

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
«Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.Н. Сочнев

подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

по направлению 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

«Исследование следящей системы регулирования положения робота ТУР-10К»

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

должность, ученая степень

А.П. Смольников

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Ю. Лемешко

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.Н. Куликова

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

---

институт

Робототехника и техническая кибернетика

---

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.Н. Сочнев

\_\_\_\_\_

подпись

инициалы, фамилия

« 11 » мая 2019 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме бакалаврской работы**

Перв. примен.	Студенту <u>Лемешко Александру Юрьевичу</u>							
	Группа <u>ФЭ 15-08Б</u> Направление (специальность) <u>15.03.06</u> <u>«Мехатроника и робототехника»</u> Тема выпускной квалификационной работы <u>«Исследование следящей системы регулирования положения робота ТУР-10К»</u> Утверждена приказом по университету №19632/с от 2018-12-28							
Справ. №	Руководитель ВКР <u>А. П. Смольников, кафедра РИТК, к. т. н., доцент</u> Исходные данные для ВКР 1. Исследовательский стенд с приводом робота ТУР-10К 2. Пакет программного обеспечения LabView 3. Пакет программного обеспечения MATLAB Перечень разделов ВКР Глава 1 – Робот-манипулятор ТУР-10К Глава 2 – Принципиальные электрические и функциональные схемы привода Глава 3 – Разработка математической модели Глава 4 – Система подчиненного регулирования Глава 5 – Цифровая система автоматического управления углового перемещения звена робота Глава 6 – Экспериментальные исследования стенда Глава 7 – Экономическое обоснование проекта Глава 8 – Безопасность исследовательского стенда							
	Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов, слайдов Лист 1 – Схема электрическая принципиальная генератора широтно-импульсного преобразователя Лист 2 – Схема электрическая принципиальная регулятора скорости Лист 3 – Функциональная схема электроприводов робота ТУР-10К Лист 4 – Функциональная схема электроприводов робота ТУР-10К Лист 5 – Функциональная схема цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота							
Подпись и дата	Руководитель ВКР		<div style="text-align: right;">А. П. Смольников</div> <div style="text-align: center;">_____</div> <div style="text-align: center;">подпись</div>					
Инв. № дубл.	Задание принял к исполнению		<div style="text-align: right;">А. Ю. Лемешко</div> <div style="text-align: center;">_____</div> <div style="text-align: center;">подпись</div>					
Взам. инв. №	«11» мая 2019 г.							
Подпись и дата	<b>БР - 15.03.06 ПЗ</b>							
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Инв. № подл.	Разраб.	Лемешко А.Ю.			Исследование следящей системы регулирования положения робота ТУР-10К	Лит.	Лист	Листов
	Провер.	Смольников А.П.					3	109
	Н. Контр.	Куликова В.Н.				<b>ПИ СФУ ФЭ15-08Б</b>		
	Утв.	Сочнев А.Н.						

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование следящей системы регулирования положения робота ТУР-10К» содержит 109 страниц текстового материала, 57 иллюстраций, 13 таблиц, 112 формул, 7 использованных источников.

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, КОНТУР ТОКА, КОНТУР СКОРОСТИ, КОНТУР ПОЛОЖЕНИЯ.

Цели работы:

- изучить структуру исследовательского стенда с приводом робота ТУР-10К;
- составить математическую модель силовой части привода;
- провести синтез контуров тока, скорости и положения методом подчиненного регулирования;
- провести моделирование цифровой системы управления углового перемещения звена робота;
- снять характеристики с моделей и с реального стенда;
- провести сравнительный анализ результатов.

В ходе выполнения выпускной бакалаврской работы была изучена структура исследовательского стенда с приводом робота ТУР-10К. Разработана математическая модель для силовой части привода. Промоделирована цифровая система управления углового перемещения звена робота. Получены характеристики системы подчиненного регулирования, цифровой системы управления и экспериментальные данные о приводе робота. Произведен сравнительный анализ полученных результатов. Рассчитана примерная стоимость разработки стенда.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Робот-манипулятор ТУР-10К .....	8
1.1 Описание робота-манипулятора.....	8
1.2 Привод робота ТУР-10К .....	13
1.2.1 Особенности приводов промышленных роботов .....	16
1.2.2 Принципы работы двигателя постоянного тока .....	17
1.2.3 Широтно-импульсный преобразователь .....	18
1.2.4 Принципы работы импульсного датчика положения.....	20
1.3 Технические характеристики робота-манипулятора ТУР-10К.....	23
1.4 Описание аппаратно-программного комплекса .....	24
1.4.1 Описание платы NI PCI-6221.....	27
1.4.2 Преобразователь угловых перемещений BE178A5 .....	29
1.5 Описание стенда для исследования характеристик одной степени подвижности робота ТУР-10К .....	33
1.6 Описание системы автоматического регулирования ( САР ) привода робота ТУР-10К.....	37
1.6.1 Типовой сервопривод одной координаты робота.....	37
2 Принципиальные электрические и функциональные схемы привода .....	41
2.1 Принципиальная электрическая схема генератора широтно-импульсного преобразователя .....	42
2.2 Принципиальная электрическая схема регулятора скорости .....	42
2.3 Функциональная схема электроприводов робота ТУР-10К.....	45
3 Разработка математической модели.....	47
3.1 Составление математической модели силовой части системы .....	47

4 Система подчиненного регулирования .....	53
4.1 Принципы подчиненного регулирования .....	53
4.2 Критерии оптимизации .....	54
4.3 Синтез контура тока .....	57
4.4 Синтез контура скорости .....	62
4.4 Синтез контура положения .....	69
5 Цифровая система автоматического управления (САУ) углового перемещения звена робота .....	75
5.1 Функциональная схема цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота .....	75
5.2 Расчет параметров для моделирования цифровой системы автоматического управления .....	78
5.3 Моделирование цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота .....	83
6 Экспериментальные исследования стенда .....	91
6.1 Исследование процесса разгона привода робота ТУР-10К при ступенчатом задании скорости .....	91
6.2 Исследование функционирования контура положения .....	93
6.3 Сравнение показателей качества .....	96
7 Экономическое обоснование проекта .....	98
8 Безопасность исследовательского стенда .....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	109

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к качеству функционирования промышленных систем требует совершенствования и развития систем автоматического управления, которые являются неотъемлемой частью таких систем. Робототехнические системы содержат большое число систем автоматического управления. К системам управления промышленных роботов предъявляются высокие требования по скорости перемещения исполнительных механизмов и точности отработки заданных траекторий. Такие системы построены с применением следящих систем различного назначения и исполнения. Поэтому вопросы математического описания и проектирования следящих систем являются актуальной задачей.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

# 1 Робот-манипулятор ТУР-10К

## 1.1 Описание робота-манипулятора

Внешний вид промышленного робота ТУР-10К показан на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Внешний вид робота ТУР – 10К

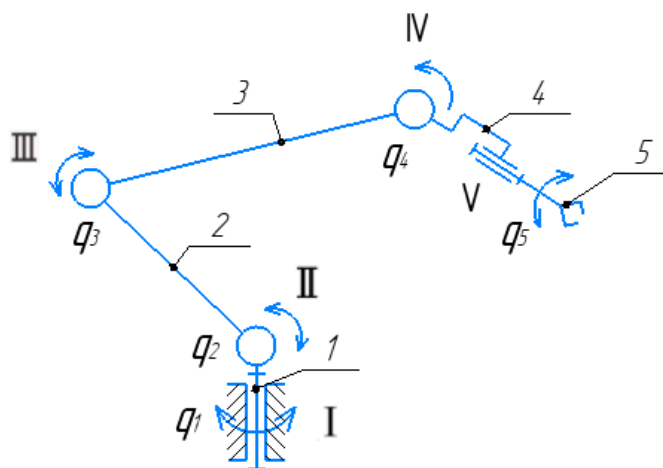
При создании двигательных систем во многих случаях целесообразно размещать двигатели не на основании, а на корпусе первого подвижного звена. Именно такое конструктивное решение было принято при разработке отечественного робота назначения ТУР-10К. Он может быть использован для обслуживания оборудования, сборки, сварки и других технологических операций с деталями массой до 10 кг.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8



Рука робота ТУР – 10К в виде шарнирно-рычажного механизма с пятью степенями подвижности, позволяющими перемещать рабочий орган (схват или инструмент) в любую точку рабочего пространства, ориентировать его произвольным образом в плоскости звеньев руки, в пределах ограничений движения в сочленениях и передаточных механизмах.

Кинематическая схема:



0,1,2,3,4,5 - звенья; I, II, III, IV, V - степени подвижности (вращательные кинематические пары V класса);  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  - обобщенные координаты по степеням подвижности

Рисунок 1.2 – Кинематическая схема ТУР – 10К

Основным предназначением ПР (промышленного робота) является обслуживание оборудования, сварка, сборка и другие технологические операции с деталями массой до 10 килограмм. Перемещение исполнительного органа (схвата, инструмента) в любую точку рабочей области, в пределах допустимых движений в сочленениях и механической передачи, и его ориентация осуществляется за счет пяти степеней подвижности в виде шарнирно-рычажного механизма. Поворотная платформа представляет собой первое подвижное звено. Остальные звенья осуществляют угловое перемещение.

Звенья 4 и 5 – это кисть руки манипулятора. Звено 4 установлено шарнирно на звене 3 и может поворачиваться относительно последнего вокруг горизонтальной оси на угол  $q_4 = \pm 90^\circ$  со скоростью 90 град/с. Этим обес-

печивается IV степень подвижности промышленного робота (ПР) - « сгиб кисти » манипулятора.

Звено 5, к которому крепится рабочий орган робота, установлено шарнирно на звене 4 и может поворачиваться вокруг продольной оси последнего на угол  $q_5 = \pm 180^\circ$  со скоростью 180 град/с. Этим обеспечивается V степень подвижности ПР - «вращение (ротация) кисти » манипулятора.

Рассмотрим механизм поворота вокруг вертикальной оси (рисунок 1.3).

Механизм обеспечивает поворот механической руки ПР вокруг вертикальной оси на  $340^\circ$  со скоростью 90 град/с. Механизм поворота содержит неподвижное основание 3 и поворотную платформу, состоящую из стакана 1 и плиты 7.

На плите 7 установлена механическая рука. Платформа вращается на подшипниках 2, установленных в неподвижном основании. Электромеханический привод механизма поворота ( мотор-редуктор ) установлен на основании 3. Он состоит из электродвигателя постоянного тока 14 типа ПЯ - 250 и жестко связанного с ним волнового редуктора II. Несоосность мотор-редуктора и поворотной платформы компенсируется муфтой 10. Мотор-редуктор через компенсационную муфту 10 и вал 8 вращает плиту 7 поворотной платформы и установленную на ней механическую руку манипулятора. Угол поворота платформы контролируется датчиком положения 9 типа ППК-15. Скорость вращения контролируется датчиком скорости - тахогенератором 18 типа ТГП - 3.

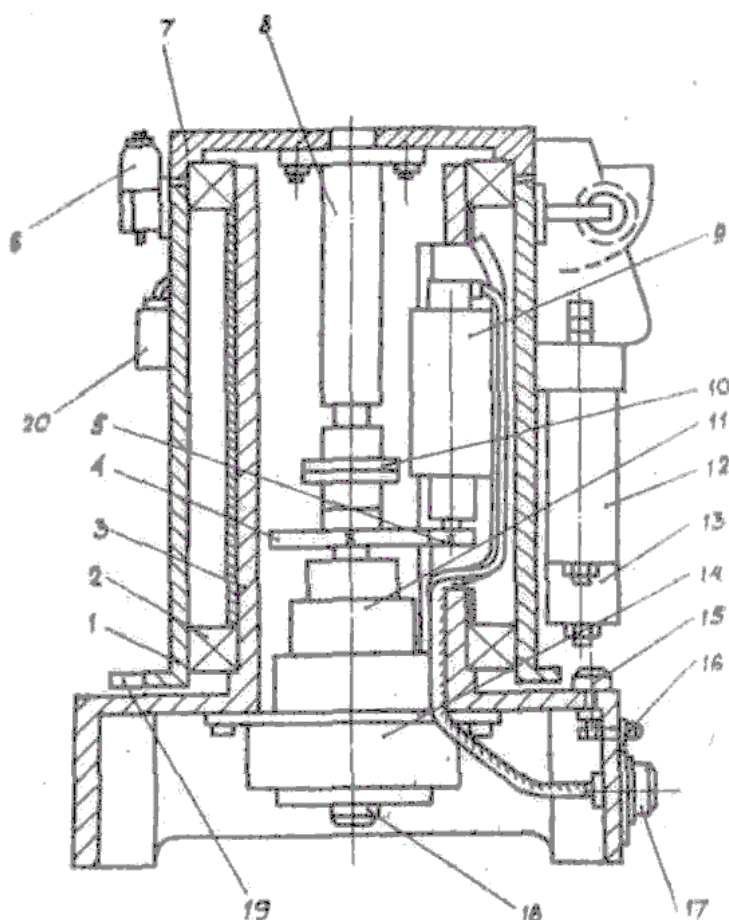


Рисунок 1.3 – Механизм поворота робота

Тахогенератор 18 установлен на корпусе мотор- редуктора соосно валу двигателя и соединен с двигателем муфтой. Датчик положения 9 установлен на неподвижном основании 3 (установка осуществлена через окно в стакане 1, закрываемое крышкой). Вращение на вал датчика 9 с выходного вала редуктора 11 передается через зубчатую передачу 4-5 . Для устранения зазоров в зацеплении зубчатое колесо 4 выполнено разрезным (плоскость разреза параллельна торцу колеса), между половинками которого размещена пружина кручения. Для создания первоначальной деформации пружины и выборки бокового зазора в зацеплении при установке датчика положения 9 верхнюю часть зубчатого колеса 4 разворачивают относительно нижней части на  $90^{\circ}$ .

Вращение поворотной платформы ограничено упорами. Неподвижный упор 15 закреплен на неподвижном основании 3, а подвижный упор - флажок 19 жестко связан со стаканом 1 поворотной платформы.

На передней стенке стакана установлены пневмораспределители 6 (2 шт.), которые предназначены для управления работой пневматических захватных устройств манипулятора. Пневмораспределители подсоединены к штуцеру 16 для подключения сжатого воздуха давлением  $0,4 \div 0,6$  МПа от пневмопанели.

На задней стенке стакана установлены пружинные механизмы 12 и 13, предназначенные для уравнивания статических моментов от веса звеньев механической руки.

На рисунках 1.4 и 1.5 показаны рабочие зоны промышленного робота.

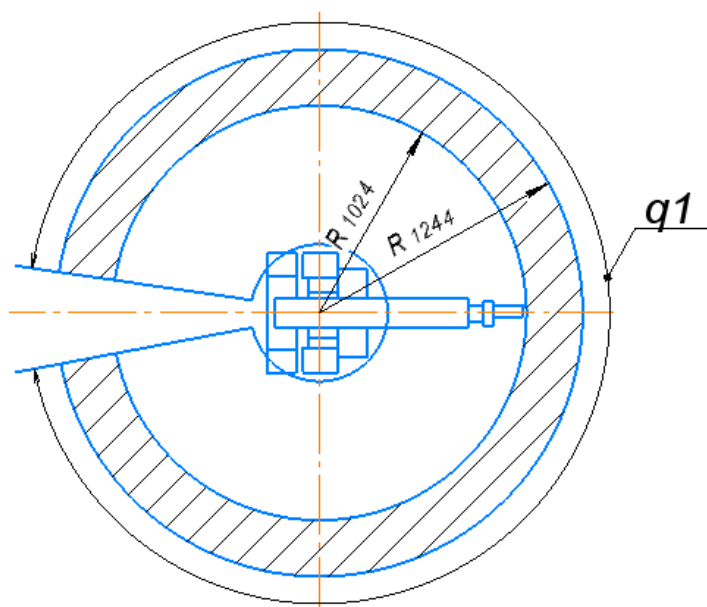


Рисунок 1.4 – Рабочая зона манипулятора ТУР-10К, вид сверху

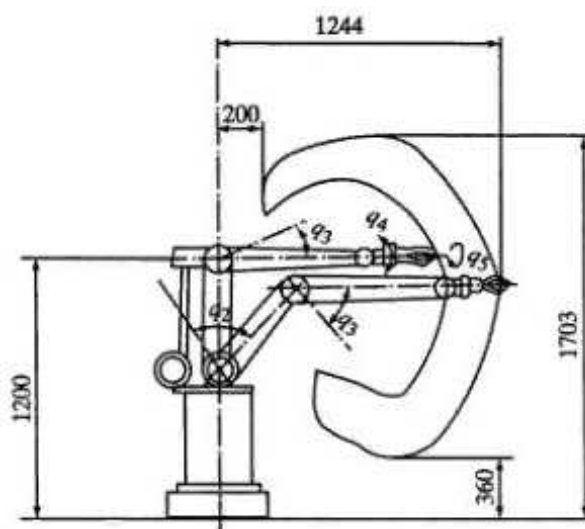


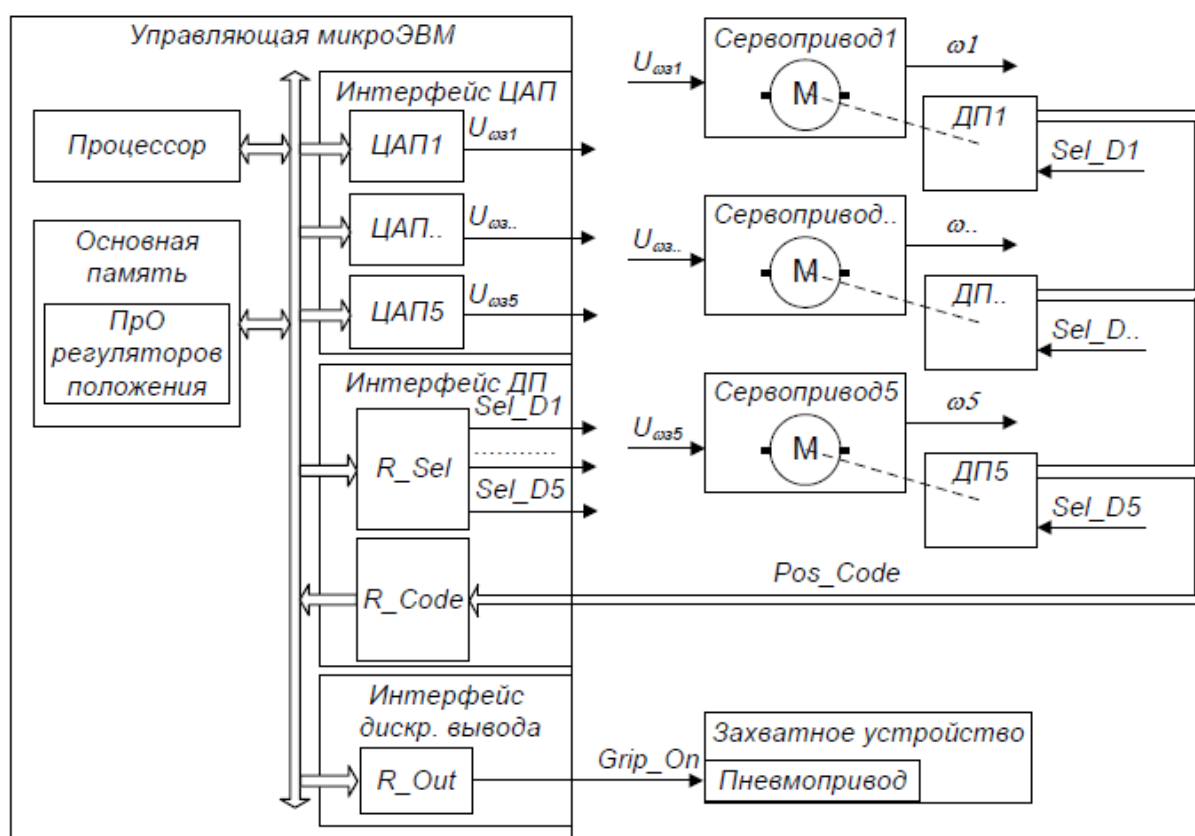
Рисунок 1.5 – Рабочая зона манипулятора ТУР-10К

## 1.2 Привод робота ТУР-10К

Привод робота ТУР-10К является системой, состоящей из пяти электроприводов для каждой из пяти координат и привода схвата, управляемой из единого центра - от управляющей микро-ЭВМ. Он обеспечивает позиционирование рабочего инструмента, зафиксированного в захватном устройстве (схвате), по пяти степеням подвижности. Управление зажимом схвата реализовано пневмоприводом. Сигнал зажима схвата формирует микро-ЭВМ через интерфейс дискретного вывода. По функциональной организации приводы каждой из пяти координат идентичны. Основным элементом привода координаты является сервопривод, обеспечивающий следящее управление скоростью привода.

