешнее воздействие не зависит от времени.
- 5) Объект является системой с **сосредоточенными параметрами**, так как выход объекта можно однозначно определить через функцию состояния.
- 6) По числу степеней свободы объект является **конечным**, поскольку количество переменных состояния конечно.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							7
Изм.	Кол.уч.	Лист	№док.	Подпись	Дата		

7) По характеру математических соотношений, описывающих входные-выходные связи, данный объект является **линейным**, так как для него справедлив принцип наложения движения (суперпозиции).

8) Объект является **обыкновенной динамической системой**, так как он конечен, является системой с сосредоточенными параметрами, стационарен, непрерывен и линеен.

2.3 Классификация системы управления

Рассматриваемую систему автоматического регулирования описывает следующая классификация:

1) *По уровню автоматизации процессов в системе управления*: система автоматического управления, так как для её функционирования не требуется участие человека.

2) *По принципу формирования допустимого управления*: система по замкнутому циклу, так как управление организуется по отклонению на основе отрицательной обратной связи.

3) *По цели управления*: автоматическая система регулирования;

4) *По степени сложности объекта управления*: простая, так как объект управления представлен обыкновенной динамической системой;

5) *По объему информации для формирования допустимого управления*, обеспечивающего требуемое качество функционирования: обычная;

6) *По способу формирования допустимого управления в замкнутой системе*: с управлением по выходу;

7) *По типу задающего воздействия*: система стабилизации;

8) *По количеству контуров обратной связи*: одноконтурная;

9) *По числу уровней иерархии управления*: локальная;

10) *По наличию внутреннего источника энергии*: система непрямого действия, поскольку ей необходим вспомогательный источник энергии;

11) *По функциональному назначению*: система автоматического регулирования скорости вращения вала двигателя;

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		8

12) По способу задания области определения: непрерывная (аналоговая) система;

13) По характеру математических соотношений, описывающих входные-выходные связи: линейная.

2.4 Выводы

После проведения классификации установлено, что исследуемый объект управления является одномерным, стационарным, непрерывным и линейным. Теми же свойствами обладает и САР, которая является одноконтурной, обычной, с управлением по замкнутому циклу и непрямого действия.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							9
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

3 ПЕРЕВОД ИНЖЕНЕРНОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСР НА ЯЗЫК АБСТРАКТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1 Формализация содержательного описания всей системы и отдельных функциональных элементов

Для проведения анализа САР необходимо составить её математическую модель, описанную дифференциальными уравнениями. При этом точность описания математической модели непосредственным образом влияет на точность анализа системы, её проектирования и синтеза и вносит в её структуру сложность, что может сделать процесс вычислений более трудоёмким.

В процессе классификации было установлено, что исходная система является линейной, а, следовательно, для неё возможна линеаризация в малых отклонениях. Система обладает сосредоточенными параметрами, является непрерывной и стационарной. На основе данной классификации можно сделать вывод о возможности описания системы линейной моделью, в которой система описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. В классической линейной модели принято описывать систему и ее элементы не в дифференциальных уравнениях, а в терминах передаточных функций (отношения изображений по Лапласу выхода системы ко входу при нулевых начальных условиях), что по сути является переходом от дифференциальных уравнений к алгебраическим.

Таким образом, можно перейти к описанию математической модели системы в терминах передаточной функции.

3.2 Структурная схема САР

Составим структурную схему исследуемой САР на основе данных индивидуального задания [1]. Данная система состоит из четырех звеньев. Рассмотрим их и для каждого определим его передаточную функцию:

$$1) \text{Тахогенератор: } W_{\text{ТГ}}(p) = K_{\text{ТГ}} \quad (1)$$

$$2) \text{Усилитель: } W_{\text{У}}(p) = K_{\text{У}} \quad (2)$$

$$3) \text{Двигатель: } W_{\text{ДВ}}(p) = \frac{K_{\text{ДВ}}}{(T_{\text{М}}p + 1)(T_{\text{Я}}p + 1)} \quad (3)$$

						<i>ИБКР. 351000. 000 ПЗ</i>	Лист
							10
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

$$4) \text{ Генератор: } W_r(p) = \frac{K_r}{T_r p + 1} \quad (4)$$

На рисунке 3 приведена структурная схема САР скорости вращения двигателя.

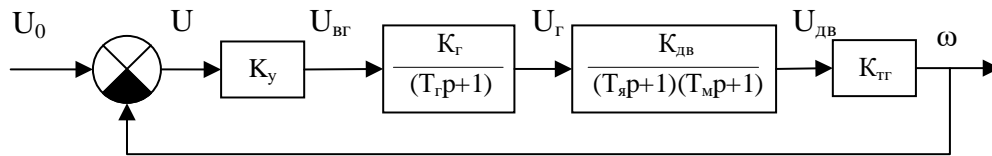


Рисунок 3 – Структурная схема САР скорости вращения двигателя

На рисунке 4 приведена структурная схема САР с учётом внешнего возмущения.

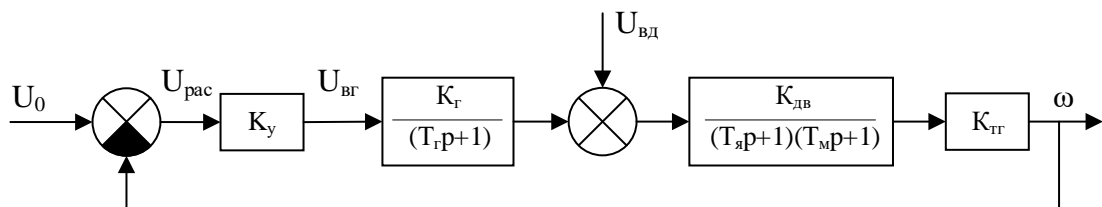


Рисунок 4 – Структурная схема исследуемой САР с учётом внешнего возмущения

Схема имитационного моделирования для исследования системы в среде Scilab представлена на рисунке 5.