Управление позиционированием через сервопривод осуществляет контур положения, реализованный на базе аппаратно-программных средств управляющей микро-ЭВМ. Интерфейс цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) обеспечивает преобразование двоичного кода, сформированного программой управления движением, в аналоговый сигнал задания скорости на вход сервопривода координаты.

Вал двигателя сервопривода сочленён с валом датчика положения ДП. Датчик положения обеспечивает формирование на выходе 15-разрядного двоичного кода положения *Pos\_Code*, показывающего фактическое положение по координате. Выходы всех пяти датчиков положения соединены в одну группу электрических линий общего пользования (шину) и подключены на вход регистра кода положения *R\_Code* интерфейса ДП. Предполагается поочерёдное использование шины датчиками, управляемое сигналами выбора датчиков *Sel\_D1..5*. Эти сигналы интерфейс ДП формирует через регистр *R\_Sel*. Функциональная схема привода робота ТУР10К показана на рисунке 1.6.



ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ДП – датчик положения; *R\_Sel*, *R\_Code*, *R\_Out* – регистры выбора датчика положения, кода положения, вывода;  $U_з$  – задание скорости; *Sel\_D* – выбор датчика; *Grip\_On* – зажим схвата

Рисунок 1.6 – Функциональная схема привода робота ТУР-10К

Привод построен на базе электродвигателя с характеристиками, приведенными в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики электродвигателя постоянного тока привода робота ТУР-10К

Наименование характеристики	Значение
Тип двигателя	ПЯ-250 (печатный якорь)
Возбуждение	От постоянных магнитов
Номинальная мощность, $P_n$ , Вт	250
Номинальное напряжение, $U_{ян}$ , В	36
Номинальный ток, $I_{ян}$ , А	10
Номинальная частота вращения, $\omega_n$ , об/мин	3000
Номинальный вращающий момент, $M_n$ , Н·м	0.8

Датчик скорости двигателя – тахогенератор типа ТП80-20-0,2 на валу двигателя с коэффициентом передачи 0.02 В/об/мин. Тахогенератор совмещен с двигателем и является его конструктивной составной частью. Основные технические характеристики тахогенератора представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики тахогенератора ТП80-20-0,2

Основные технические характеристики тахогенератора	
Крутизна выходного напряжения, мВ/мин <sup>-1</sup>	20
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	3000
Максимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	6000
Минимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	0.1
Нагрузочное сопротивление, кОм, не менее	10
Погрешность в диапазоне частот вращения 30-4000 мин <sup>-1</sup> , % не более	0.2

## Продолжение таблицы 1.2

Основные технические характеристики тахогенератора	
Коэффициент пульсации при максимальной частоте вращения, %	1.0
Масса, кг, не более	0.5
Марка щеток	СГ1

Тахогенератор ТП-80-20-0,2 предназначен для электродвигателей, работающих в широкорегулируемых электроприводах постоянного тока. Тахогенератор с возбуждением от постоянных магнитов состоит из якоря и магнитной системы. Якорь устанавливается непосредственно на вал, а магнитная система крепится к корпусу электродвигателя.

### 1.2.1 Особенности приводов промышленных роботов

Функциональное назначение роботов и технологические требования к ним определяют следующие особенности приводов промышленных роботов. Промышленные роботы имеют несколько степеней подвижности. Перемещение по каждой из них требует отдельного привода. Эти приводы, работая совместно, обеспечивают позиционирование исполнительного органа манипулятора. Поэтому, привод робота представляет собой систему нескольких согласованно работающих приводов.

Диапазон нагрузок приводов координат робота изменяется в широких пределах. Нагрузка в каждый момент зависит как от точки траектории по координате, так и от веса перемещаемого груза.

К приводам промышленных роботов предъявляются повышенные требования по точности позиционирования и по плавности движений. Перерегулирования при пусках и остановках не допускается.

Для приводов промышленных роботов характерна длительная работа в заторможенном режиме (когда привод включён, но скорость движения равна 0).

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



Поскольку робот обычно применяют в тяжёлых условиях вместо человека, его приводы робота должны иметь дополнительные запасы по надёжности функционирования и устойчивости к внешним воздействиям.

### 1.2.2 Принципы работы двигателя постоянного тока

Вращение ротора двигателя постоянного тока (ДПТ) обеспечивается за счёт взаимодействия магнитных потоков двух обмоток, по которым протекает электрический ток. Одна из них называется обмоткой возбуждения. Она находится в составе неподвижной части ДПТ (статора) и предназначена для создания потока неподвижного в пространстве магнитного поля возбуждения. Другая обмотка называется обмоткой якоря ДПТ. Она рассчитана на протекание в ней тока, создающего вращающееся магнитное поле. Возможен конструктивный вариант формирования потока возбуждения постоянными магнитами.

При подаче постоянного напряжения  $U_{\text{в}}$  от внешнего источника на обмотку возбуждения (ОВ) по ней протекает ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , который создаёт постоянный магнитный поток возбуждения  $\Phi$ . При подаче постоянного напряжения  $U_{\text{я}}$  от внешнего источника на обмотку якоря в якорной цепи создаётся постоянный ток  $I_{\text{я}}$ . Щёточно-коллекторный механизм двигателя так направляет ток по обмотке якоря, что создаваемое им магнитное поле, вступая во взаимодействие с полем возбуждения, создаёт момент  $M$  вращающий якорь. Момент  $M$  преодолевает инерцию двигателя и механизма ( $J_{\Sigma}$ ), а также момент статического сопротивления  $M_{\text{с}}$  и создаёт вращение якоря со угловой скоростью  $\omega$ . Вращающийся якорь обеспечивает вращение якорного магнитного поля относительно поля возбуждения. А это, по закону электромагнитной индукции, обуславливает появление в обмотке якоря противоЭДС  $E$ , направленной встречно напряжению внешнего источника  $U_{\text{я}}$  и прямо пропорциональной скорости  $\omega$ .

В процессе работы ДПТ возможны два режима. Статический - режим работы с постоянными (установившимися) скоростью  $\omega$ , моментом  $M$  и токами в

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

обмотках якоря  $I_{\text{я}}$  и возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Динамический - режим двигателя при переходных процессах ускорения (разгона), замедления (торможения), при увеличении тока  $I_{\text{я}}$  или момента  $M$ .

### 1.2.3 Широтно-импульсный преобразователь

Широтно-импульсный преобразователь (ШИП) имеет технические характеристики, приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики преобразователя силового напряжения

Наименование характеристики	Значение
Тип	Реверсивный
Способ преобразования	Широтно-импульсный
Ключи	Транзисторные
Закон коммутации ключей	Несимметричный
Номинальный ток, А	10
Изменение входного сигнала, В	От +10 до -10
Максимальное выходное напряжение, В	50

ШИП состоит из силовой части на основе транзисторных ключей и широтно-импульсного модулятора (ШИМ), управляющего коммутацией силовых ключей.

Функциональная схема управления ключами ШИП представлена на рисунке 1.7. Опорные пилообразные напряжения разной полярности  $P\_N$  и  $P\_P$  подаются на входы компараторов для сравнения с входным сигналом ШИП ( $U_{\text{пр}}$ ), поступающим с выхода регулятора тока (РТ). Выходные сигналы с компараторов  $СМР\_P$  и  $СМР\_N$  проходят через узлы гальванической развязки (УГР) и идут на управление транзисторными ключами  $SW$  силовой схемы.

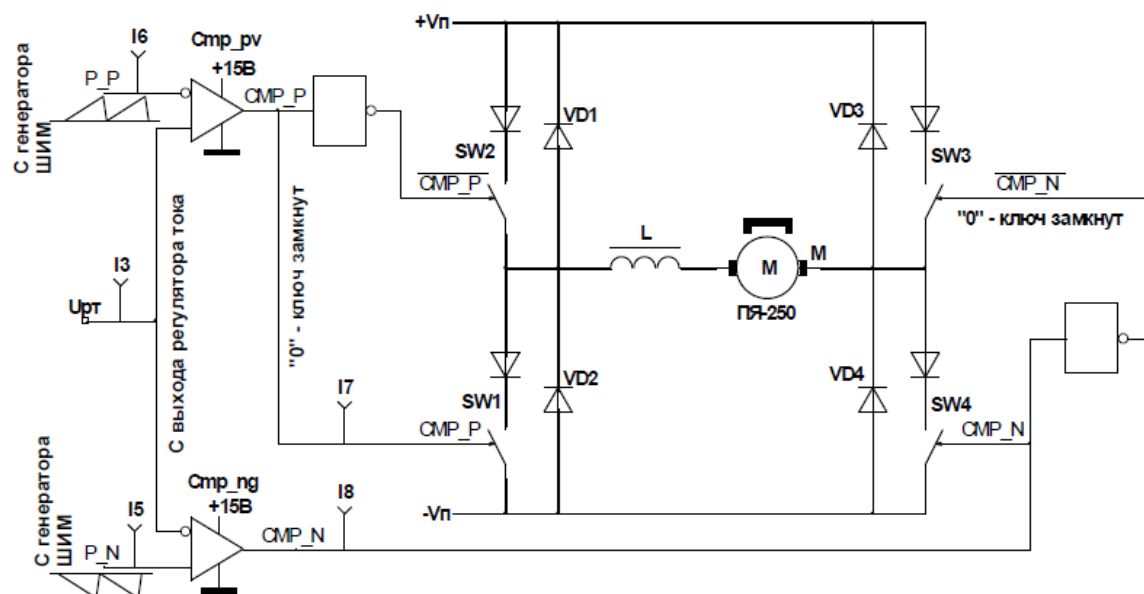


Рисунок 1.7 – Функциональная схема управления ключами ШИП

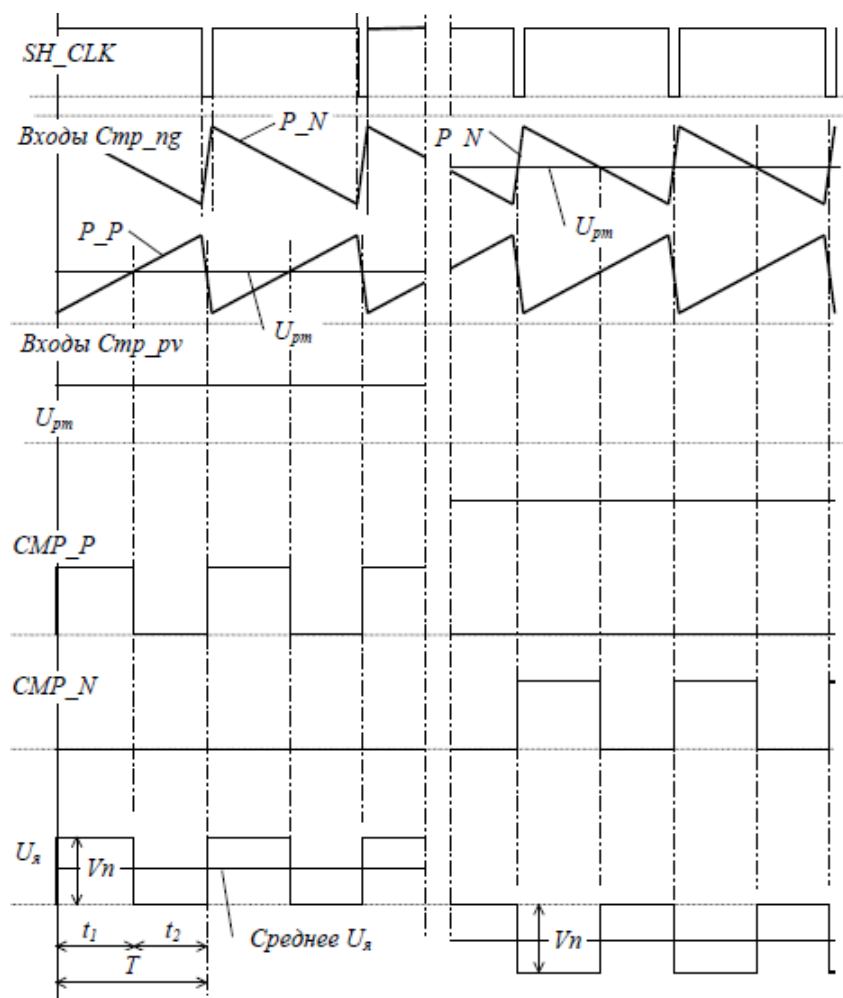


Рисунок 1.8 – Диаграммы работы ШИП

Если сигнал  $U_{pm}$  на входе ШИП положительной полярности, то в течение времени  $t_1$  замкнуты ключи  $SW2$  и  $SW4$ , разомкнуты  $SW1$  и  $SW3$ , к якору двигателя прикладывается напряжение положительной полярности. При той же положительной полярности  $U_{pm}$  в течение времени  $t_2$  замкнуты  $SW1$  и  $SW4$ , разомкнуты  $SW2$  и  $SW3$ , напряжение выпрямителя на якорь не подается, якорная цепь закорачивается через  $SW1$  и диод  $VD4$ , ток якоря снижается.

Если сигнал  $U_{pm}$  на входе ШИП отрицательной полярности, то в течение времени  $t_1$  замкнуты ключи  $SW1$  и  $SW3$ , разомкнуты  $SW2$  и  $SW4$ , к якору двигателя прикладывается напряжение отрицательной полярности. При той же отрицательной полярности  $U_{pm}$  в течение времени  $t_2$  замкнуты  $SW1$  и  $SW4$ , разомкнуты  $SW2$  и  $SW3$ , напряжение выпрямителя на якорь не подается, якорная цепь закорачивается через  $SW4$  и диод  $VD2$ , ток якоря снижается.

В результате напряжение, выдаваемое ШИП на нагрузку будет импульсным по форме. Среднее значение напряжения якоря, определяющее скорость двигателя, будет всегда соответствовать полярности задания  $U_{pm}$ , а по величине - пропорционально отношению интервала пропускания напряжения выпрямителя на нагрузку к периоду дискретности ШИП  $t1/T$ , которое называется скважность импульсов.

### 1.2.4 Принципы работы импульсного датчика положения

Рассмотрим общие принципы конструкции и функционирования импульсного датчика положения, построенного на основе фотоэлектрического преобразователя. Действие фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений (ПУФ) основано на фотоэлектронном сканировании штриховых растров. В качестве осветителей используются (рисунок 1.9) инфракрасные светодиоды, а приёмниками излучения служат кремниевые фотодиоды.

Поток излучения светодиода 1 модулируется растровым сопряжением. Растровое сопряжение создаётся вращающимися друг относительно друга

растровой шкалой и индикаторной пластиной с растровым анализатором. Модулированный растровым сопряжением поток регистрируется фотодиодом 1.

Для обеспечения информации о перемещении растровый анализатор имеет четыре поля считывания А,  $\bar{A}$  В,  $\bar{B}$ . Поля разнесены в пространстве на шаг раstra, определяемый растровой шкалой. Эти четыре поля считывания образуют две пары полей: 1) А,  $\bar{A}$  и 2) В,  $\bar{B}$ . В каждой из пар растры имеют растры имеют пространственный сдвиг друг относительно друга на 1/2 шага раstra (или на  $180^\circ$ ), что позволяет компенсировать постоянную составляющую основного сигнала. Вместе с тем, поля одной пары имеют пространственный сдвиг относительно полей другой пары равный 1/4 шага раstra (или на  $90^\circ$ ).

Все четыре поля считывания охвачены единым параллельным световым пучком, излучаемым светодиодами 1 и сформированным конденсором. А фотодиод 1 имеет четыре светочувствительные площадки (или четыре отдельных фотодиода), электрически включённые определённым образом.

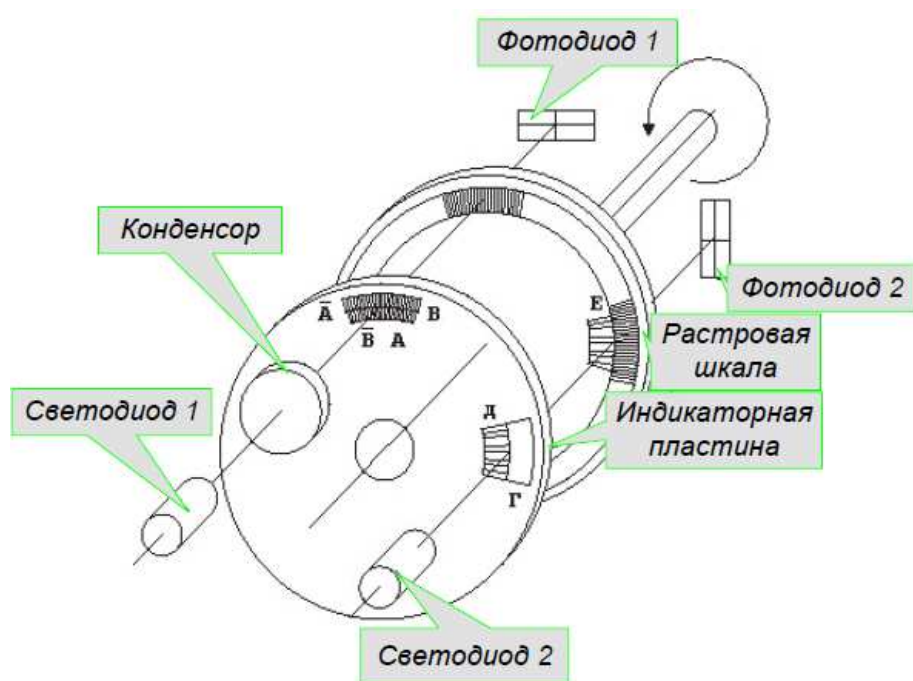


Рисунок 1.9 - Конструкция типового фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений

Независимо от формы построения канала считывания, он позволяет получать два ортогонально сдвинутых (на  $90^\circ$ ) токовых сигнала  $I_A$  и  $I_B$  (рисунок 1.10). Наличие ортогонально сдвинутого сигнала позволяет: во-первых, определять перемещение в пределах шага раstra и так повысить разрешающую способность преобразователя; во-вторых, определять направление перемещения.

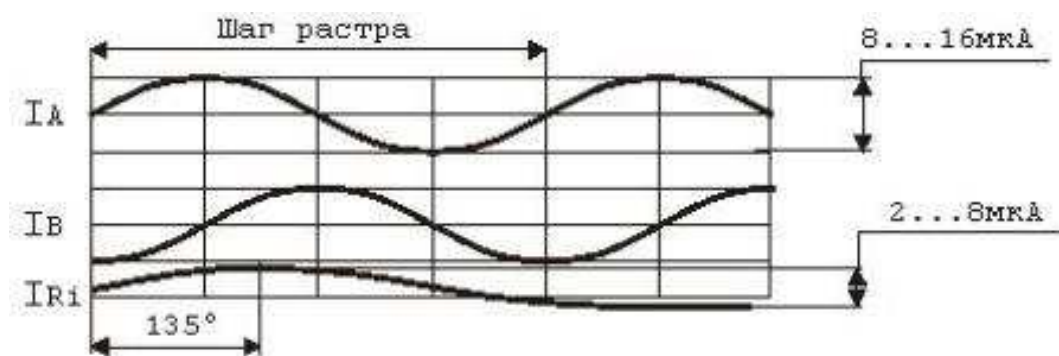


Рисунок 1.10 – Токи фотодиодов полей считывания

Кроме канала считывания преобразователи перемещений содержат канал формирования референтной метки (или начала отсчёта). Сигнал референтной метки вырабатывается, в общем случае, один раз за оборот вала. В канале формирования референтной метки для выработки опорного сигнала (или сигнала начала отсчёта) референтной метки задействованы общий светодиод 2 (на рисунок 1.10: светодиод 1 и светодиод 2 – это один светодиод) и фотодиод 2, идентичный фотодиодам 1. Опорный сигнал вырабатывается с помощью диафрагмы Г индикаторного лимба Д, а специальный код поля референтной метки Е измерительного лимба (растровой шкалы) как и инверсный код поля референтной метки Д, в случае их совмещения при относительном перемещении лимбов, модулируют световой поток. Это приводит к формированию на выходе фотодиода 2 сигнала автокорреляционной функции кода референтной метки  $I_{Ri}$  (рисунок 1.10).

### 1.3 Технические характеристики робота-манипулятора ТУР-10К

Таблица 1.4 – Технические характеристики ТУР-10К

Характеристика	Значение
Грузоподъёмность, кг, не более номинальная включая массу захватного устройства	6.3 10
Вид привода	Электромеханический
Способ управления	Контурный
Система управления	УКМ-772
Способ программирования	Обучение
Объём памяти, точек, не более	1000
Максимальная абсолютная погрешность позиционирования, мм	$\pm 0,25$
Погрешность обработки траектории, мм, не более	2
Число одновременно управляемых движений по степеням подвижности	5
Геометрические размеры рабочей зоны, град	340
Максимальные перемещения, град - поворот руки вокруг вертикальной оси $q_1$ - качание вертикального звена (плеча) относительно вертикали $q_2$ Качание горизонтального звена (предплечья) относительно горизонтали при вертикальном: - плече $q_3$ - сгибе руки $q_4$ - вращение кисти $q_5$	$\pm 45$ $\pm 25$  -45 $\pm 90$ $\pm 180$
Минимальные и максимальные скорости перемещения звеньев, град/с : -поворот руки -качание плеча -качание предплечья -сгиб кисти -вращение кисти	 0,5 – 90 0,5 – 90 0,5 – 90 0,5 – 90 1 – 180
Время максимального перемещения, с -поворот руки -качание плеча -качание предплечья -сгиб кисти -вращение кисти	 5 2.5 2.5 3 3
Погрешность поддержания заданной контурной скорости, %	10

## Продолжение таблицы 1.4

Характеристика	Значение
Максимальное ускорение рабочего органа, м/с <sup>2</sup>	1.5
Число каналов связи с внешним оборудованием: - на ввод - на вывод	12 48
Электрическое питание: 3-фазная сеть переменного тока - напряжение, В - частота, Гц - потребляемая мощность, кВт	380 50±1 4
Давление питания сжатого воздуха, Мпа	0.4 – 0.6
Расход сжатого воздуха, л/ч	100

### 1.4 Описание аппаратно-программного комплекса

Аппаратно-программный комплекс (АПК) «привод промышленного робота ТУР-10К» в системе коллективного пользования с удалённым доступом состоит из клиентской части и объектной части. Объектная часть – это та часть АПК на которой размещён объект исследования коллективного пользования ( в данном случае – привод робота ). Связь между частями АПК обеспечивается через глобальную сеть Интернет по протоколу *Data Socket Transport Protocol (DSTP)* на основе стандартного транспортного протокола *TCP/IP*.

Аппаратные средства объектной части показаны на рисунке 1.11, где объектом исследований является привод промышленного робота ТУР-10К.

Средство автоматизации исследований – ПЭВМ-измеритель. С одной стороны, он через специальные интерфейсные средства подключён к объекту. С другой стороны ПЭВМ-измеритель через коммуникационный интерфейс *Ethernet* подключён по локальной сети к серверу, поддерживающему удалённое Интернет-взаимодействие с клиентом.

Для сбора самых разных по типу данных и для программного управления этими операциями в составе ПЭВМ-измерителя имеется многофункциональная



плата ввода/вывода сигналов типа *NI PCI-6221*. Плата устанавливается в *PCI* слот. Она относится к М-серии плат, выполненных по технологии *National Instrument*.

Аппаратные средства клиентской части представляют собой обычные ПЭВМ, объединённые в локальную сеть и с сервером, выходящим в Интернет.

Обобщённая схема программного обеспечения АПК представлена на рисунке 1.12. Средства поддержки взаимодействия пользователя ПЭВМ-измерителя с объектом включают три уровня:

- нижний – *NI DAQmx* – драйверы платы *NI PCI-6221*, адаптирующие аппаратуру платы к прикладному уровню программирования в среде визуального программирования виртуальных приборов;
- средний – *MAX* – средства настройки и диагностирования аппаратной части платы;
- верхний – *LabVIEW* – среда визуального программирования виртуальных приборов или прикладной уровень.

Для организации удалённого взаимодействия в среде *LabVIEW* применяется приложение *Data Socket Server* из состава пакета *LabVIEW*. Оно работает на компьютере центрального сервера объектной части, обеспечивая доступ клиентской части к ПЭВМ-измерителю и к объекту.

В составе клиентской части достаточно иметь утилиту, которая исполняет действия запрограммированных виртуальных приборов. Эта утилита называется *LabVIEW RunTime Engine* ( процессор рабочего цикла ).

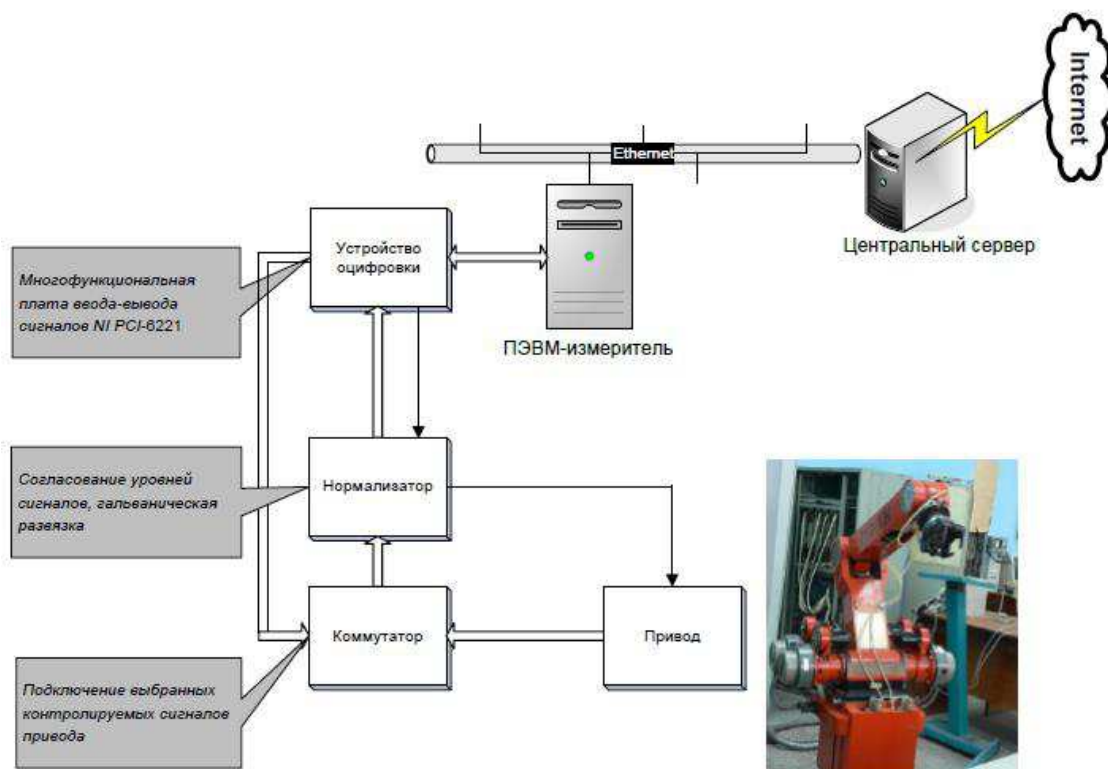


Рисунок 1.11 – Обобщенная схема аппаратно-программного комплекса

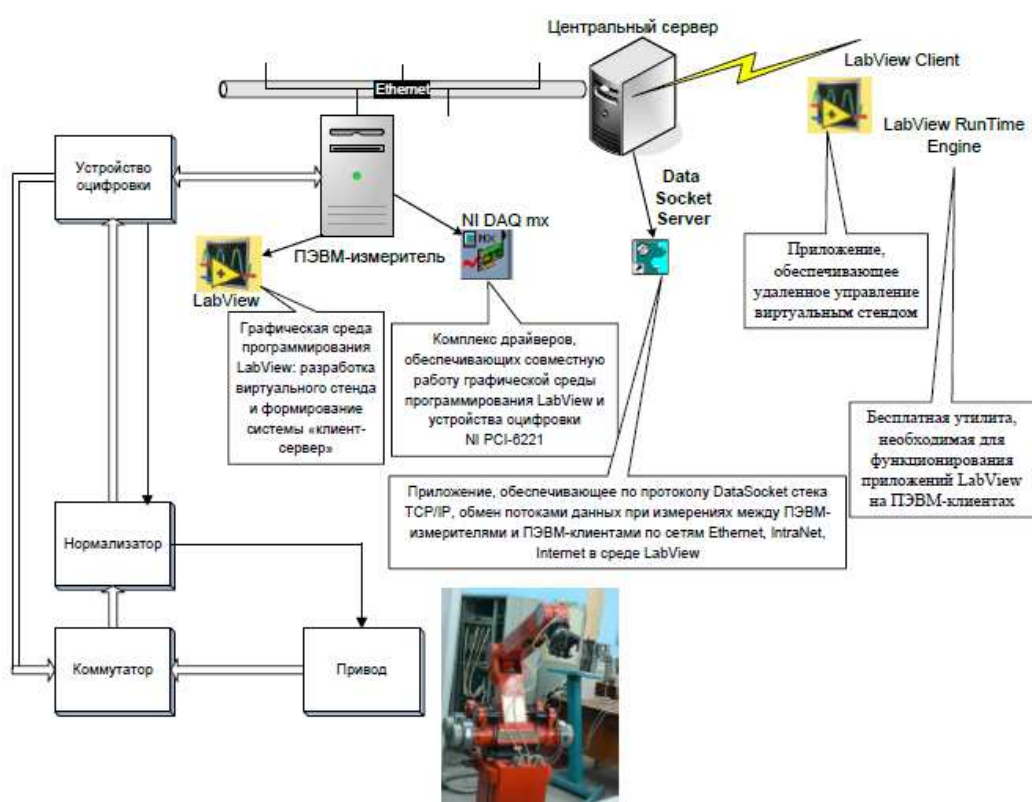


Рисунок 1.12 – Обобщенная схема программного обеспечения аппаратно-программного комплекса

#### 1.4.1 Описание платы *NI PCI-6221*

Многофункциональное устройство ввода-вывода *PCI*, 16 аналоговых вводов, 2 аналоговых вывода, 24 линий цифрового ввода-вывода - *PCI-6221* располагает аналоговым вводом-выводом, коррелированными цифровыми линиями ввода-вывода, двумя 32-битными счетчиками/таймерами и цифровым сигналом запуска. Устройство предоставляет экономичные и надежные функции сбора данных для широкого спектра областей применения, начиная с простой автоматизации лабораторных работ и заканчивая исследовательскими работами, промышленным тестированием. К устройству можно подключить датчики и добавить возможность измерения высокого напряжения с помощью модулей согласования сигналов *SCC* или *SCXI* с АЦП. Установленный драйвер *NI-DAQmx* и утилита конфигурации упрощают процесс настройки и измерений.

Назначение средства измерений: преобразователь напряжения измерительный модуль *NI 6221* предназначен для измерения и воспроизведения мгновенных значений электрического напряжения.

Описание средства измерений. В каналах аналого-цифрового преобразования входное напряжение поступает на программируемый аттенюатор и дифференциальный усилитель, после чего в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) производится преобразование мгновенного значения напряжения аналогового сигнала в двоичный цифровой код. Модуль *NI 6221* имеет один канал АЦП и мультиплексор для коммутации входных каналов.

В каналах цифро-аналогового преобразования заданное в виде последовательного двоичного цифрового кода значение преобразуется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговый сигнал мгновенного значения напряжения, и после масштабного преобразования в программируемом аттенюаторе и дифференциальном усилителе аналоговый сигнал выводится на выход модуля. Все каналы ЦАП являются независимыми. Разрядность АЦП и ЦАП модулей – 16 бит.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Модуль имеет также каналы цифрового входа/выхода, конфигурируемые пользователем, в том числе два либо четыре канала цифрового счетчика импульсов и один канал цифрового генератора импульсов. Счетчик импульсов с разрядностью 32 бит позволяет производить измерение временных интервалов и частоты цифровых сигналов, а генератор импульсов может формировать одиночный импульс заданной длительности, пакеты или непрерывную последовательность импульсов с заданным периодом (частотой). Синхронизация счетчика и генератора производится по выбору от внутреннего опорного генератора или от внешнего сигнала на цифровом входе.

Модуль поставляется с интерфейсами USB, PCI, PCIE, PXI, PXIe (в зависимости от типа модуля) и может быть подсоединен к компьютеру (контроллеру) соответственно по интерфейсу USB, установлены в слоты PCI, PCIE компьютера, или установлены в слоты шасси типа PXI, PXIe.

Модуль может иметь различные модификации по исполнению сигнальных разъемов. Конструктивно модуль выполнен в виде печатной платы, на которой закреплены лицевая панель с разъемами для присоединения сигнальных кабелей, и разъем интерфейса. Модуль с интерфейсом USB помещен в прочный металлический корпус, для его питания требуется внешний источник постоянного напряжения. Внешний вид модуля показан на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Внешний вид платы NI PCI-6221

По условиям эксплуатации модули соответствуют 3 группе ГОСТ 22261-94 с рабочим диапазоном температур:

- от 0 до 45°C для модулей с интерфейсом USB, PCIe;
- от 0 до 55°C для модулей с интерфейсом PCI, PXI, PXIe.

Программное обеспечение (драйвер) выполняет функции управления режимами работы, математические функции обработки, представления, записи и хранения измерительной информации.

Уровень защиты – «низкий» по Р50.2.077-2014 (класс риска «А» по WELMEC 7.2 (руководство по программному обеспечению)). Идентификационные данные программного обеспечения (ПО) приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Идентификационные данные ПО платы NI PCI-6221

Наименование данных	Значение
Идентификационное наименование	NI-DAQmx
Идентификационный номер версии	9.2.0 и выше

#### 1.4.2 Преобразователь угловых перемещений BE178A5

Фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений типа BE178A5 предназначен для использования в системах автоматического регулирования станков или роботов. Он служит для информационной связи по положению между исполнительными механизмами и устройством числового программного управления (ЧПУ). Может быть также применён в других областях техники, в которых есть системы автоматического или автоматизированного контроля, регулирования и управления. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.6.

Преобразователь состоит из трех основных частей: механической, оптической и электронной.

Механическая часть обеспечивает вращение вала преобразователя относительно корпуса. Имеет базовые поверхности для установки и присоединения, обеспечивает расположение оптической и электронных частей преобразователя, защищает от влаги, пыли и механического воздействия.