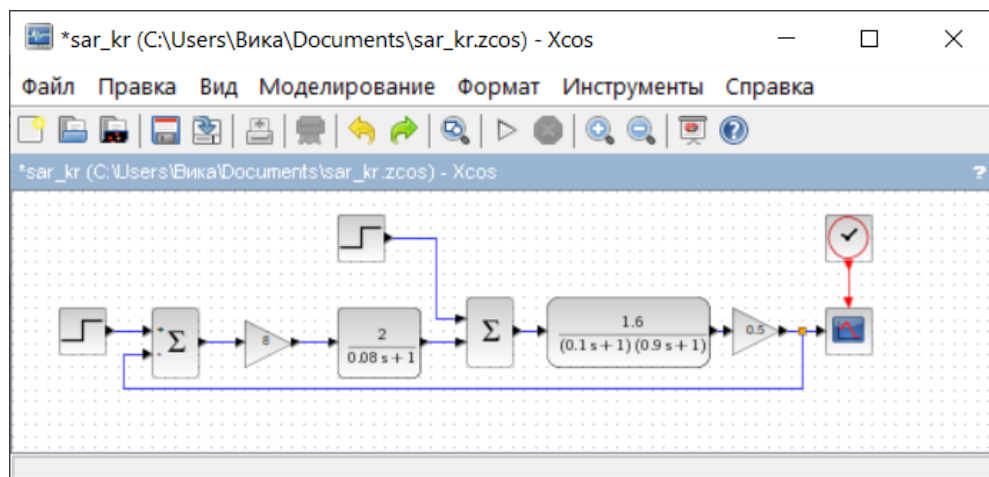


Рисунок 5 – Цифровая схема исследуемой САР

3.3 Выводы

В рамках данного раздела был выбран и обоснован язык описания модели исходной САР для последующего анализа, построена структурная схема САР и схема имитационного моделирования в цифровой среде Scilab Xcos.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							11
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

4 КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ АСР

4.1 Определение передаточной функции разомкнутой системы по каналу управления и по возмущению

Из рисунка 3 следует, что передаточная функция по каналу управления разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{K_y K_{\Gamma} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}}}{(T_{\Gamma} p + 1)(T_{\text{я}} p + 1)(T_{\text{м}} p + 1)} \quad (5)$$

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{8 * 2 * 1.6 * 0.5}{(0.08p + 1)(0.1p + 1)(0.9p + 1)} \quad (6)$$

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{12.8}{0.0072p^3 + 0.17p^2 + 1.08p + 1} \quad (7)$$

После записи передаточной функции по каналу управления классификация системы может быть дополнена тем, что она минимально фазовая (у неё отсутствует полином в числителе). Аналогичным образом запишем передаточную функцию разомкнутой системы по каналу возмущения:

$$W_{\text{возм}}(p) = \frac{K_{\text{дв}}}{(T_{\text{м}} p + 1)(T_{\text{я}} p + 1)} \quad (8)$$

$$W_{\text{возм}}(p) = \frac{1.6}{(0.9p + 1)(0.1p + 1)} \quad (9)$$

4.2 Построение временных характеристик

К временным характеристикам системы относятся:

- 1) переходная функция $h(t)$ – реакция на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях;
- 2) весовая функция $\omega(t)$ – это оригинал передаточной функции, то есть результат обратного преобразования Лапласа для передаточной функции [2].

Изображение единичного ступенчатого воздействия по Лапласу равно:

$$L\{1(t)\} = \frac{1}{p} \quad (10)$$

Тогда переходная функция будет определена по формуле (11):

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							12
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} \quad (11)$$

Весовая функция определяется по следующей формуле:

$$\omega(t) = L^{-1} \{W(p)\} \quad (12)$$

Определим переходную и весовую функции по каналу управления:

$$h(t) = 12.8 + 8e^{-10t} - 5e^{-12.5t} - 15.8e^{-1.1t} \quad (13)$$

$$\omega(t) = h'(t) = -80e^{-10t} + 62.5e^{-12.5t} + 17.38e^{-1.1t} \quad (14)$$

Графики переходной и весовой функций разомкнутой системы по каналу управления представлены на рисунках 6 и 7 соответственно.