Таблица 1.6 – Характеристики датчика BE178A5

№	Наименование параметра	Значение
1	Класс точности преобразователя по ГОСТ 26242-84	8
2	Количество выходных сигналов: А – основной $\bar{A}$ – инверсный основному В – смещенный $\bar{B}$ – инверсный смещенному Z – начало отсчета $\bar{Z}$ – инверсный начала отсчета	6 + + + + + +
3	Форму выходных сигналов	прямоугольная
4	Длительность сигнала Z в долях периода основного сигнала	$0.25 \pm 0.125$
5	Длительность сигналов при напряжении питания 5 В - в состоянии лог. «0», В, не более - в состоянии лог. «1», В, не менее	0.5 2.4
6	Количество периодов выходных сигналов за один оборот вала сигналов А, $\bar{A}$ , В, $\bar{B}$ Z, $\bar{Z}$	250 1
7	Диапазон рабочих температур, °С	+5...+55
8	Масса, кг, не более	0.33
9	Напряжение питания, В	$5 \pm 5\%$
10	Общая потребляемая мощность, Вт, не более	1.5

Оптическая часть содержит светодиод, линзу, растровую индикаторную пластину и растровый диск. Световой поток светодиода проходит через линзу, растровую индикаторную пластину и растровый диск. При вращении растрового диска меняется пропускание света через растровое сопряжение, а также ток, поступающий с фотодиодов. Растровый диск и растровая индикаторная пластина в паре создают обтюрационное растровое сопряжение. На индикаторной пластине растры расположены в два сектора, сдвинутые один относительно другого на  $1/4$  шага растров. Два фотодиода, установленные над каждым из секторов растровой индикаторной пластины и сопрягаемыми с ним растрами диска, выдают несформированные сигналы А и В (рисунок 1.14).

Фотодиод, расположенный в центральной части растрового диска выдает несформированный электрический сигнал начала отсчета Z. Далее с сигналами работает электрическая часть датчика. Несформированные сигналы всех 3-х каналов подаются на входы формирователей (рисунок 1.14) преобразовывающих синусоидальное напряжение в прямоугольные импульсы. Каждому периоду синусоидального сигнала соответствует один период выходного прямоугольного сигнала. Формирователем импульсов служит компаратор. С целью получения прямых и инверсных сигналов каждого канала и получения необходимой мощности для последующей передачи в УЧПУ сигналы с компараторов поступают на выходные каскады, выполненные на микросхемах типа К155ЛЕ6.

Выходные сигналы с датчика, вращающегося по часовой стрелке, представлены на рисунок 1.15. Импульсы канала Z следуют с частотой вращения вала датчика. Импульсы каналов А и В выходят с одинаковой частотой и в 250 раз большей чем у импульсов Z. Импульсы А и В смещены друг от друга по фазе на четверть периода или на  $90^\circ$ .

Рисунок 1.16 показывает изменение направления фазового сдвига между импульсами А и В с изменением направления вращения вала датчика. Таким образом появляется возможность по фазовому сдвигу между импульсами А и В

однозначно определять направление вращения датчика, а значит и направление перемещения.

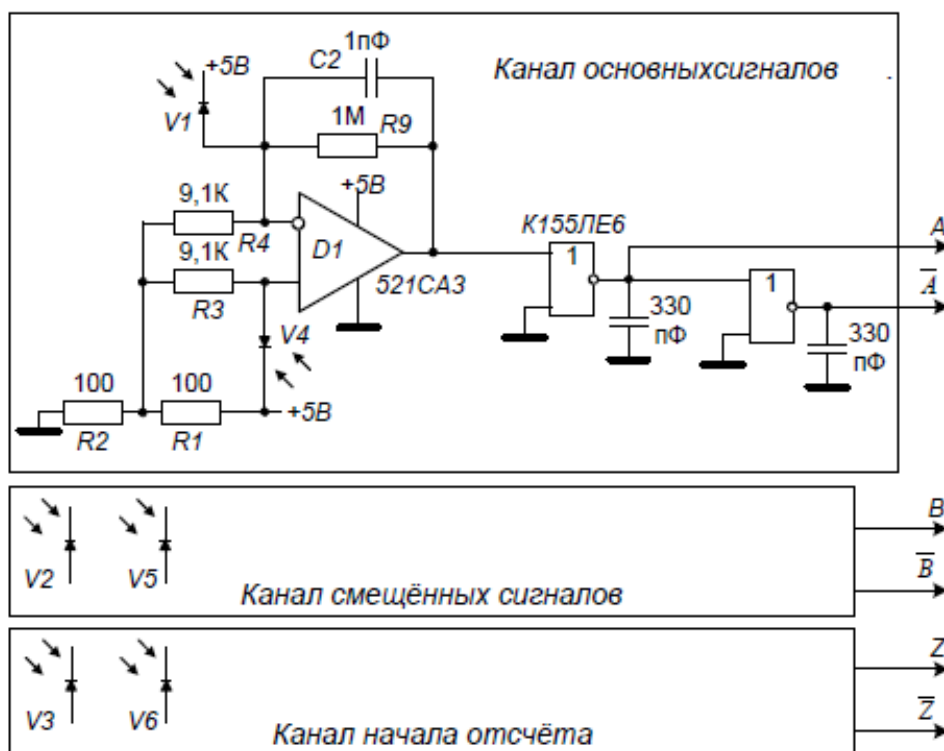


Рисунок 1.14 – Функциональная схема электрической части BE178A5

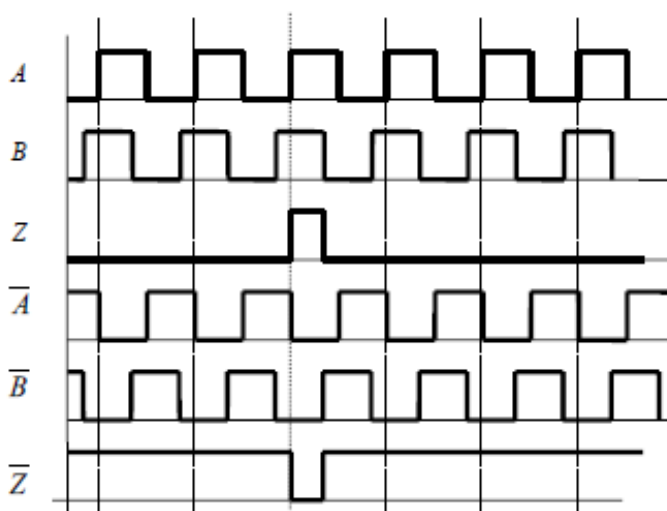


Рисунок 1.15 – Выходные сигналы датчика, при вращении по часовой стрелке



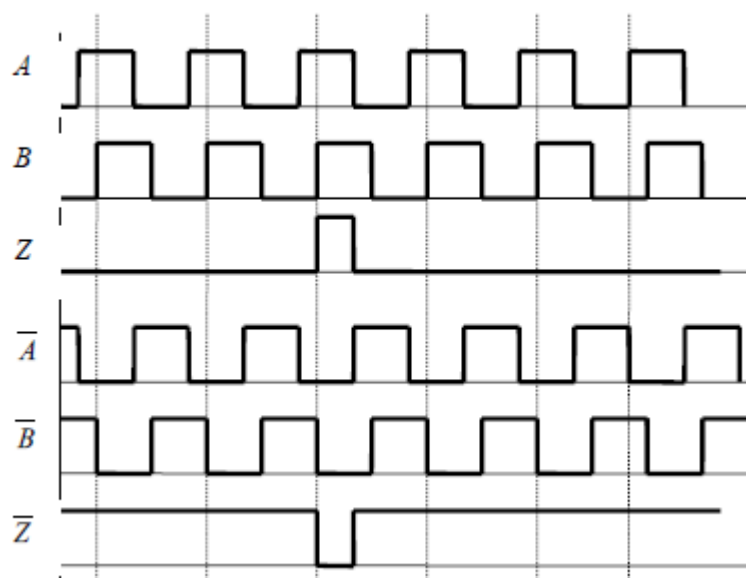


Рисунок 1.16 – Выходные сигнала датчика при вращении против часовой стрелки

Логика определения положения может вырабатывать «1» (обозначая направление по часовой стрелке), в случае когда в момент обнаружения «фронта» (перехода из «0» в «1») в канале А, в канале В стоит уровень «1». И наоборот, логика определения положения может вырабатывать «0» (обозначая направление против часовой стрелки), в случае когда в момент обнаружения «фронта» (перехода из «0» в «1») в канале А, в канале В стоит уровень «0».

### 1.5 Описание стенда для исследования характеристик одной степени подвижности робота ТУР-10К

Исходный вид экрана виртуального стенда сразу после загрузки программы в среде *LabVIEW* представлен на рисунке 1.17. Виртуальные приборы, реализованные программными средствами пакета *LabVIEW*, наложены на экране на мнемосхему привода.

Для отображения функциональных элементов привода на мнемосхеме используются следующие обозначения:

- ГПН – генератор пилообразного напряжения;
- G1 – задающий генератор импульсов ШИП;
- УГР – узел гальванической развязки;
- РС – регулятор скорости;
- ТО – узел токоограничения;
- РТ – регулятор тока;
- БП – блок питания цепей управления привода;
- TG – тахогенератор (датчик скорости);
- ДТ – датчик тока;
- G2 – генератор модуляции узла гальванической развязки в составе ДТ;
- В – выпрямитель силового напряжения ШИП;
- М – машина постоянного тока (электродвигатель);
- ИДП – импульсный датчик положения;
- L – дроссель в якорной цепи;
- RS – шунт для контроля тока в якорной цепи.

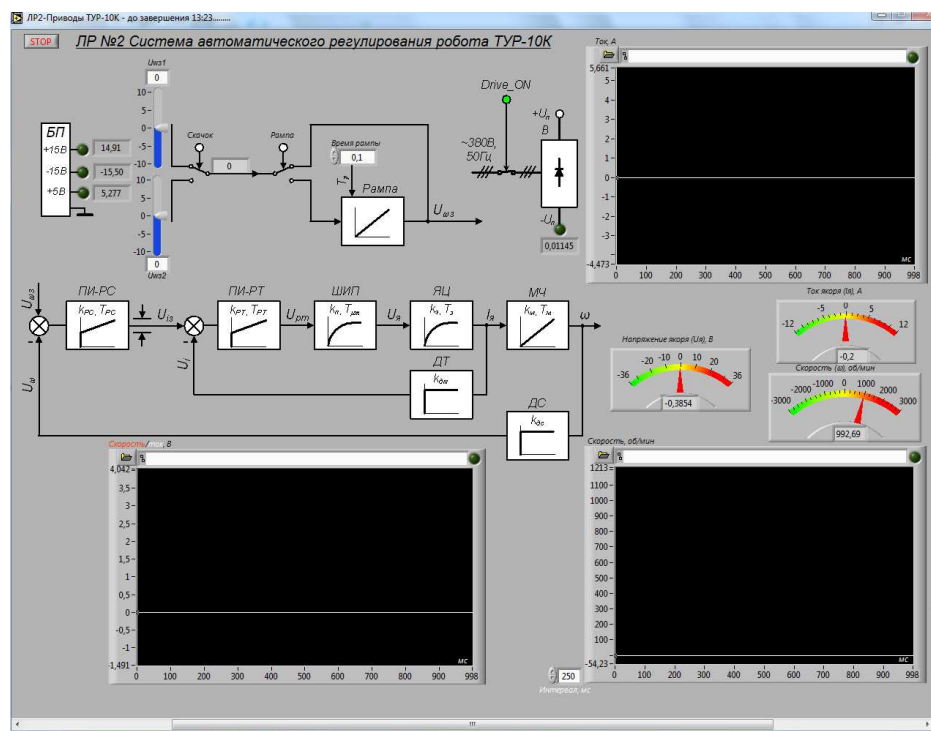



Рисунок 1.17 – Исходный вид экрана виртуального стенда

Нанесённые на мнемосхему контрольные точки одновременно являются кнопками, нажатием мышью на которые, выбирается сигнал для отображения на виртуальном осциллографе. Кнопка управления осциллографом в его правом верхнем углу позволяют сохранить картинку сигнала в файле. Путь к нему предварительно задан пользователем с помощью диалога, вызываемого левой верхней кнопкой осциллографа. Сигналы в контрольных точках сначала могут просматриваться по отдельности. Затем возможен просмотр нескольких сигналов на одном экране в режиме многоканального осциллографа с памятью. Вид картинки одновременно вырабатываемых сигналов имеет важнейшее значение для правильного понимания логики переключения ключей широтно-импульсного преобразователя.

С назначением всех элементов управления и контроля можно ознакомиться выбрав режим вывода контекстной помощи ( *Context Help* ) нажатием клавиш *Ctrl+H*. После этого откроется окно контекстной помощи, а в нём будет отображаться информация об элементе управления на который в данный момент указывает курсор мыши. Повторное нажатие *Ctrl+H* отменит режим вывода контекстной помощи.

Пока программа виртуального стенда не запущена на серый фон передней панели нанесена сетка. Для запуска программы виртуального стенда и начала управления приводом служит кнопка «», в левом верхнем углу экрана. После запуска серый фон передней панели становится сплошным, сетка снимается (рисунок 1.18). Появляется возможность управлять взаимодействием с приводом и контролировать результаты управления.

Кроме просмотра картинок сигналов с целью контроля состояния привода у пользователя имеется возможность активного управления приводом. Нажатие кнопки *DRIVE\_ON* приводит к замыканию виртуального ключа и к включению реального пускателя, подающего напряжение в силовую цепь привода. Перемещение движка виртуального прибора «Задание скорости» приводит к

выдаче реального напряжения задания на вход регулятора скорости привода и установку скорости в соответствии с этим заданием.

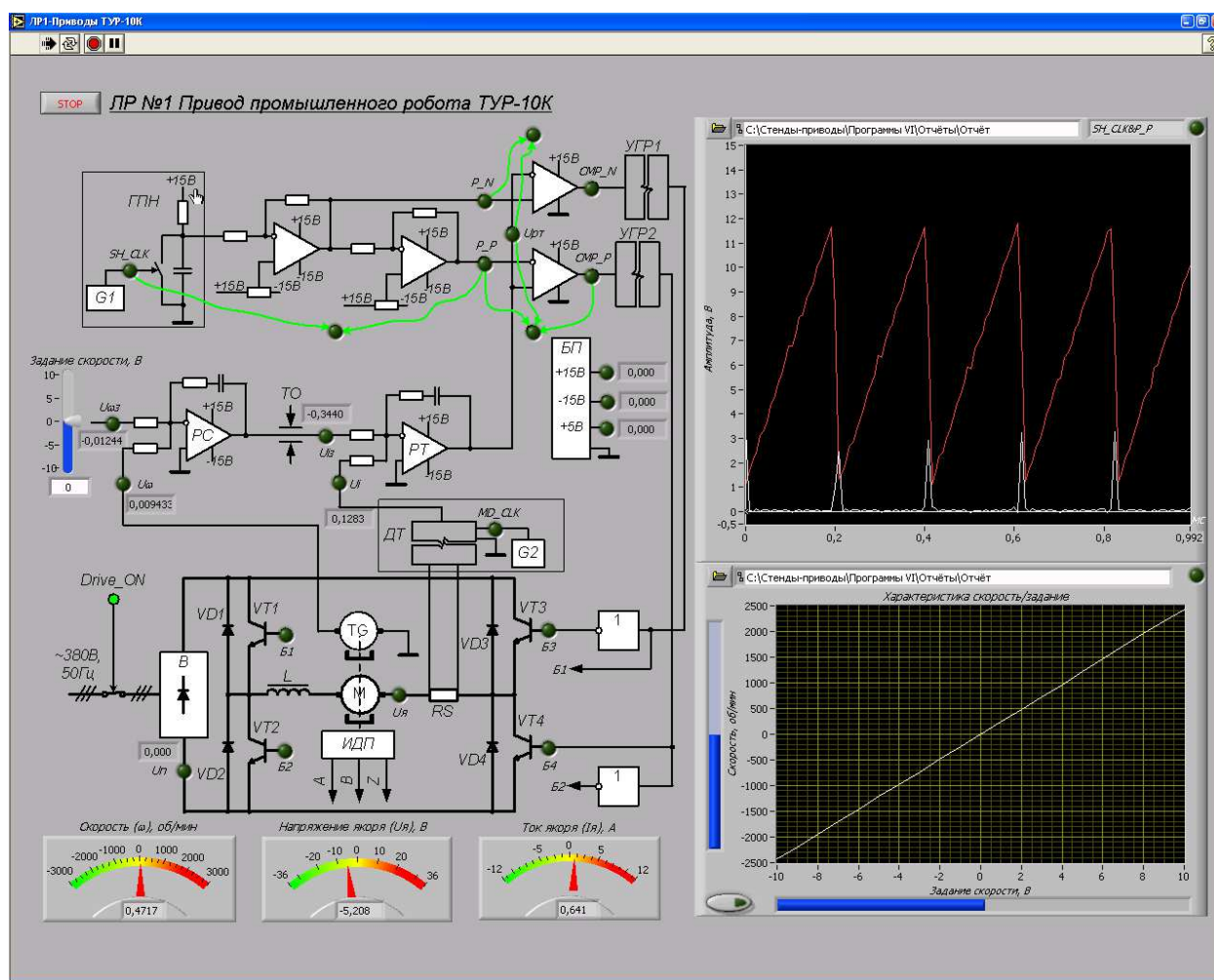


Рисунок 1.18 – Рабочий вид экрана виртуального стенда

Виртуальный прибор «Скорость, об/мин» измеряет фактическую скорость: аналоговый сигнал с тахогенератора ( как показано на мнемосхеме ) считывается платой ввода/вывода, оцифровывается, нормализуется и выводится на экран в числовом виде.

Виртуальный прибор «Ток, А» измеряет фактический ток якоря: аналоговый сигнал с датчика тока ( как показано на мнемосхеме ) считывается платой ввода/вывода, оцифровывается, нормализуется и выводится на экран в числовом виде.

Снятие характеристики скорость/задание автоматизировано средствами *LabVIEW*. Запрограммирован 20-шаговый цикл, в котором задание изменяется каждый шаг на 1 вольт от минимального до максимального значения. При этом фиксируются и запоминаются в массиве значения скорости и задания на каждом шаге. В результате в конце цикла в массиве накапливается 20 значений точек характеристики. Они и выводятся на графике по завершении опыта. Динамика изменений в процессе снятия характеристики отображается на вертикальной ( скорость ) и горизонтальной ( задание ) оси.

## 1.6 Описание системы автоматического регулирования ( САР ) привода робота ТУР-10К

### 1.6.1 Типовой сервопривод одной координаты робота

Типовой сервопривод координаты робота строится на основе трёхконтурной системы подчинённого регулирования (рисунок 1.19).

Двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов вращается со скоростью  $\omega$ , определяемой напряжением  $U_{\text{я}}$  подаваемым на якорь, и перемещает в положение  $\theta$  механизм координаты. С валом двигателя жёстко сочленены валы двух датчиков: датчика скорости и датчика положения

Используемый в качестве датчика скорости тахогенератор, вращаясь вместе с двигателем, формирует на выходе сигнал  $U_{\omega}$  прямо пропорциональный скорости вращения двигателя  $\omega$ .

Также вращаясь одновременно с двигателем, датчик положения обеспечивает формирование на выходе сигнала  $U_{\theta}$  зависящего от угла поворота вала  $\theta$ , то есть, от положения по координате.