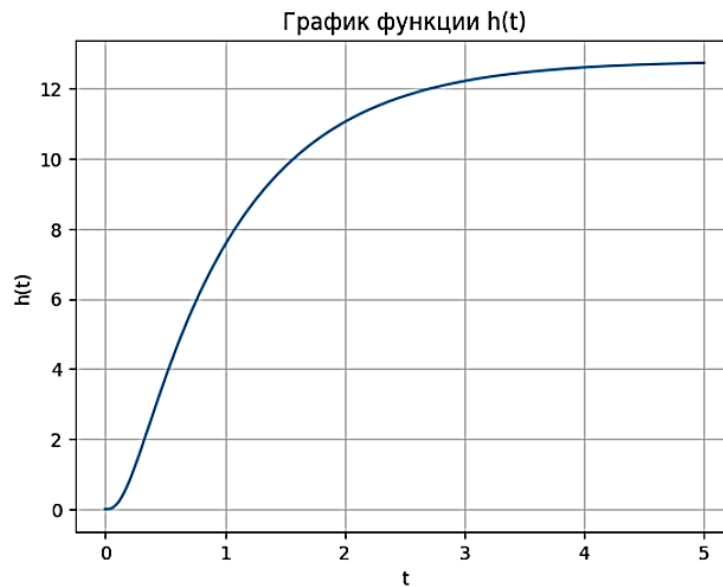


Рисунок 6 – График переходной функции разомкнутой системы по каналу управления

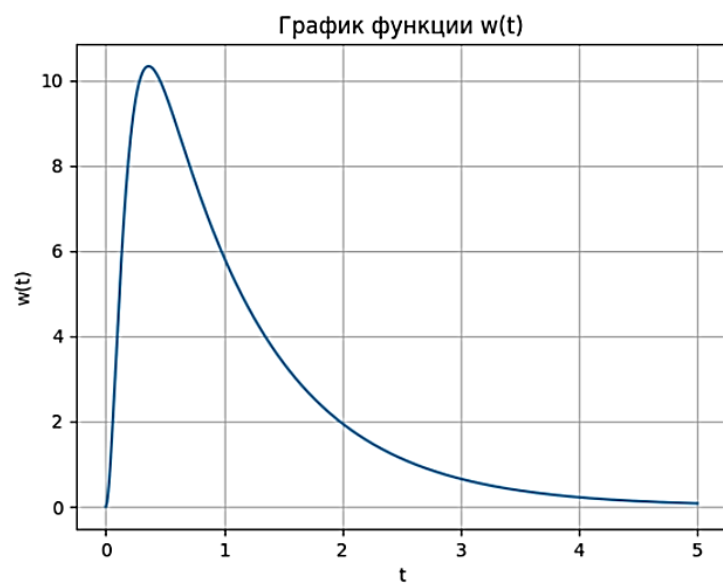


Рисунок 7 – График весовой функции разомкнутой системы по каналу управления

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							13
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

Определим переходную и весовую функции по каналу возмущения:

$$h(t) = 1.6 + 0.2e^{-10t} - 1.8e^{-1.1t} \quad (15)$$

$$\omega(t) = h'(t) = -2e^{-10t} + 1.98e^{-1.1t} \quad (16)$$

Графики переходной и весовой функций разомкнутой системы по каналу возмущения представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