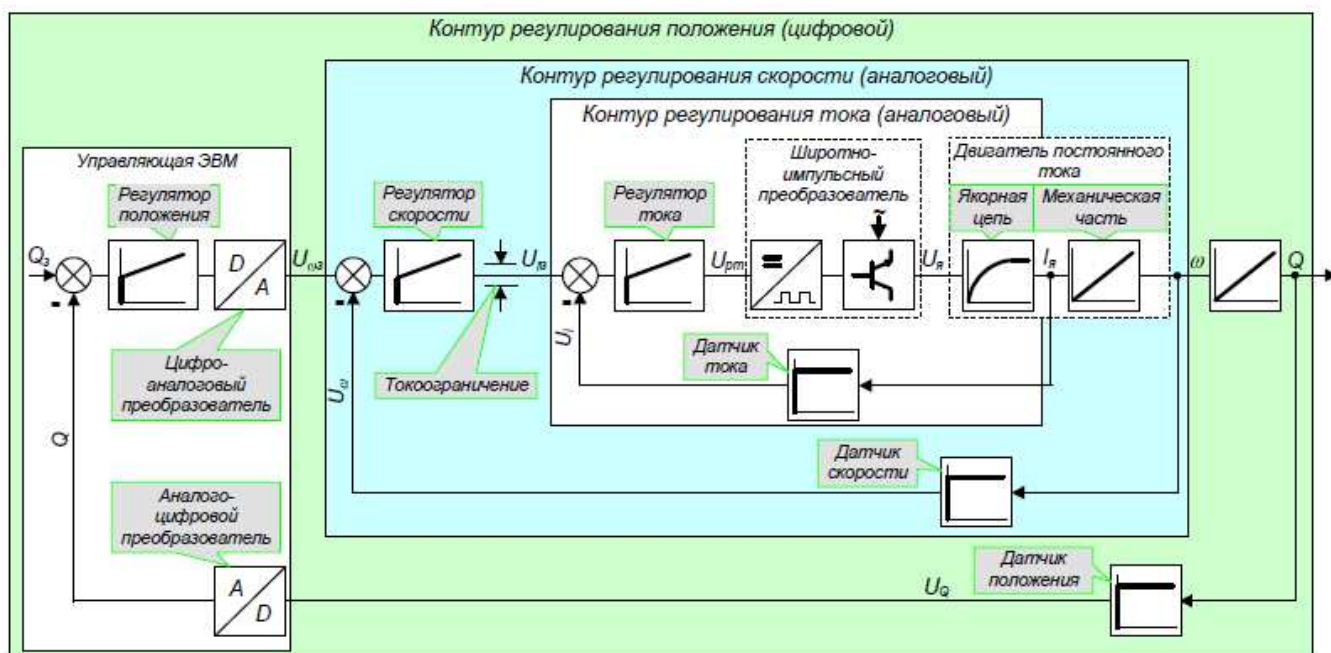


Рисунок 1.19 – Функциональная схема САР привода одной координаты робота

Регулятор положения реализован средствами управляющей ЭВМ и является цифровым. Поэтому аналоговый сигнал обратной связи по положению для согласования с цифровым регулятором положения должен быть преобразован в цифровой двоичный код. Для этой цели используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Скорость вращения двигателя регулируется посредством изменения напряжения  $U_{я}$ , которое определяет ток двигателя  $I_{я}$ , контролируемый датчиком тока (рисунок 1.19). Ток двигателя определяет разгоняющий двигатель момент вращения, а значит обеспечивает изменение скорости привода. Напряжение  $U_{я}$  формирует широтно-импульсный преобразователь (рисунок 11.19). Сетевое переменное напряжение преобразователь позволяет выпрямлять и уменьшать до требуемой величины, соответствующей нужной скорости двигателя. Требуемая величина напряжения  $U_{я}$  определяется величиной сигнала задания  $U_{прт}$ .

Задание  $U_{прт}$  формирует регулятор тока по результатам сравнения вычитанием сигнала задания тока двигателя  $U_{из}$  и сигнала  $U_{I}$  пропорционального текущему значению тока  $I_{я}$ .  $U_{прт}$  всегда будет так воздействовать через напряжение

$U_{\text{я}}$  на ток  $I_{\text{я}}$ , чтобы устранить разницу  $U_{\text{IЗ}} - U_{\text{I}}$ .

Таким образом, регулятор тока, преобразователь, двигатель и датчик тока, образуют контур регулирования тока (рисунок 1.19). Он позволяет управлять током двигателя, то есть добиваться соответствия реального тока двигателя заданию тока. Ограничение тока в динамических режимах (токоограничение) обеспечивается путём ограничения задания тока  $U_{\text{IЗ}}$  на входе контура тока, которое выдаёт регулятор скорости.

Контур регулирования тока делают управляемым от регулятора скорости или подчинённым контуру скорости. Контур регулирования скорости будет включать в себя весь контур тока, механическую часть двигателя, датчик скорости и регулятор скорости. Регулятор скорости формирует на выходе сигнал, определяемый разностью между реальной скоростью двигателя и заданной ( $U_{\omega\text{З}} - U_{\omega}$ ). Этот сигнал является заданием тока двигателя  $U_{\text{IЗ}}$ . Получается, что чем больше отличается реальная скорость от заданной, тем большим будет ток двигателя, который через момент управляет ускорением привода. Ускорение привода приводит к новому значению  $U_{\omega\text{З}} - U_{\omega}$ , а значит к новому току и ускорению.

Диаграмма работы контура скорости представлена на рисунке 1.20.

Когда необходимо увеличить скорость двигателя, сначала увеличивается задание скорости  $U_{\omega\text{З}}$ , затем последовательно:

- 1) увеличивается  $U_{\text{IЗ}}$ ;
- 2) увеличивается ток двигателя  $I_{\text{я}}$ ;
- 3) увеличивается до максимума момент двигателя в сторону направления движения;
- 4) двигатель ускоряется сначала с максимальным темпом.

В процессе ускорения будет последовательно происходить:

- 1) увеличение скорости  $\omega$  и сигнала с датчика скорости  $U_{\omega}$ ;
- 2) уменьшение разности  $U_{\omega\text{З}} - U_{\omega}$ , а значит  $U_{\text{IЗ}}$ ;
- 3) уменьшение тока двигателя  $I_{\text{я}}$ ;



4) уменьшение момента двигателя, значит снижение темпа ускорения.

Это ускорение будет происходить до тех пор пока скорость не сравняется с заданием. Тогда разгон прекратится.

Аналогично система будет функционировать и при переходе на пониженные скорости (рисунок 1.20, снижение скорости).

При увеличении нагрузки система будет отрабатывать возмущение по моменту и восстанавливать скорость за счёт увеличения момента двигателя (тока якоря). На первоначальное падение скорости при увеличении нагрузки система управления за счёт обратной связи по скорости отреагирует быстрым (насколько позволяет быстродействие контура тока) увеличением тока до максимального значения. Вследствие этого с максимальным моментом двигателя начнётся ускорение привода. По мере ускорения и приближения к заданной скорости ток, момент и темп ускорения будут уменьшаться. В равновесие система вернётся, когда скорость станет равной заданной, при этом момент двигателя сравняется с новым моментом статической нагрузки.



Рисунок 1.20 – Диаграмма работы контура скорости



## 2 Принципиальные электрические и функциональные схемы привода

Схема электрическая принципиальная – графический конструкторский документ, отображающий составные части изделия электротехнического назначения и связи между ними.

Принципиальные схемы с достаточной полнотой отражают состав элементов, вспомогательной аппаратуры и связей между ними, входящих в отдельный узел автоматизации и дающих детальное представление о принципе его работы. На основании принципиальных схем разрабатывают схемы внешних и внутренних соединений.

Принципиальные схемы служат для наладки и эксплуатации представленного стенда. Они разработаны в соответствии с техническим заданием и на основании решений, принятых в функциональных схемах.

Функциональные схемы предназначены для разъяснения процессов, происходящих в отдельных функциональных цепях изделия или изделия в целом. Для сложного изделия разрабатывается несколько функциональных схем, поясняющих происходящие процессы при различных предусмотренных режимах работы. Количество функциональных схем, разрабатываемых на изделие, степень их детализации и объем помещаемых сведений определяется разработчиком с учетом особенностей изделия. Функциональные части и связи между ними изображают в виде условных графических обозначений, установленных в соответствующих стандартах на условные графические обозначения этих групп и элементов.

## 2.1 Принципиальная электрическая схема генератора широтно-импульсного преобразователя

ШИП состоит из силовой части на основе транзисторных ключей и широтно-импульсного модулятора (ШИМ), управляющего коммутацией силовых ключей.

Дискретность работы ШИП задаёт генератор прямоугольных импульсов  $SH\_CLK$ . Построенный на микросхемах  $DD5$ ,  $DD9$  и окружающих конденсаторах с резисторами, этот генератор формирует на выходе импульсы, управляющие транзисторным ключом  $VT2$ . Последний, открываясь, замыкает цепь разряда конденсатора  $C10$ , а закрываясь, позволяет этому конденсатору заряжаться по цепи "+15V,  $VT1$ ,  $C10$ ". Полевой транзистор  $VT1$  играет в этой цепи роль переменного резистора. Его значение определяется напряжением приходящим на затвор  $VT1$ , которое задаётся потенциометром  $R3$ . Таким образом, от потенциометра  $R3$  зависит темп заряда конденсатора  $C10$ , формирующего пилообразные напряжения  $P\_N$  и  $P\_P$ .

## 2.2 Принципиальная электрическая схема регулятора скорости

Произведём выбор номиналов элементов регулятора скорости.

Выбор должен быть обусловлен необходимостью обеспечения трёх условий.

- Расчётных параметров ПИ-регулятора: постоянная времени  $T_{pc} = 3,76$  мс и коэффициент  $k_{pc} = 10.1$ .
- Согласования максимума задания скорости на входе  $U_{\omega z} = \pm 10$  В с максимальной скоростью двигателя на входе  $U_{\omega} = \pm 3000$  об/мин.
- Обеспечения фильтров как в канале обратной связи по скорости ( $T_{\phi c} = 0,24$ мс) так и в канале задания с постоянной времени ( $T_{\phi zc} = 0,047$ мс).

Номиналы элементов регулятора скорости выбраны исходя из соотношений:

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\frac{R_{17}}{R_5+R_{10}+R_{12}} = k_{pc} = 10.1; \quad (2.1)$$

$$R_{17} \cdot C_{15} = T_{pc} = 3,76 \text{ мс.} \quad (2.2)$$

Приемлемо будет:  $R_{17} = 360 \text{ кОм}$ ,  $C_{15} = 10 \text{ нФ}$ .

Поэтому должно быть:  $R_5+R_{10}+R_{12} = 360/10 = 36 \text{ кОм}$ .

С учетом того, что максимальный сигнал задания скорости  $U_{\omega_{\text{макс}}} = 10 \text{ В}$  должен соответствовать максимальной скорости двигателя  $\omega_{\text{макс}} = 3000 \text{ об/мин}$  (при этом  $U_{\omega_{\text{макс}}} = 0,02 \cdot 3000 = 60 \text{ В}$ ), входные резисторы по заданию  $R_6+R_{13}$  выбраны исходя из соотношения

$$\frac{R_5+R_{10}+R_{12}}{R_6+R_{13}} = \frac{U_{\omega_{\text{макс}}}}{U_{\omega_{\text{макс}}}} = \frac{60}{10} = 6 \quad (2.3)$$

Соответственно

$$R_6+R_{13} = (R_5+R_{10}+R_{12})/6 = 36/6 = 6 \text{ кОм.} \quad (2.4)$$

Далее следует исходить из того, что при расчётах учитывался фильтр в канале обратной связи по скорости имеющий постоянную времени

$$T_{\phi c} = R_5 \cdot C_5 = 2.4 \text{ кОм} \cdot 0.1 \text{ мкФ} = 0.24 \text{ мс.} \quad (2.5)$$

Поэтому следует принять номинал  $R_5 = 2.4 \text{ кОм}$ .

Тогда

$$R_{10} + R_{12} = 36 - 2.4 = 33.6 \text{ кОм.} \quad (2.6)$$

Чтобы не менять потенциометр  $R_{10} = 22 \text{ кОм}$ , берём  $R_{12} = 20 \text{ кОм}$ , а  $R_{10}$  настраиваем равным  $13.6 \text{ кОм}$ .

Фильтр по входу задания

$$T_{\phi zc} = 0.047 \text{ мс} = R_6 \cdot C_5 = 4.7 \text{ кОм} \cdot 0.01 \text{ мкФ.} \quad (2.7)$$

При  $R_6 = 4.7 \text{ кОм}$  следует выбрать

$$R_{13} = 6 - 4.7 = 1.3 \text{ кОм.} \quad (2.8)$$

Теперь все условия выполнены.

Результат настройки проверяется по переходному процессу скорости двигателя подачей ступенчатого входного сигнала («скачка») на вход регулятора скорости. Причем, амплитуда «скачка» должна быть такой, чтобы исключить режим токоограничения при разгоне.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2.3 Функциональная схема электроприводов робота ТУР-10К

Вводной автомат  $Q1$  рассчитан на номинальный ток  $I_n = 10\text{А}$  и содержит элементы защиты коммутируемых цепей:

- от перегрузок с регулируемой уставкой от 0.9 до  $1.15I_n$ ;
- от токов короткого замыкания с уставкой  $12I_n$ .

Для подачи сетевого напряжения на выпрямитель необходимо кроме автомата  $Q1$  включить реле  $K1$  нажатием кнопки «Пуск».

$K1$  сработает при следующих условиях:

- отжаты кнопки «Стоп» на шкафу БУЭП (блок управления электроприводами);
- есть давление в пневмосети;
- включен выключатель  $S1$ , коммутирующий сетевое переменное напряжение на вход источников постоянного напряжения;
- есть напряжения на выходах всех четырех стабилизаторов источников питания цепей управления  $CT1$ ,  $CT2$ ,  $CT3$ ,  $CT4$ ;
- отсутствует наезд звеньев манипулятора на аварийные концевые выключатели ограничения перемещений;
- включены либо все автоматы  $Q2-Q6$  силовых цепей приводов (режим «Работа»), либо автомат  $Q7$  (режим «Наладка»).

В цепи постоянного тока выпрямительного моста установлены амперметр и вольтметр для контроля значений тока и напряжения, выдаваемых выпрямителем в якорные цепи приводов. Имеется также средство защиты от коммутационных перенапряжений - разрядный ключ.

Для подачи постоянного напряжения с выпрямителя на входы силовых транзисторных ключей включаются автоматы  $Q2-Q6$ . Они осуществляют защиту силовых цепей постоянного тока отдельных приводов координат от перегрузок (тепловая защита) и от коротких замыканий в цепях якоря. Автоматы выбраны

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

под номинальный ток двигателя 10 А. Их уставку тепловой защиты можно варьировать в диапазоне от 0.9 до  $1.15I_n$ . Защита от короткого замыкания сработает при токе 120 А ( $12I_n$ ).

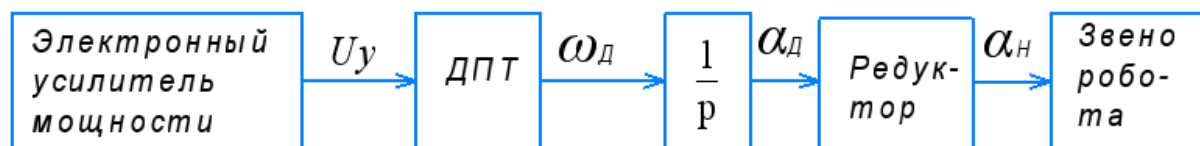
Кроме автоматов в якорных цепях двигателей координат установлены дроссели, шунты и предохранители. Дроссели  $L1-L5$  служат для сглаживания пульсаций якорного тока, шунты  $SH1-SH5$  – для получения сигнала обратной связи по току якоря, а предохранители  $FU1-FU5$  – для защиты от коротких замыканий.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

### 3 Разработка математической модели

#### 3.1 Составление математической модели силовой части системы

Рассмотрим составление математической модели в виде структурной схемы на примере следящей системы ( рисунок 3.1 ).



ДПТ – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением;  $U_y$  – напряжение на выходе усилителя мощности;  $\alpha_d$  и  $\alpha_n$  – углы поворота вала двигателя и редуктора, соответственно

Рисунок 3.1 – Структурная схема исполнительной следящей системы  
промышленного робота

Элементы системы описываются следующими дифференциальными уравнениями и передаточными функциями. Вначале записываем дифференциальное уравнение звена, затем, применяя преобразование Лапласа, переходим к операторному уравнению, из которого находим передаточную функцию.

##### 1. Электронный усилитель мощности

Работа усилителя тока описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_y \frac{du_y(t)}{dt} + u_y(t) = K_y \cdot \Delta u(t), \quad (3.1)$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления звена.

Применим преобразование Лапласа к (3.1):

$$T_y \cdot p \cdot U_y(p) + U_y(p) = K_y \Delta U(p). \quad (3.2)$$

Найдём передаточную функцию звена:

$$W_y(p) = \frac{U_y(p)}{\Delta U(p)} = \frac{K_y}{T_y p + 1}. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) является передаточной функцией первого порядка.

## 2. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением

Работа ДПТ с независимым возбуждением описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}}(t) = u_{\text{я}}(t) - k_E \omega_{\text{д}}(t) \\ J \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = k_M i_{\text{я}}(t) - M_C(t) \end{cases}, \quad (3.4)$$

где  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной обмотки ДПТ;

$i_{\text{я}}$  – ток якоря;

$R_{\text{я}}$  – сопротивление якоря;

$k_E$  – электрическая постоянная;

$k_M$  – механическая постоянная;

$\omega_{\text{д}}$  – угловая скорость на валу двигателя;

$J$  – момент инерции на валу двигателя;

$M_C$  – момент сопротивления;

$\frac{1}{Jp}$  – механическая часть системы.