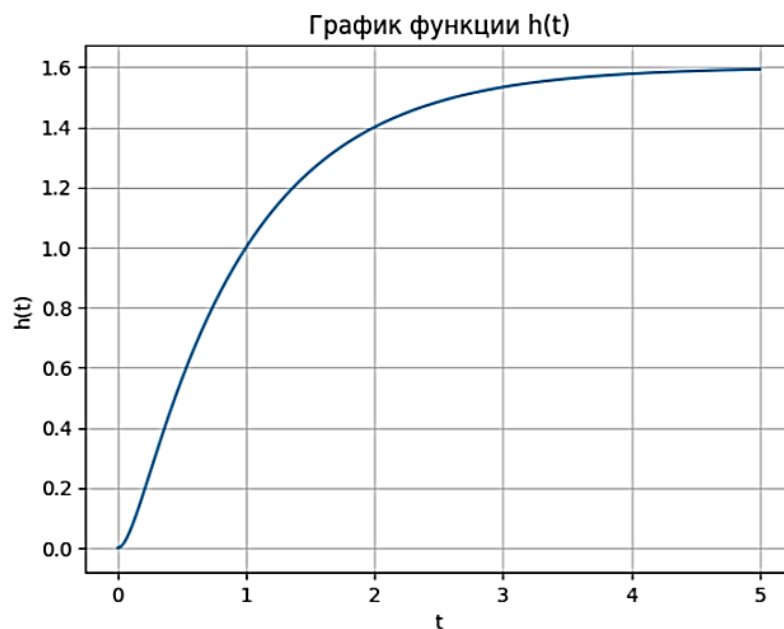


Рисунок 8 – График переходной функции разомкнутой системы по каналу возмущения

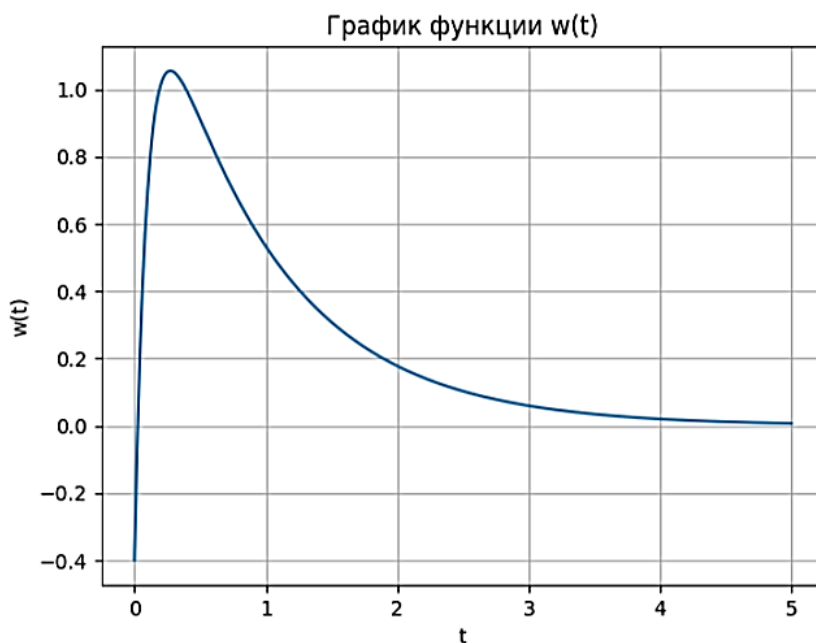


Рисунок 9 – График весовой функции разомкнутой системы по каналу возмущения

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		14

4.3 Построение частотных характеристик

Вычислим частотные передаточные функции для канала управления и возмущения, заменив в них оператор Лапласа p на $j\omega$. Соответствующие функции имеют вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{упр}}(j\omega) &= \frac{12.8}{0.0072(j\omega)^3 + 0.17(j\omega)^2 + 1.08j\omega + 1} = \\ &= \frac{12.8}{-0.17\omega^2 + 1 + j * (1.08\omega - 0.0072\omega^3)} \end{aligned} \quad (17)$$

$$W_{\text{возм}}(j\omega) = \frac{1.6}{-0.09\omega^2 + j\omega + 1} \quad (18)$$

4.3.1 Амплитудная частотная характеристика

Амплитудная частотная характеристика или АЧХ показывает зависимость отношения амплитуд колебаний на выходе и входе системы от частоты. АЧХ определяется по следующей формуле:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2 W(j\omega) + \text{Im}^2 W(j\omega)} \quad (19)$$

Тогда АЧХ для передаточной функции разомкнутой системы по каналу управления имеет вид:

$$\begin{aligned} A(\omega) = |W_{\text{упр}}(j\omega)| &= \left| \frac{12.8}{-0.17\omega^2 + 1 + j * (1.08\omega - 0.0072\omega^3)} \right| = \\ &= \frac{12.8}{\sqrt{(-0.17\omega^2 + 1)^2 + (1.08\omega - 0.0072\omega^3)^2}} \end{aligned} \quad (20)$$

АЧХ для передаточной функции разомкнутой системы по каналу возмущения определяется по следующей формуле:

$$A(\omega) = |W_{\text{возм}}(j\omega)| = \left| \frac{1.6}{-0.09\omega^2 + j\omega + 1} \right| = \frac{1.6}{\sqrt{(-0.09\omega^2 + 1)^2 - \omega^2}} \quad (21)$$

Графики АЧХ передаточной функций разомкнутой системы по каналу управления и возмущения представлены на рисунках 10 и 11 соответственно.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							15
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

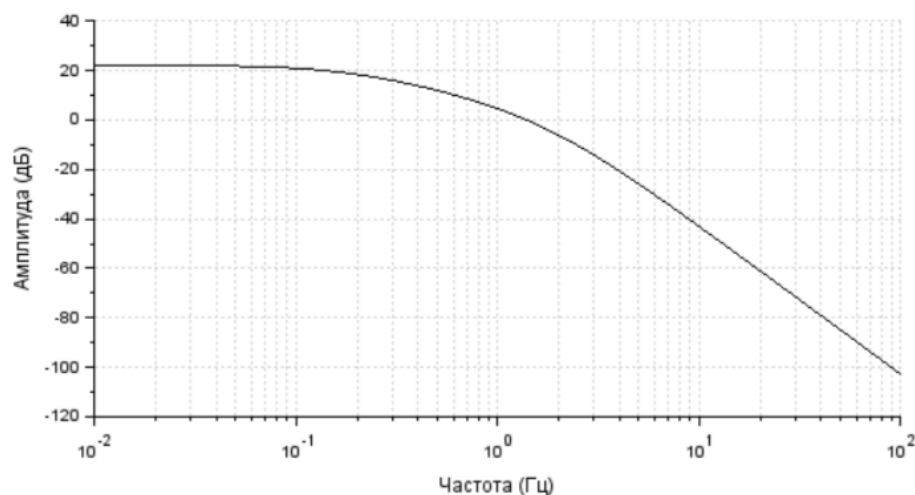


Рисунок 10 – График АЧХ передаточной функции по каналу управления

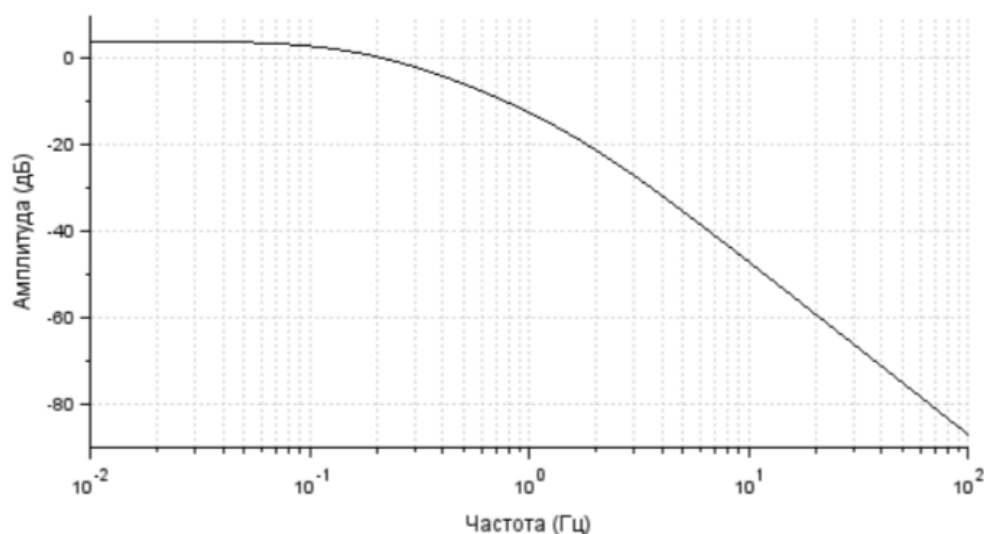


Рисунок 11 – График АЧХ передаточной функции по каналу возмущения

4.3.2 Фазовая частотная характеристика

Фазовая частотная характеристика или ФЧХ определяет запаздывание выходного сигнала по отношению ко входному. Она определяется по следующей формуле:

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im} W(j\omega)}{\operatorname{Re} W(j\omega)} \quad (22)$$

ФЧХ для передаточной функции разомкнутой системы по каналу управления определяется по следующей формуле:

$$\varphi(\omega) = \arg W_{\text{упр}}(j\omega) = \arctg \left(\frac{1.08\omega - 0.0072\omega^3}{-0.17\omega^2 + 1} \right) \quad (23)$$

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							16
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

ФЧХ для передаточной функции разомкнутой системы по каналу возмущения определяется по следующей формуле:

$$\varphi(\omega) = \arg W_{\text{возм}}(j\omega) = -\arctg\left(\frac{-0.09\omega^2 + 1}{\omega}\right) \quad (24)$$

Графики ФЧХ передаточных функций разомкнутой системы по каналам управления и возмущения представлены на рисунках 12 и 13 соответственно.

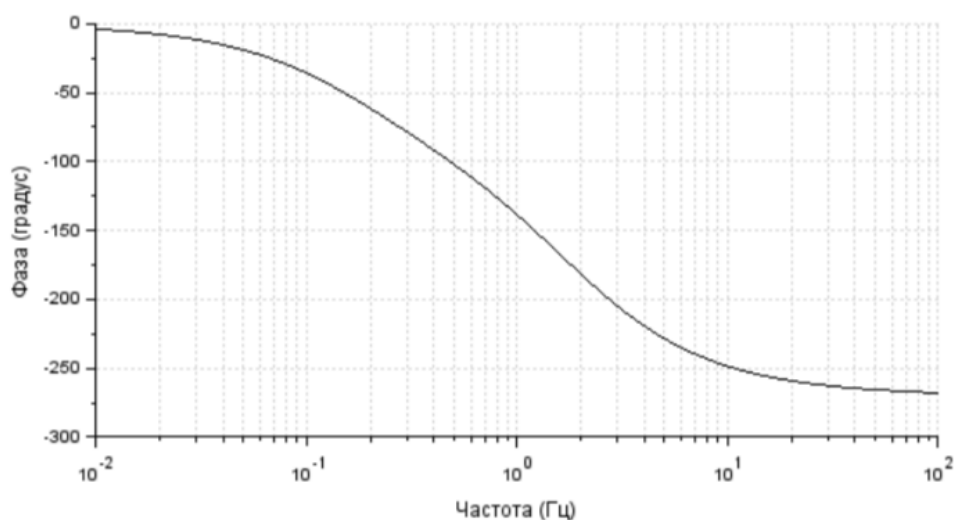


Рисунок 12 – График ФЧХ передаточной функции по каналу управления

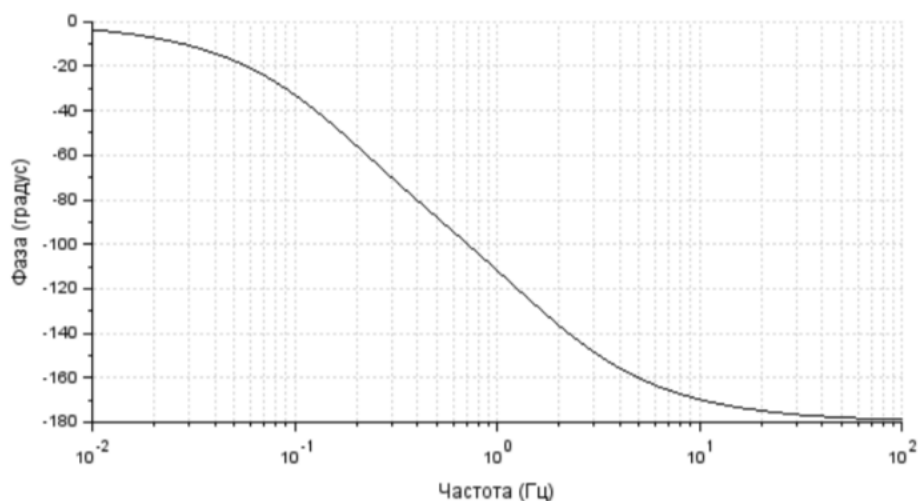


Рисунок 13 – График ФЧХ передаточной функции по каналу возмущения

4.4 Исследование устойчивости АСР

Передаточная функция по каналу управления имеет вид:

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{12.8}{0.0072p^3 + 0.17p^2 + 1.08p + 1} \quad (25)$$

Полная передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							17
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} = \frac{12,8}{0.0072p^3 + 0.17p^2 + 1.08p + 13.8} \quad (26)$$

Характеристический полином имеет вид:

$$D(p) = 0.0072p^3 + 0.17p^2 + 1.08p + 13.8 \quad (27)$$

Так как все коэффициенты положительны, выполняется необходимое условие устойчивости. Теперь необходимо проверить достаточное условие устойчивости при помощи метода Гурвица. Матрица Гурвица имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.17 & 13.8 & 0 \\ 0.0072 & 1.08 & 0 \\ 0 & 0.17 & 13.8 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Согласно критерию устойчивости Ляпунова-Шипара, если все нечетные миноры матрицы Гурвица больше нуля, то и все четные миноры больше нуля и наоборот (при выполнении достаточного условия устойчивости). Первый минор матрицы $\Delta_1 = a_2 > 0$, поэтому необходимо найти значение третьего минора.