Применим преобразование Лапласа к (3.4):



$$\begin{cases} L_{\text{я}} \cdot p \cdot i_{\text{я}} + R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}}(p) = U_{\text{я}}(p) - k_E \cdot \omega_{\text{д}}(p) \\ J \cdot p \cdot \omega_{\text{д}}(p) = k_M \cdot i_{\text{я}}(p) - M_{\text{с}}(p) \end{cases} \quad (3.5)$$

Передаточную функцию ДПТ можно разделить на две части: на передаточную функцию якорной цепи:

$$W_{\text{я}}(p) = \frac{i_{\text{я}}(p)}{\Delta U_{\text{я}}(p)} = \frac{1}{L_{\text{я}}p + R_{\text{я}}} \quad (3.6)$$

и передаточную функцию механической части:

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{\Delta M(p)} = \frac{1}{Jp} \quad (3.7)$$

По полученным характеристикам составим структурную схему ДПТ:

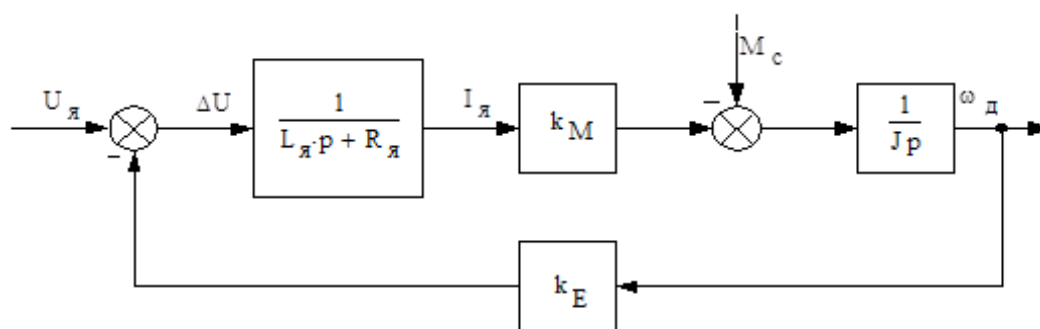


Рисунок 3.2 – Структурная схема ДПТ

Перенесём второй узел суммирования сигнала  $M_{\text{с}}$  на вход схемы и определим передаточные функции двигателя по управляющему  $W_{\text{д}}(p)$  и возмущающему воздействию  $W_{\text{дв}}(p)$ :

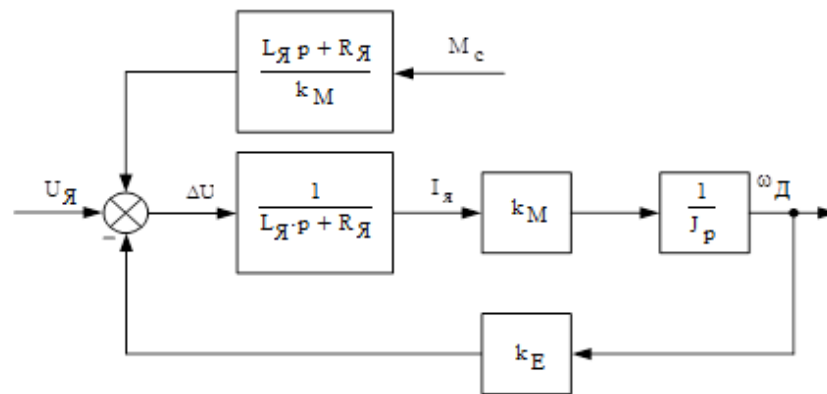


Рисунок 3.3 – Структурная схема ДПТ

По полученной схеме составим передаточную характеристику ДПТ:

$$W_D(p) = \frac{\omega_D(p)}{U_Y(p)} = \frac{\frac{k_M}{(L_Y p + R_Y) J p}}{1 + \frac{k_M}{(L_Y p + R_Y) J p} \cdot k_E} = \frac{k_M}{L_Y J p^2 + R_Y J p + k_E k_M} =$$

$$= \frac{K_D}{T_Y T_M p^2 + T_M p + 1}. \quad (3.8)$$

$$W_{ДВ}(p) = \frac{\omega_D(p)}{M_C(p)} = \frac{K_D K_M^{-1} R_Y (T_Y p + 1)}{T_Y T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (3.9)$$

где  $T_Y = \frac{L_Y}{R_Y}$ ,  $T_M = \frac{J R_Y}{k_E k_M}$ ,  $K_D = \frac{1}{k_E}$ .

В соответствии с (3.8) изменим структурную схему ДПТ:

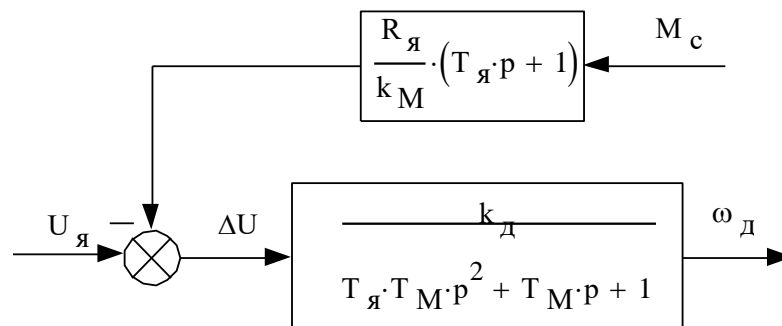


Рисунок 3.4 – Структурная схема ДПТ

### 3. Редуктор

Работа редуктора описывается следующим уравнением:

$$\alpha_H(t) = \frac{1}{i} \alpha_D(t). \quad (3.10)$$

Применим преобразование Лапласа к (3.10):

$$\alpha_H(p) = \frac{1}{i} \alpha_D(p). \quad (3.11)$$

Найдём передаточную функцию звена:

$$W_{\text{ред}}(p) = \frac{\alpha_H(p)}{\alpha_D(p)} = \frac{1}{i}. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.12) соответствует передаточной функции безынерционного звена.

### 4. Звено преобразования угловой скорости в угол поворота

Звено связи между скоростью двигателя и углом поворота.

$$\omega_D(t) = \frac{d\alpha_D(t)}{dt}. \quad (3.13)$$

Применим преобразование Лапласа к (3.13):

$$\omega_D(p) = p \alpha_D(p). \quad (3.14)$$

Найдём передаточную функцию звена:

$$W_{3C}(p) = \frac{\alpha_D(p)}{\omega_D(p)} = \frac{1}{p}. \quad (3.15)$$

Уравнение (3.15) соответствует интегратору.

Определим передаточную функцию неизменяемой части системы. В соответствии с определёнными передаточными характеристиками звеньев и рисунком 17 составим структурную схему системы:

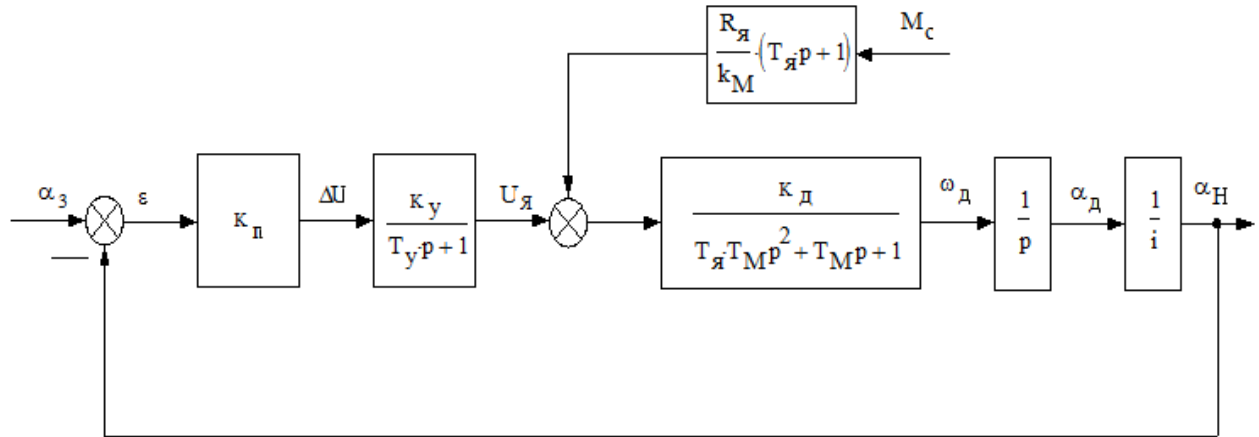


Рисунок 3.5 – Структурная схема неизменяемой части системы

По рисунку 3.5 определим передаточную функцию разомкнутой нескорректированной системы по управляющему воздействию, полагая, что  $M_c=0$  и обратная связь разомкнута:

$$W_H(p) = \frac{K_{\Pi} K_y K_{\frac{1}{i}}}{p(T_y p + 1)(T_я T_M p^2 + T_M p + 1)}. \quad (3.16)$$

Коэффициент усиления неизменяемой части системы равен:

$$K_o = K_{\Pi} K_y K_{\frac{1}{i}}. \quad (3.17)$$

## 4 Система подчиненного регулирования

### 4.1 Принципы подчиненного регулирования

Методика синтеза систем автоматического регулирования привода постоянного тока базируется на применении следующих принципов подчинённого регулирования.

Объект регулирования представляется в виде последовательно включённых звеньев, на выходе которых представлены параметры, подлежащие регулированию. Весь объект расчленяется на несколько последовательно включённых объектов, каждый из которых будет оптимизирован отдельно своим контуром регулирования.

1. Число контуров регулирования соответствует числу регулируемых параметров. При этом внешний контур называется основным, а внутренний – подчинённым.

2. В каждом контуре последовательно с объектом регулирования данного контура включается регулятор с передаточной функцией, обеспечивающей оптимальную настройку контура.

3. Регуляторы включаются каскадно, то есть последовательно друг за другом. При этом выходной параметр внешнего регулятора является заданием параметра для внутреннего контура.

4. Ограничение параметра внутреннего контура реализуется путём ограничения сигнала его задания.

5. Принцип подчинённости внутреннего контура внешнему заключается в том, что внутренний контур отрабатывает команду внешнего. Поэтому быстродействие внешнего контура ограничивается, прежде всего, быстродействием внутреннего контура и корректная работа внешнего контура возможна только при нормальной настройке внутреннего контура.

6. При выборе количества контуров регулирования необходимо делать так, чтобы в каждом контуре была одна большая постоянная времени или, максимум, две постоянных времени, которые могут быть скомпенсированы регулятором. Остальные инерционности контура должны быть несоизмеримо меньше. Все эти малые инерционности контура заменяются эквивалентной суммарной малой постоянной времени, которая называется  $T_{\mu}$ .

Внутренний контур обладает наибольшим быстродействием. Каждый внешний контур имеет быстродействие более чем в два раза меньшее, чем непосредственно ему подчинённый внутренний.

## 4.2 Критерии оптимизации

Оптимизировать контур – это значит обеспечить максимальную точность регулирования и быстродействие контура при минимальных значениях перерегулирования и колебательности регулируемого параметра.

В идеальном случае оптимальной настройкой контура является та, что обеспечивает прямоугольный график его переходной функции: с абсолютным быстродействием, без перерегулирования и колебательности. Однако, во-первых, делать этого не следует и, во-вторых, сделать это невозможно.

Не следует стремиться к абсолютному быстродействию в контуре скорости по двум причинам. Во-первых, имеются ограничения на скорость изменения тока якоря, исходя из коммутационных возможностей щёточно-коллекторного механизма двигателя. Во-вторых, быстрые изменения скорости привода создают ударные нагрузки на механизм, а они тоже должны быть ограничены.

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{1}{W_{\text{оп}}(s)} \quad (4.1)$$

Однако в этом случае будут скомпенсированы все инерционности контура, что недопустимо и невозможно.

Поэтому передаточная функция регулятора должна иметь вид

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{1}{W_{\text{оп}}(s)} \cdot W_{\text{ж}}(s) , \quad (4.2)$$

где  $W_{\text{ж}}(s)$  – желаемая передаточная функция *разомкнутого* контура, соответствующая требуемым показателям настройки *замкнутого* контура с точки зрения точности регулирования, быстродействия, перерегулирования и колебательности (рисунок 4.1).

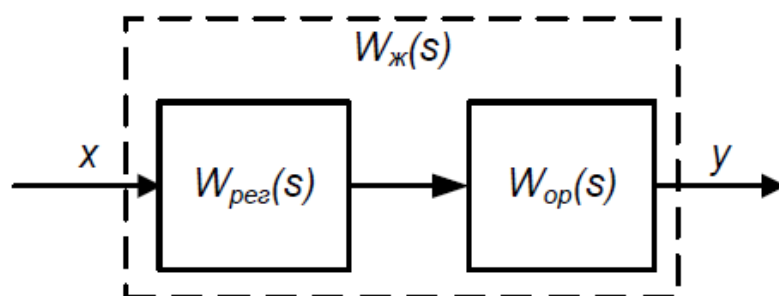


Рисунок 4.1 – Желаемая структура разомкнутой части оптимизируемого контура

В инженерной практике приняты два основных критерия оптимальности контура.

Первый критерий оптимизации получил в иностранной (немецкой) литературе название *Betrags Optimum*, а в отечественных источниках он называется технический или модульный оптимум. Согласно техническому оптимуму (ТО) оптимальным считается такой контур передаточная функция которого в разомкнутом состоянии будет иметь вид

$$W_{\text{жТО}}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)} \quad (4.3)$$

В таком случае интегрирующая часть с постоянной времени  $2T_{\mu}$  обеспечит астатический характер регулирования, то есть отсутствие статической ошибки

после завершения переходного процесса. Апериодическая часть с постоянной времени  $T_\mu$  обеспечит нужную форму переходной функции замкнутого контура. Постоянная  $T_\mu$  определит, с одной стороны, быстродействие контура, а с другой стороны – его помехоустойчивость.

Второй критерий оптимизации получил в иностранной (немецкой) литературе название *Simmetrische Optimum*, а в отечественных источниках он называется симметричный оптимум (СО). Оптимизация контура по такому оптимуму возможна только при наличии в объекте регулирования интегрирующего звена. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура с регулятором, соответствующим симметричному оптимуму будет отличаться от аналогичной функции технического оптимума на величину дополнительной передаточной функции  $W_{доп}(s)$

$$W_{доп}(s) = \frac{4 \cdot T_\mu \cdot s + 1}{4 \cdot T_\mu \cdot s}, \quad (4.4)$$

которая характеризует собой пропорционально-интегральное (ПИ) звено с коэффициентом передачи равным 1. Таким образом,

$$W_{жто}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)} \cdot \frac{4 \cdot T_\mu \cdot s + 1}{4 \cdot T_\mu \cdot s} \quad (4.5)$$



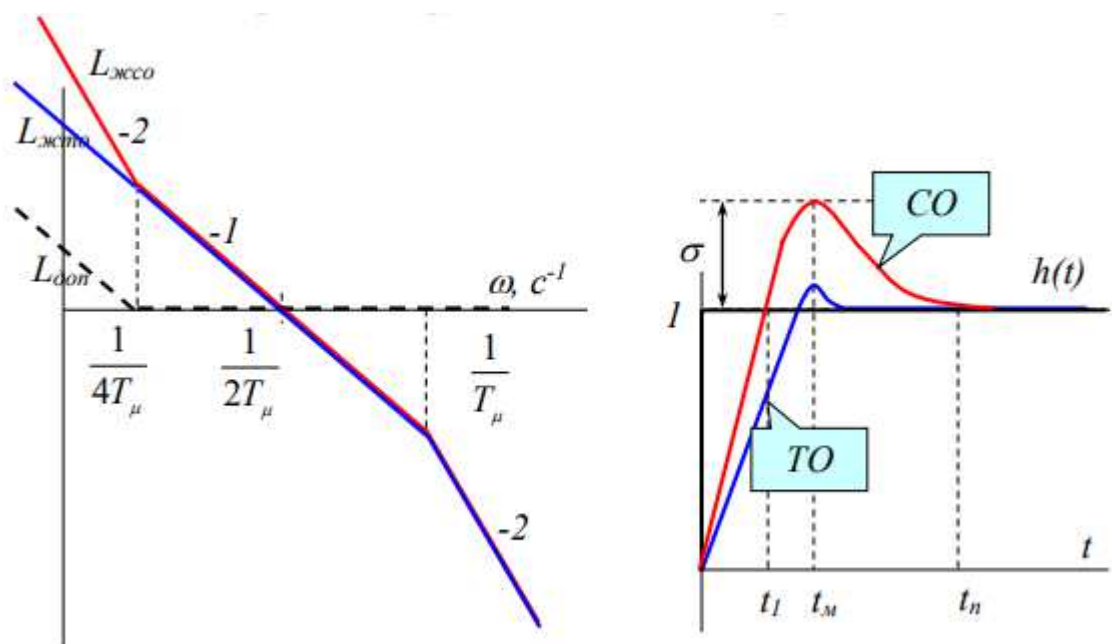


Рисунок 4.2 – ЛАЧХ и переходные функции технического (ТО) и симметричного (СО) оптимумов

Из сравнения показателей качества регулирования различных оптимумов (таблица 4.1) следует, что применять симметричный оптимум целесообразно, если требуется обеспечить наибольший запас устойчивости контура. Если же важнее обеспечить минимальное время переходного процесса или наименьшее перерегулирование, тогда лучше применять технический оптимум.

Синтез контуров системы автоматического регулирования привода с двигателем постоянного тока включает в себя определение структуры и параметров регуляторов. Она начинается всегда с внутреннего контура, то есть с контура тока.

### 4.3 Синтез контура тока

В общем случае контур тока синтезируется по техническому оптимуму. Это связано с тем, что снижать быстродействие контура тока нельзя, чтобы не начала проявляться обратная связь по ЭДС, которая в данных расчётах не учитывается.

В состав объекта регулирования контура тока ( рисунок 4.3) входят следующие включённые последовательно элементы: преобразователь, якорная цепь двигателя и датчик тока. Большой компенсируемой инерционностью контура тока будет электромагнитная постоянная якорной цепи  $T_{\text{я}}$ . В состав некомпенсируемой суммарной малой инерционности контура тока  $T_{\text{мт}}$  наибольший вклад внесут инерционности: преобразователя  $T_{\text{п}}$ , фильтра датчика тока  $T_{\text{дт}}$ , элементов на которых реализован регулятор (операционных усилителей)  $T_{\text{оурт}}$ . Следовательно  $T_{\text{мт}} = T_{\text{п}} + T_{\text{оурт}} + T_{\text{дт}}$

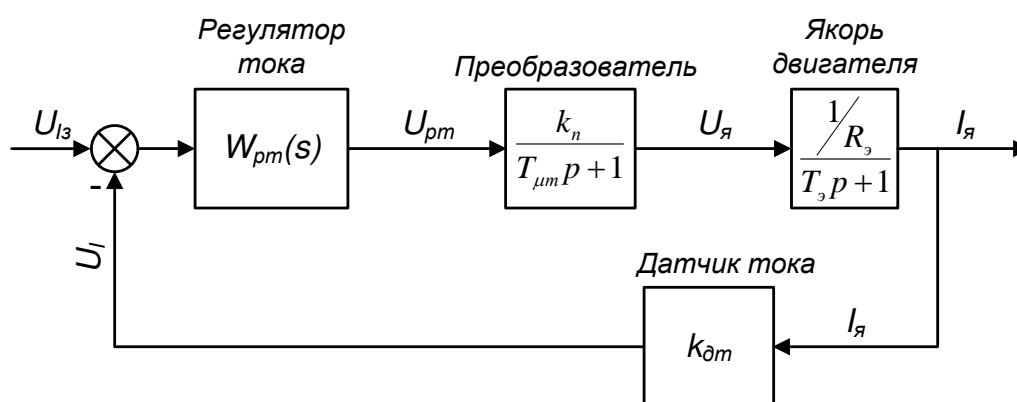


Рисунок 4.3 – Структурная схема контура тока.

Передаточная функция объекта регулирования:

$$W_{op}(s) = \frac{k_n \cdot k_{\text{дт}} \cdot \frac{1}{R_{\text{я}}}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1) \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1)} \quad (4.6)$$

Обозначим  $\frac{k_n \cdot k_{\text{дт}}}{R_{\text{я}}} = k_{\Sigma\text{т}}$  - суммарный коэффициент передачи объекта регулирования контура тока. Тогда при выборе в качестве желаемой передаточную функцию технического оптимума (4.3) и опираясь на выражение (4.2) получим

$$W_{pm}(s) = \frac{W_{жто}(s)}{W_{op}(s)} = \frac{(T_э \cdot s + 1) \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1)}{2 \cdot T_{\mu m} \cdot s \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1) \cdot k_{\Sigma m}} = \frac{T_э \cdot s + 1}{2 T_{\mu m} \cdot k_{\Sigma m} \cdot s} = k_{pm} \frac{T_э \cdot s + 1}{T_э \cdot s}, \quad (4.7)$$

где:

$$k_{pm} = \frac{T_э}{2 T_{\mu m} \cdot k_{\Sigma m}} \quad (4.8)$$

Объект регулирования контура тока (рисунок 1.19) состоит из ШИП, якорной цепи двигателя (якорь двигателя, дроссель, шунт) и датчика тока с фильтром на выходе.

Из малых некомпенсируемых постоянных времени объекта ( $T_{\mu t}$ ) практически значимы период следования импульсов управления  $T_u = 0,1..0,3$ мс и постоянная времени фильтра на выходе датчика тока

$$T_{\phi m} = R_{82} \cdot C_{31} = 2 \text{кОм} \cdot 0,01 \text{ мкФ} = 0,02 \text{ мс}.$$

Поэтому можно принять:

$$T_{\mu t} = T_{\mu} + T_{\phi t} = 0,23 + 0,02 = 0,25 \text{ мс} \quad (4.9)$$

Параметры объекта регулирования, найденные экспериментально следующие:

- коэффициент передачи ШИП  $k_n = U_{я}/U_{pm} = 2,64$ ;
- активное сопротивление якорной цепи  $R_э = 1,1 \text{ Ом}$ ;
- постоянная времени якорной цепи  $T_э = 5,7 \text{ мс}$ ;
- коэффициент передачи датчика тока  $k_{\phi m} = k_{\mu} \cdot k_{сз}$ .

Шунт представляет собой три одинаковых включенных параллельно мощных резистора величиной по 0,2 Ом. Поэтому:

$$k_{ш} = 0,2 / 3 = 0,066 \text{ В/А} \quad (4.10)$$

Коэффициент передачи согласующего звена  $k_{сз} = 3$ . Поэтому

$$k_{дт} = k_{ш} \cdot k_{сз} = 0,2 \text{ В/А} \quad (4.11)$$

Передаточная функция объекта регулирования получается перемножением передаточных функций элементов составляющих объект и с учётом того, что все его малые инерционности объединены вместе в одну общую суммарную малую постоянную времени контура тока  $T_{\muт}$ . Она была получена в выражении (4.6). Подставим в него данные якорной цепи привода робота ТУР-10К и получим

$$W_{оп}(s) = \frac{2.64 \cdot 0.2 \cdot 1 / 1.1}{(5.7s+1) \cdot (0.25s+1)} = \frac{0.48}{(5.7s+1) \cdot (0.25s+1)} \quad (4.12)$$

Структура и параметры регулятора тока в контуре тока (рисунок 4.4) выбираются по техническому оптимуму, которому соответствует желаемая передаточная функция вида (4.2). Согласно выражениям (4.7), (4.8):

$$k_{рт} = \frac{5.7}{2 \cdot 0.25 \cdot 0.48} = 23.75 \quad (4.13)$$

$$W_{рт}(s) = 23.75 \frac{5.7s+1}{5.7s} \quad (4.14)$$

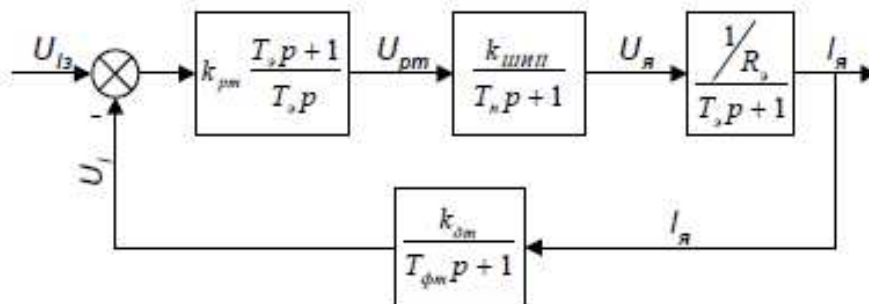


Рисунок 4.4 – Структурная схема контура тока

В результате регулятор тока оказался пропорционально-интегральным (ПИ) с коэффициентом усиления  $k_{р\tau}=23,75$  и постоянной времени  $T_{р\tau}=5,7\text{мс}$ .

Постоянная времени регулятора тока оказалась равной значению большой компенсируемой инерционности объекта – его электромагнитной постоянной времени  $T_{\Sigma}$ . Следовательно, качество регулирования оптимизированного контура не будет зависеть от  $T_{\Sigma}$ .

При оптимальном регуляторе тока основные показатели качества регулирования в замкнутом контуре тока будут такими как показано в таблице 4.1 ( $T_{\mu t}=0,25\text{мс}$ ).

Таблица 4.1 – Показатели качества регулирования контура тока технического оптимума

Наименование показателя	Значение
Запас устойчивости по фазе, $\Delta\varphi, ^\circ$	63
Перерегулирование, $\sigma, \%$	4.3
Время достижения 1-го установившегося значения, $t_1, \text{мс}$	$4.7T_{\mu} = 1.18$
Время достижения максимума, $t_m, \text{мс}$	$6.28T_{\mu} = 1.57$
Время переходного процесса, $t_n, \text{мс}$	$8.4T_{\mu} = 2.1$
Количество колебаний	1

Параметры элементов регулятора тока реализованного на базе операционного усилителя (рисунок 4.5) выбраны исходя из следующих соотношений:

$$\frac{R_{41}}{R_{82}+R_{42}} = 23,7; R_{41} \cdot C_{17} = 5,7\text{мс} \quad (4.15)$$

Фактически они равны:  $R41=75\text{ кОм}$ ;  $R42=1\text{ кОм}$ ;  $R82=2\text{ кОм}$ ;  $C17=75\text{ нФ}$ .  
Поэтому фактические значения параметров регулятора получились:

$$T_{\text{рт}} = R41 \cdot C17 = 75 \cdot 10^3 \cdot 75 \cdot 10^{-9} = 5,625\text{ мс} \quad (4.16)$$

$$k_{\text{рт}} = \frac{R41}{R42+R82} = \frac{75}{1+2} = 25 \quad (4.17)$$

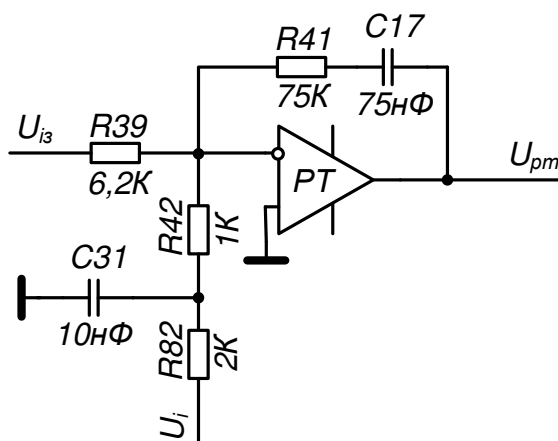


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема регулятора тока.

#### 4.4 Синтез контура скорости

Рассмотрим вариант синтеза контура скорости по *техническому оптимуму*.

В состав объекта регулирования контура скорости входят следующие включённые последовательно элементы: замкнутый контур тока, механическая часть двигателя и датчик скорости.

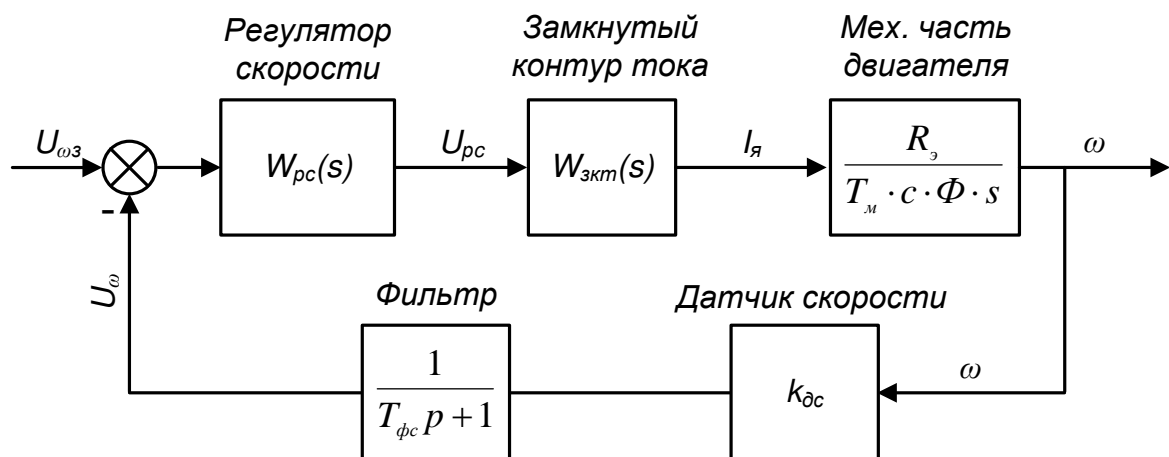


Рисунок 4.6 – Структурная схема контура скорости исходная.

Определим сначала передаточную функцию замкнутого контура тока, оптимизированного по техническому оптимуму. В общем случае, передаточная функция контура имеющего в составе прямую часть ( $W_{np}(s)$ ) и обратную связь ( $W_{oc}(s)$ ).

$$W(s) = \frac{W_{np}(s)}{1 + W_{np}(s) \cdot W_{oc}(s)} \quad (4.18)$$

Для контура тока

$$W_{np}(s) = W_{PT}(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{яц}(s) \quad (4.19)$$

$$W_{np}(s) = \frac{(T_я \cdot s + 1) \cdot R_я \cdot k_n}{2 \cdot T_{\mu m} \cdot s \cdot k_{\partial m} \cdot k_n \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1) \cdot R_я \cdot (T_я \cdot s + 1)} \quad (4.20)$$

$$W_{np}(s) = \frac{1/k_m}{2 \cdot T_{\mu m} \cdot s \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1)} \quad (4.21)$$

В обратной связи контура тока – датчик тока. Поэтому:

$$W_{oc}(s) = k_{\partial m} \quad (4.22)$$

После подстановки и преобразования

$$W_{zm}(s) = \frac{1/k_{\partial m}}{1+2 \cdot T_{\mu m} \cdot s \cdot (T_{\mu m} \cdot s + 1)} = \frac{1/k_{\partial m}}{2 \cdot T_{\mu m}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu m} \cdot s + 1} \quad (4.23)$$

Из полученного выражения видно, что замкнутый контур тока является звеном 2-го порядка. Использовать  $W_{zm}$  в таком виде неудобно, так как регулятор получится сложным. Поэтому упростим его путём пренебрежения первым членом знаменателя как величиной 2-го порядка малости. Получим

$$W_{zm}(s) = \frac{1/k_{\partial m}}{2 \cdot T_{\mu m} \cdot 1,4 \cdot s + 1} = \frac{1/k_{\partial m}}{T_{\kappa m} \cdot s + 1}, \quad (4.24)$$

где  $T_{\kappa m} = 2T_{\mu m} \cdot 1,4$ .

Здесь, умножением на коэффициент 1.4, учитывают пренебрежение вторым порядком малости.

Большой компенсируемой инерционностью контура скорости будет механическая постоянная времени  $T_m$ . В состав некомпенсируемой суммарной малой инерционности контура скорости  $T_{\mu c}$  наибольший вклад внесут инерционности: замкнутого контура тока  $T_{\kappa t}$  и фильтра в канале обратной связи по скорости  $T_{\phi c}$ .



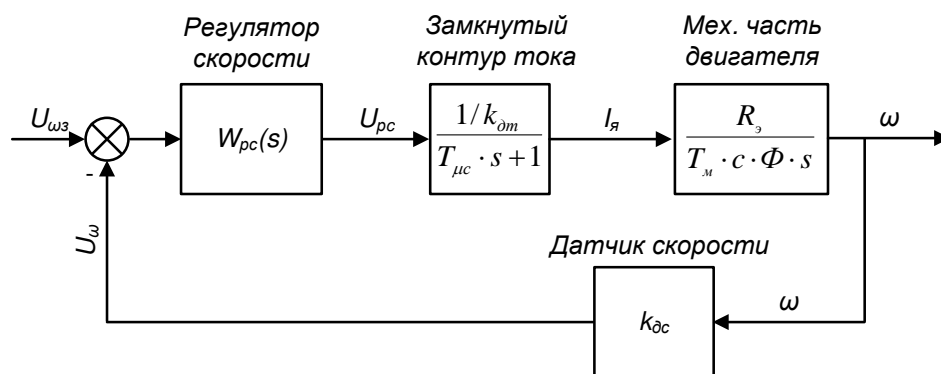


Рисунок 4.7 – Структурная схема контура скорости перед выбором регулятора

Основываясь на структурной схеме (рисунок 4.7) и выражении (4.21) объект регулирования контура скорости получим

$$W_{\text{ор}}(s) = \frac{\frac{1}{k_{\text{дт}}} \cdot \frac{R_{\text{э}}}{c \cdot \Phi} \cdot k_{\text{дс}}}{(T_{\text{мс}} \cdot s + 1) \cdot T_{\text{м}} \cdot s} = \frac{1}{(T_{\text{мс}} \cdot s + 1) + T_{\text{м}}' \cdot s} \quad (4.25)$$

$$T_{\text{м}}' = \frac{T_{\text{м}} \cdot c \cdot \Phi}{R_{\text{э}}} \cdot \frac{k_{\text{дт}}}{k_{\text{дс}}}, \quad (4.26)$$

где  $T_{\text{мс}} \approx T_{\text{кт}} + T_{\text{фс}}$ .

Выбираем в качестве желаемой передаточную функцию технического оптимума (4.3) и опираясь на выражение (4.2) получаем:

$$W_{\text{рсто}}(s) = \frac{T_{\text{м}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot c \cdot \Phi}{2 \cdot T_{\text{мс}} \cdot R_{\text{э}} \cdot k_{\text{дс}}} = k_{\text{рс}} \quad (4.27)$$

Теперь рассмотрим вариант синтеза контура скорости по *симметричному оптимуму*.

Объект останется в соответствии с (4.27), а желаемая передаточная функция в данном случае будет иметь вид (4.7), поэтому регулятор получится с передаточной функцией

$$W_{\text{рссс}}(s) = \frac{W_{\text{жссс}}(s)}{W_{\text{оп}}(s)} = \frac{(4T_{\mu c}s+1)}{4T_{\mu c}s} \cdot \frac{T_m \cdot k_{\text{дт}} \cdot c\Phi}{2T_{\mu c} \cdot R_{\text{э}} \cdot k_{\text{дс}}} \quad (4.28)$$

соответствующей ПИ-регулятору с постоянной времени  $4T_{\mu c}$  и коэффициентом передачи таким же как и случае технического оптимума.

Объект регулирования контура скорости состоит из токовой части (замкнутый контур регулирования тока (ЗКТ)), механической части и датчика скорости.

Коэффициент согласования сигналов задания тока  $U_{iz}$  и обратной связи по току  $U_i$  равен:

$$k_{ci} = \frac{R_{42}+R_{82}}{R_{39}} = \frac{1+2}{6,2} = 0,48 \quad (4.28)$$

Опираясь на синтез, произведенный ранее, в частности на выражение (4.23), и учитывая коэффициент  $k_{ci}$ , передаточная функция токовой части контура получается

$$W_T(s) = k_{ci} \cdot W_{\text{зт}}(s) = 0,48 \cdot \frac{1/0,2}{2 \cdot 0,25 \cdot 1,4s+1} = \frac{2,4}{0,7s+1} \quad (4.29)$$

Кроме постоянной времени токовой части контура скорости ( $2,8T_{\mu m}=0,7$  мс) в состав некомпенсируемых будет входить постоянная времени фильтра скорости:

$$T_{\phi c} = R_5 \cdot C_4 = 2.4 \text{ кОм} \cdot 0,1 \text{ мкФ} = 0,24 \text{ мс.} \quad (4.30)$$

Суммарная малая некомпенсируемая постоянная контура скорости получается:

$$T_{\mu c} = 2.8T_{\mu m} + T_{\phi c} = 0.7+0.24 = 0.94 \text{ мс.} \quad (4.31)$$

Другие параметры объекта регулирования определены из паспортных данных:

- электромеханическая постоянная двигателя –  $T_m = 15 \text{ мс.}$ ;
- конструктивная постоянная двигателя –  $c_e \Phi = c_m \Phi = M_n / I_{ян} = 0,8/12 = 0,067 \text{ В/с.}$
- коэффициент передачи тахогенератора –  $k_c = 0,02 \text{ В/об/мин.}$

При оптимизации по техническому оптимуму передаточная функция регулятора скорости (РС) будет иметь следующий вид :

Реальная токовая часть отличается от теоретической (4.24) учётом необходимости согласования входов операционного усилителя, на котором реализован регулятор.

Это можно считать нормализацией сигналов. Поэтому коэффициент передачи объекта будет в  $k_{ci}$  раз больше полученного в (4.25).

$$W_{op}(s) = \frac{2,4 \cdot \frac{1,1}{0,067} \cdot 0,02}{(0,94s+1) \cdot 15s} = \frac{0,788}{(0,94s+1) \cdot 15s} \quad (4.32)$$

а коэффициент передачи П-регулятора скорости будет соответственно в  $k_{ci}$  раз меньше полученного в (4.27)

$$W_{pco}(s) = \frac{15 \cdot 0,2 \cdot 0,067}{2 \cdot 0,94 \cdot 1,1 \cdot 0,02} \times \frac{1}{0,48} = 10,1 \quad (4.33)$$

Коэффициент П-регулятора скорости  $k_{pc}=10.1$  должен будет обеспечить технический оптимум в контуре скорости. Структура такого контура скорости примет вид, показанный рисунке 4.8, а показатели качества регулирования должны соответствовать указанным в таблице 4.2.