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0.0072 & 1.08 \\ 0 & 0.17 \end{vmatrix} = 0.001224 > 0 \quad (29)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что достаточное условие устойчивости системы выполнено.

Вычислим предельный коэффициент передачи $K_{\text{кр}}$. Построим матрицу Гурвица, заменив значение, соответствующее свободному члену характеристического полинома, на значение $1 + K_{\text{кр}}$ (статическая система):

$$A = \begin{pmatrix} 0.17 & 1 + K_{\text{кр}} & 0 \\ 0.0072 & 1.08 & 0 \\ 0 & 0.17 & 1 + K_{\text{кр}} \end{pmatrix} \quad (30)$$

При равенстве нулю миноров матрицы Гурвица система будет находиться на границе колебательной устойчивости, что соответствует предельному коэффициенту передачи $K_{\text{кр}}$. Приравняв миноры к нулю, найдем $K_{\text{кр}}$:

$$\begin{vmatrix} 0.17 & 1 + K_{\text{кр}} \\ 0.0072 & 1.08 \end{vmatrix} = 0, \quad (31)$$

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							18
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

Из (31) получим, что предельный коэффициент передачи $K_{кр} \approx 24,5$. При этом значении коэффициента передачи САР находится на границе колебательной устойчивости.

4.5 Исследование точности АСР в установившемся режиме

Для исследования качества системы в переходном режиме воспользуемся прямым методом оценки качественных показателей системы, а именно построим кривую переходного процесса замкнутой системы. Кривая переходного процесса при подаче на вход единичного ступенчатого сигнала в $t = 1$ представлена на рисунке 14.

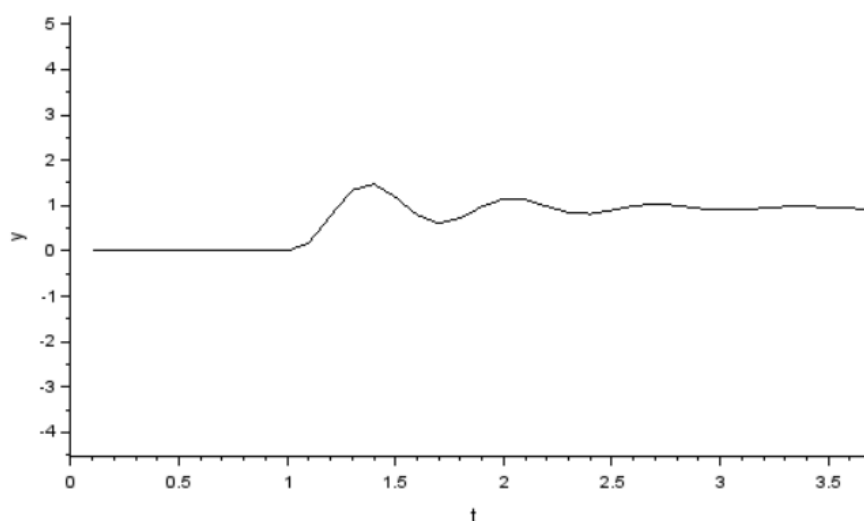


Рисунок 14 – График переходного процесса замкнутой САР скорости вращения двигателя

По графику, представленному на рисунке 14, время переходного процесса составляет $t_{пп} \approx 2$ секунды, а значение перерегулирования $\sigma \approx 50\%$. Значение коэффициента статической ошибки регулирования $C_0 \approx 0,072$.

4.6 Постановка задачи синтеза

Результаты анализа исходной системы:

- 1) Перерегулирование в исходной системе: $\sigma \approx 50\%$.
- 2) Время переходного процесса в исходной системе: $t_{пп} \approx 2$ с.
- 3) Коэффициент ошибки в исходной системе: $C_0 \approx 0.072$ рад.

Требуемые качественные показатели:

- 1) В статике: $C_0 = 0.02$ рад.
- 2) В динамике: $t_{пп} = 3.9$ с; $\sigma = 30\%$.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							19
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

Требуемые показатели качества системы не достигнуты, следовательно, необходимо провести синтез фазокорректирующего устройства.

4.7 Выводы

После проведения анализа исходной САР скорости вращения двигателя была дополнена её классификация, а также рассчитаны и проанализированы количественные показатели качества. На основе полученной информации поставлена задача синтеза.

						<i>ИБКР. 351000. 000 ПЗ</i>	Лист
							20
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

5 СИНТЕЗ ФАЗОКОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

5.1 Выбор способа включения, структуры и синтез передаточной функции фазокорректирующего устройства АСР

Существует большое число методов определения оптимальных параметров регулятора, и одним из простейших является метод сканирования. Метод сканирования удобно применять, когда число варьируемых параметров типового регулятора не превышает двух [3].

Для применения такого подхода необходимо сначала построить область устойчивости – область изменения параметров регулятора, при которых система устойчива. На примере типового регулятора с двумя параметрами (K_0 и K_1) поиск оптимальных настроек осуществляется следующим образом.

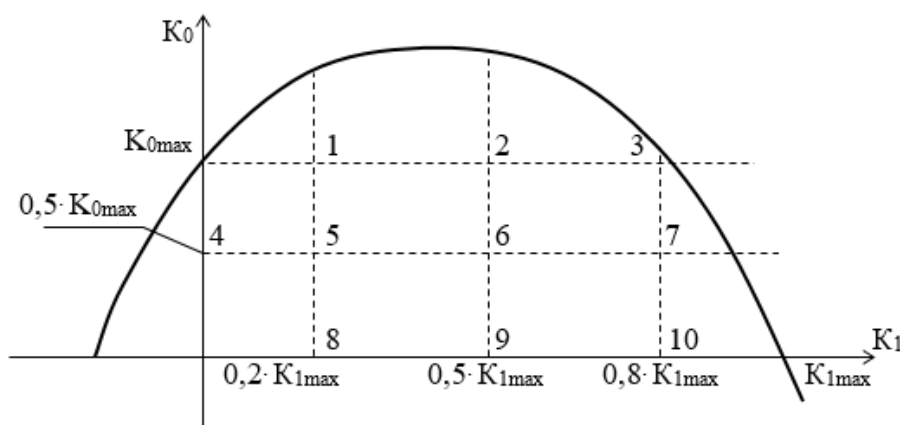


Рисунок 15 – Разбиение области устойчивости при методе сканирования

Значение одного из параметров, например, K_0 фиксируется на некотором уровне (рисунок 15), а другой изменяется в области допустимых значений. С помощью модели определяется переходный процесс в системе и фиксируется показатель качества, соответствующий значениям K_0 и K_1 . Затем поиск осуществляется при другом фиксированном значении первого параметра и т.д. После просмотра всей области определяются оптимальные параметры. Шаг изменения параметров K_0 и K_1 может уточняться в процессе эксперимента.

Основным недостатком данного подхода является применимость только для типовых регуляторов, однако реализация оказывается весьма простой на современных ЭВМ.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							21
Изм.	Кол.уч.	Лист	№док.	Подпись	Дата		

5.2 Синтез ПД-регулятора

Будем использовать ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный регулятор), включающий в себя П- и Д-регуляторы, так как у системы, включающей ПД-регулятор, быстродействие выше, чем у систем с П-, И- и ПИ-регуляторами.

Запишем передаточную функцию ПД-регулятора:

$$W_{\text{ПД}}(p) = K_1 + K_2 p \quad (32)$$

Передаточная функция по каналу управления разомкнутой САР с ПД-регулятором:

$$W_{\text{раз}}^{\text{ПД}}(p) = W_{\text{ПД}}(p) * W_{\text{раз}}(p) = (K_0 + K_1 p) * \frac{K}{(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{я}}p + 1)(T_{\text{м}}p + 1)} \quad (33)$$

Передаточная функция по каналу управления замкнутой САР с ПД-регулятором:

$$\begin{aligned} W_{\text{з}}^{\text{ПД}}(p) &= \frac{W_{\text{раз}}^{\text{ПД}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}^{\text{ПД}}(p)} = \frac{\frac{K(K_1 + K_2 p)}{(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{я}}p + 1)(T_{\text{м}}p + 1)}}{1 + \frac{K(K_1 + K_2 p)}{(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{я}}p + 1)(T_{\text{м}}p + 1)}} = \\ &= \frac{K(K_1 + K_2 p)}{(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{я}}p + 1)(T_{\text{м}}p + 1) + K(K_1 + K_2 p)} = \\ &= \frac{KK_1 + KK_2 p}{T_{\text{г}}T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^3 + (T_{\text{г}}T_{\text{я}} + T_{\text{г}}T_{\text{м}} + T_{\text{я}}T_{\text{м}})p^2 + (T_{\text{г}} + T_{\text{я}} + T_{\text{м}} + KK_2)p + KK_1 + 1} \quad (34) \end{aligned}$$

5.2.1 Определение области устойчивости по методу Гурвица

Характеристическое уравнение замкнутой САР с ПД-регулятором:

$$D(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \quad (35)$$

Таким образом имеем: $D(p) = T_{\text{г}}T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^3 + (T_{\text{г}}T_{\text{я}} + T_{\text{г}}T_{\text{м}} + T_{\text{я}}T_{\text{м}})p^2 + (T_{\text{г}} + T_{\text{я}} + T_{\text{м}} + KK_2)p + KK_1 + 1$, где $a_3 = T_{\text{г}}T_{\text{я}}T_{\text{м}} = 2.88$, $a_2 = T_{\text{г}}T_{\text{я}} + T_{\text{г}}T_{\text{м}} + T_{\text{я}}T_{\text{м}} = 6.44$, $a_1 = a'_1 + KK_2$, $a'_1 = T_{\text{г}} + T_{\text{я}} + T_{\text{м}} = 4.5$, $a_0 = KK_1 + 1$, $K = 12.8$.

Составим матрицу Гурвица:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{pmatrix}$$

По критерию Гурвица САР устойчива, если все миноры матрицы Гурвица больше нуля:

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							22
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_2 > 0, \\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_0 a_3 > 0, \\ \Delta_3 = a_0 \Delta_2 > 0. \end{cases}$$

Миноры первого и третьего порядков в данном случае не представляют интереса, поскольку несут уже известную информацию (положительность коэффициентов характеристического полинома для Δ_1 и положительность настроек регулятора для Δ_3). Рассмотрим минор второго порядка:

$$a_2(a'_1 + KK_2) - (KK_1 + 1)a_3 > 0$$

Выразим зависимость настроек ПД-регулятора друг от друга:

$$\begin{aligned} a_2 a'_1 + a_2 K K_2 - a_3 K K_1 - a_3 &> 0 \\ K_1 < \frac{-a_3 + a_2 K K_2 + a_2 a'_1}{a_3 K} &= \frac{a_2}{a_3} K_2 + \frac{a_2 a'_1 - a_3}{a_3 K} \end{aligned} \quad (36)$$

Полученное неравенство представляет собой границу устойчивости в области настроек ПД-регулятора. Граница устойчивости, полученная по методу Гурвица, в области настроек ПД-регулятора для САР скорости вращения двигателя представлена на рисунке 16.

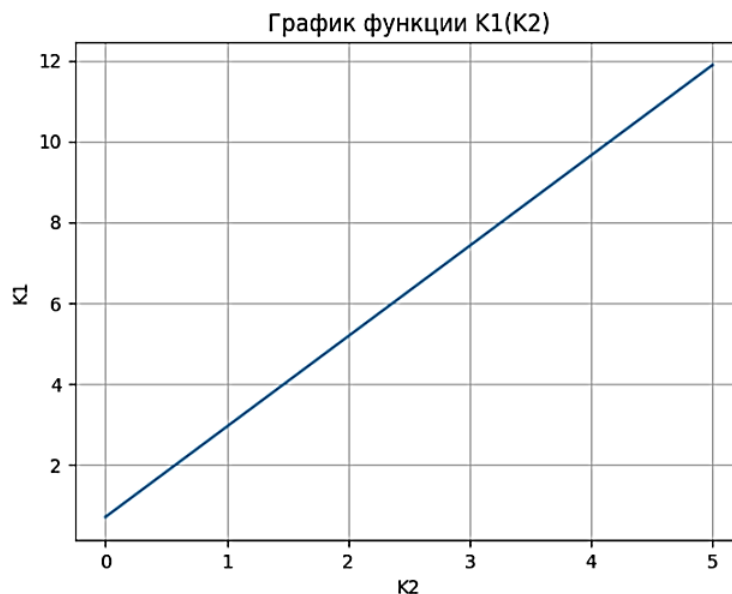


Рисунок 16 – Граница области устойчивости ПД-регулятора, полученная по методу Гурвица

5.2.2 Определение оптимальных параметров ПД-регулятора

Разобьём всю область устойчивости на интервалы с шагом 1 по обеим осям. В полученных узлах вычислим показатели качества, подставив соответствующие значения параметров регулятора. В результате для параметров

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							23
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

ПД-регулятора $K_1 = 2.5$ и $K_2 = 4$ получим удовлетворяющие значения качества в динамике $t_{\text{пп}} = 4.5\text{с}$ и $\sigma = 30\%$. В статике получим значение коэффициента статической ошибки $C_0 \approx 0.0254$ рад, что также удовлетворяет заданному значению. Таким образом, передаточная функция ПД-регулятора примет вид:

$$W_{\text{ПД}}(p) = 2.5 + 4 \cdot p$$

5.3 Анализ скорректированной САР

График переходного процесса скорректированной системы при управляющем воздействии $U_0 = 1$ представлен на рисунке 17.

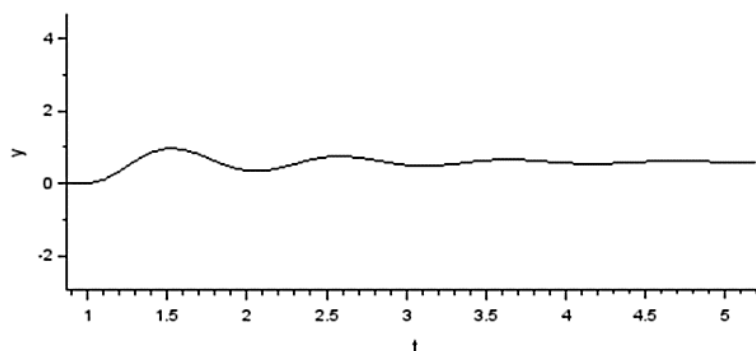


Рисунок 17 – Переходной процесс скорректированной САР

Перерегулирование составило: $\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} * 100\% = \frac{0.95 - 0.74}{0.74} * 100\% \approx 28.3\%$.

Время переходного процесса составило: $t_{\text{пп}} = 3.5\text{с}$.

Коэффициент статической ошибки: $C_0 \approx 0.0254$ рад.

Система отвечает требованиям по качеству, следовательно, синтез фазокорректирующего устройства проведен корректно.

5.4 Выводы

В рамках данного раздела был произведён синтез фазокорректирующего устройства. Исследование скорректированной САР с выбранным регулятором в составе показало, что система отвечает всем заданным требованиям к показателям качества как в переходном, так и в установившемся режимах.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							24
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной курсовой работы была исследована, классифицирована, проанализирована и скорректирована САР скорости вращения двигателя.

По итогам первичного анализа системы была поставлена задача синтеза корректирующего устройства, включение которого позволило удовлетворить требованиям к системе, изложенным в задании на курсовую работу. Затем было синтезировано соответствующее фазокорректирующее устройство и проведен анализ скорректированной системы автоматического регулирования.

По результатам анализа скорректированной САР можно сделать вывод о соответствии рассматриваемой системы всем предъявленным к ней требованиям.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							25
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Фомичев А.А. Основы теории управления. Методические указания по выполнению курсовой работы. – Тула: ТулГУ, 2020.
- 2) Бесекерский В.А. Сборник задач по теории автоматического регулирования.-М.: Наука, 1975.- 590 с.
- 3) Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – Москва: Наука, 1989. – 304с.

						ИБКР. 351000. 000 ПЗ	Лист
							26
Изм.	Кол.уч	Лист	№док.	Подпись	Дата		