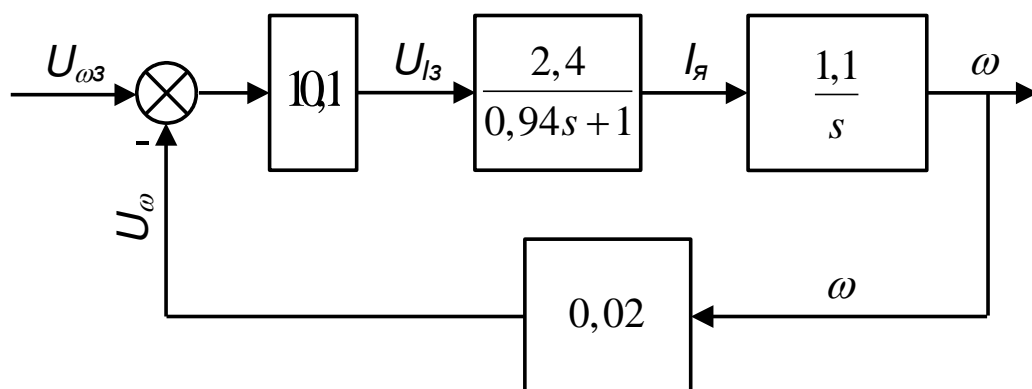


Рисунок 4.8 – Структурная схема контура скорости при оптимизации по техническому оптимуму.

Таблица 4.2 – Показатели качества регулирования контура скорости технического оптимума

Наименование показателя	Значение
Запас устойчивости по фазе, $\Delta\varphi, ^\circ$	63
Перерегулирование, $\sigma, \%$	4.3
Время достижения 1-го установившегося значения, $t_1, \text{мс}$	$4.7T_\mu = 4.42$
Время достижения максимума, $t_m, \text{мс}$	$6.28T_\mu = 5.9$
Время переходного процесса, $t_n, \text{мс}$	$8.4T_\mu = 7.9$
Количество колебаний	1

Как было показано выше в случае оптимизации контура скорости по симметричному оптимуму получается ПИ-регулятор скорости с таким же коэффициентом передачи  $k_{pc}$  и постоянной времени:

$$T_{pc} = 4T_{\mu c} = 4 \cdot 0,94 = 3,76 \text{ мс} \quad (4.34)$$

При такой оптимизации показатели качества регулирования должны соответствовать указанным в таблице 4.3.

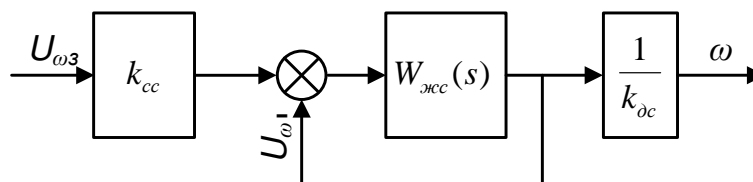
Таблица 4.3 – Показатели качества регулирования контура скорости симметричного оптимума

Наименование показателя	Значение
Запас устойчивости по фазе, $\Delta\varphi, ^\circ$	36
Перерегулирование, $\sigma, \%$	43
Время достижения 1-го установившегося значения, $t_1, \text{мс}$	$3.1T_\mu = 2.9$
Время достижения максимума, $t_m, \text{мс}$	$6.28T_\mu = 5.9$
Время переходного процесса, $t_n, \text{мс}$	$16.1T_\mu = 15.1$
Количество колебаний	1

#### 4.4 Синтез контура положения

Получим передаточную функцию замкнутого контура скорости аналогично тому, для замкнутого контура тока.

Выделим скоростную часть контура положения рисунок 4.9.



$W_{жс}(s)$  – желаемая передаточная функция в прямой части контура скорости.

Рисунок 4.9 – Структурная схема скоростной части контура положения

При оптимизации контура скорости по техническому оптимуму, когда последовательно к объекту подключён П-регулятор, прямая часть контура получается желаемой с передаточной функцией  $W_{жсто}(s)$ . Входящая в неё суммарная некомпенсируемая малая постоянная времени контура скорости  $T_{\mu c}$  равна 0.94 мс.

$$W_{жсто}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu c} \cdot s \cdot (T_{\mu c} \cdot s + 1)}. \quad (4.35)$$

При оптимизации контура скорости по симметричному оптимуму, когда последовательно к объекту подключён ПИ-регулятор, прямая часть контура получается желаемой с передаточной функцией  $W_{жссо}(s)$ .

$$W_{жссо}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu c} \cdot s \cdot (T_{\mu c} \cdot s + 1)} \cdot \frac{4T_{\mu c} \cdot s + 1}{4T_{\mu c} \cdot s}. \quad (4.36)$$

Коэффициент согласования сигналов  $U_{\omega z}$  и  $U_{\omega}$ , выбранный из условия обеспечить соответствие максимальному заданию (10 В) максимальной скорости (3000 об/мин), равен:

$$k_{c\omega} = \frac{R5+R10+R12}{R6+R13} = \frac{36}{6} = 6 \quad (4.37)$$

Коэффициент датчика скорости  $k_{\partial c} = 0.02$  В/об/мин.

Контур положения с контуром скорости технического оптимума:

Для контура скорости с П-регулятором (технический оптимум) скоростная часть контура положения будет:

$$\begin{aligned} W_{зсто}(s) &= 6 \cdot \frac{W_{жсто}(s)}{1 + W_{жсто}(s) \times 1} \cdot \frac{1}{0,02} = 300 \cdot \frac{\frac{1}{2T_{\mu c}s(T_{\mu c}s + 1)}}{1 + \frac{1}{2T_{\mu c}s(T_{\mu c}s + 1)}} = \\ &= \frac{300}{2T_{\mu c}s(T_{\mu c}s + 1) + 1} \approx \frac{300}{2,8T_{\mu c}s + 1} = \frac{300}{2,8 \times 0,94s + 1} = \frac{300}{2,6s + 1} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Структурная схема контура положения от общего вида примет в данном случае вид, показанный на рисунке 4.10.

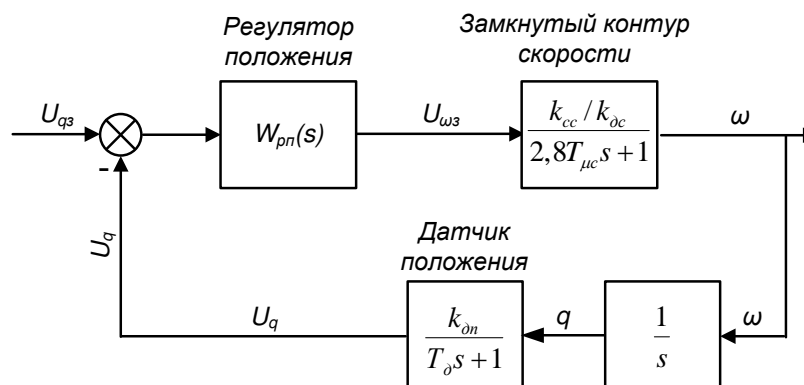


Рисунок 4.10 – Структурная схема контура положения с П-регулятором скорости

Датчик положения вырабатывает 250 импульсов за каждый оборот вала.

Поэтому, когда счётчик кодировщика считает импульсы, каждому изменению его показания на 1 будет соответствовать угловое перемещение равное  $360^\circ/250=1.44^\circ$ . Коэффициент датчика положения выбирается исходя из требуемых предельных перемещений. Если принять значение предельных перемещений в каждом из направлений равным 100 млн. импульсам (144 млн. $^\circ$ ), тогда для задания положения  $U_{қз} = 10$  В коэффициент передачи датчика будет равен:

$$k_{дп} = U_{qmax}/q_{max} = 10/10^8 = 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{мс}. \quad (4.39)$$

Тогда передаточная функция объекта контура положения:

$$W_{op}(s) = \frac{300}{2,6s+1} \cdot \frac{1}{s} \cdot 10^{-7} = \frac{300 \cdot 10^{-7}}{2,6s^2+s}. \quad (4.40)$$

Видно, что объект контура положения не имеет *компенсируемой* инерционности.

*Некомпенсируемая суммарная малая постоянная времени* контура положения должна будет учесть следующее:

- инерционность скоростной части объекта контура положения  $2,8T_{\mu c} = 2,6$  мс;

- дискретность реализованной в ЭВМ части контура или частота взаимодействия с объектом (приём текущего состояния и выдача нового управляющего воздействия).

Возможности аппаратно-программных средств управляющей ЭВМ таковы, что сделать дискретность менее 100 мс не представляется возможным. Поэтому:  $T_{\partial}=100$  мс.

В результате:

$$T_{\mu n} = 2,8T_{\mu c} + T_{\partial} = 2,6 + 100 = 102,6 \text{ мс.} \quad (4.41)$$

Преобразованный по правилам подчинённого регулирования объект контура положения даст структуру контура, показанную на рисунке 4.11.

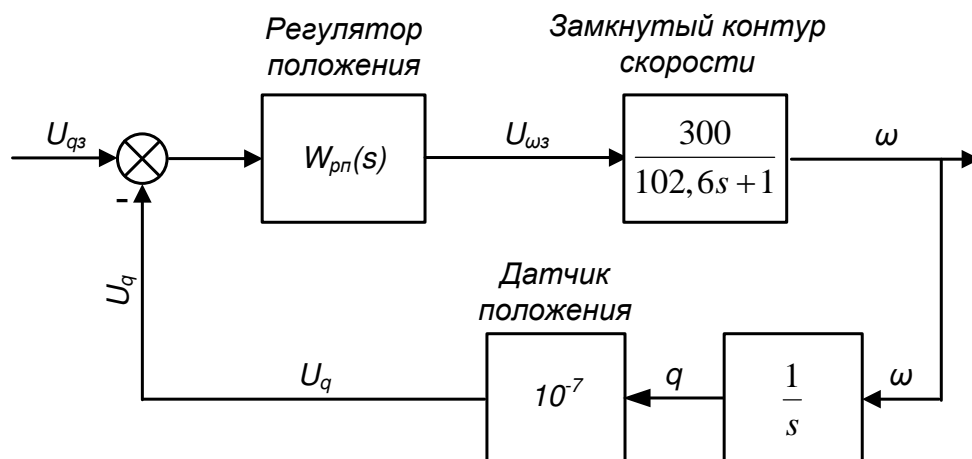


Рисунок 4.11 – Структурная схема контура положения оптимизированного по техническому оптимуму

Выберем *технический* оптимум для оптимизации контура положения.

$$W_{\text{жстпо}}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu n} \cdot s \cdot (T_{\mu n} \cdot s + 1)}. \quad (4.42)$$



Передаточная функция регулятора положения

$$W_{pnto}(s) = \frac{W_{жнтo}(s)}{W_{op}(s)} = \frac{(T_{\mu n}s+1)s \cdot 10^7}{2T_{\mu n}s(T_{\mu n}s+1) \cdot 300} = \frac{10^7}{600T_{\mu n}} = 162 \text{ кГц}. \quad (4.43)$$

Таким образом, регулятор положения оказался П-регулятором с коэффициентом передачи  $k_{pn}=162 \text{ кГц}$ .

Контур положения с контуром скорости симметричного оптимума:

Для контура скорости с ПИ-регулятором (симметричный оптимум) скоростная часть контура положения:

$$\begin{aligned} W_{зcco}(s) &= 6 \cdot \frac{W_{жcco}(s)}{1 + W_{жcco}(s) \cdot 1} \cdot 0,02 = \\ &= \frac{300}{32T_{\mu c}^4 s^4 + 40T_{\mu c}^3 s^3 + 8T_{\mu c}^2 s^2 + 4T_{\mu c} s + 1} \approx \\ &\approx \frac{300}{1,4 \cdot 4T_{\mu c} s + 1} = \frac{300}{5,6T_{\mu c} s + 1} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Объект регулирования в этом случае

$$W_{op}(s) = \frac{300}{5,6T_{\mu c} s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot 10^{-7} = \frac{300 \cdot 10^{-7}}{5,26s^2 + s}. \quad (4.45)$$

Он отличается от предыдущего варианта объекта только чуть большей некомпенсируемой инерционностью скоростной части  $5,6T_{\mu c} = 5.26 \text{ мс}$ .

В результате:

$$T_{\mu n} = 5.6T_{\mu c} + T_{\delta} = 5.26 + 100 = 105.26 \text{ мс}. \quad (4.46)$$

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

Передаточная функция регулятора положения в этом случае:

$$W_{pnto}(s) = \frac{W_{жнтo}(s)}{W_{op}(s)} = \frac{(T_{\mu n}s+1)s \cdot 10^7}{2T_{\mu n}s(T_{\mu n}s+1) \cdot 300} = \frac{10^7}{600T_{\mu n}} = 158 \text{ кГц} \quad (4.47)$$

Как видно, при большой дискретности контура положения по сравнению с инерционностью скоростной части полученные регуляторы не зависят от варианта оптимизации скоростной части. При оптимизации контура положения по техническому оптимуму регулятором будет простой П-регулятор с коэффициентом  $k_{pn} = 160$ .

Параметры качества регулирования положения для  $T_{\mu n} = 105$  мс следует ожидать в соответствии с таблица 4.4.

Таблица 4.3 – Показатели качества регулирования контура положения технического оптимума

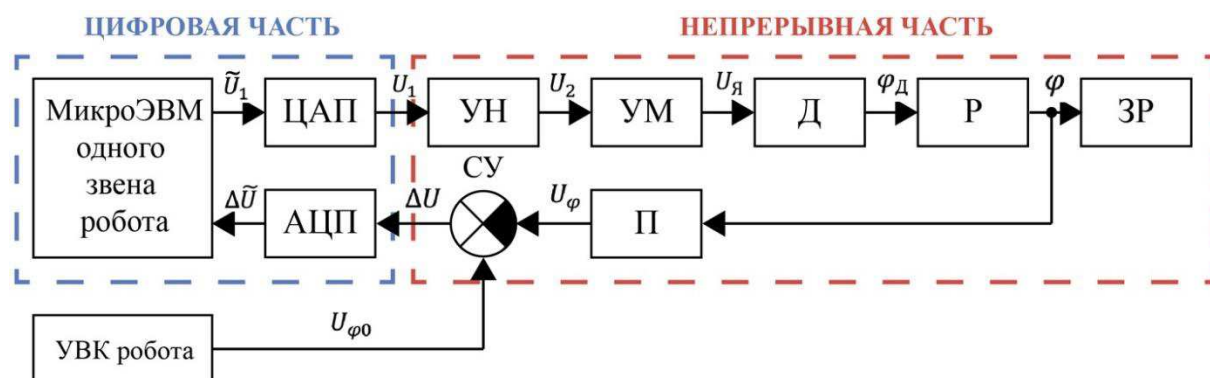
Наименование показателя	Значение
Запас устойчивости по фазе, $\Delta\varphi$ , °	63
Перерегулирование, $\sigma$ , %	4.3
Время достижения 1-го установившегося значения, $t_l$ , мс	$4.7T_{\mu} = 494$
Время достижения максимума, $t_m$ , мс	$6.28T_{\mu} = 660$
Время переходного процесса, $t_n$ , мс	$8.4T_{\mu} = 880$
Количество колебаний	1

## **5 Цифровая система автоматического управления (САУ) углового перемещения звена робота**

При управлении несколькими объектами регулирования посредством одной микро-ЭВМ имеет место двойная дискретизация непрерывных сигналов по времени в процессе поочередного подключения объектов к микро-ЭВМ и при обработке сигналов в аналогово-цифровом преобразователе (АЦП). Длительность периода квантования сигналов в первом случае на один-два порядка больше длительности дискретизации сигналов в АЦП. В связи с этим при мультиплексорном режиме работы микро-ЭВМ (при обслуживании нескольких объектов регулирования) длительностью процесса квантования сигналов в АЦП можно пренебречь и учитывать только период квантования, обусловленный мультиплексированием, рассматривая САУ с микро-ЭВМ как импульсную систему.

### **5.1 Функциональная схема цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота**

Для регулирования угла поворота каждого звена промышленного робота применена следящая система с цифровым регулированием посредством автономной микро-ЭВМ (рисунок 5.1).



УН, УМ – электронный усилитель напряжения и мощности соответственно; Д – двигатель постоянного тока; Р – редуктор; ЗР – звено робота; П – потенциометрический датчик угловых перемещений.

Рисунок 5.1 – Функциональная схема цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота

В данной системе задающее воздействие формируется в управляющем вычислительном комплексе (УВК) головной микро-ЭВМ, преобразуется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) в аналоговый сигнал  $U_{\varphi 0}$ , который сравнивается с аналоговым сигналом обратной связи  $U_{\varphi}$ , в сравнивающем устройстве (СУ). Сигнал рассогласования  $\Delta U_{\varphi}$ , с выхода СУ поступает на вход АЦП, преобразуется в последнем в цифровую форму  $\Delta \tilde{U}_{\varphi}$  и после обрабатывается в микро-ЭВМ по предписанному алгоритму. Далее цифровой выходной сигнал  $\tilde{U}_1$  микро-ЭВМ, преобразованный ЦАП в аналоговый сигнал  $U_1$  и усиленный электронными усилителями до величины  $U_{я}$ , воздействуя на якорную цепь двигателя, обеспечивает заданное угловое перемещение  $\varphi$  звена робота.

Все элементы непрерывной части следящей системы (рисунок 5.1), за исключением двигателя Д, являются пропорциональными звеньями, передаточные коэффициенты которых следующие:

- усилителя напряжения  $k_{УН} = 10$ ;
- усилителя мощности  $k_{УМ} = 2.64$ ;
- редуктора  $k_P = 1$ ;

- потенциометрического датчика угловых перемещений П  $k_{\Pi} = 0.01 \text{ В/рад.}$

В качестве микро-ЭВМ в следящей системе использованы 8-разрядный микроконтроллер и 8-разрядные АЦП и ЦАП. В АЦП для преобразования сигнала рассогласования  $\Delta U_{\varphi}$  в цифровой сигнал (цифровые коды) используются 7 разрядов (один разряд АЦП задействован как знаковый). Интервал квантования сигнала по времени  $T=0.02 \text{ с.}$  Максимальное напряжение  $U_{1max} = 5 \text{ В.}$  Максимальное значение угла поворота звена робота  $\varphi_1 = 3.14 \text{ рад} = 180^\circ$ . В ЦАП реализован экстраполятор нулевого порядка. Максимальное значение выходного напряжения ЦАП  $U_{2max} = 5 \text{ В.}$

АЦП после линеаризации его статической характеристики можно интерпретировать пропорциональным звеном с коэффициентом передачи, определяемым следующей формулой:

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{h_1} \quad (5.1)$$

Величина  $h_1$  рассчитывается по выражению

$$h_1 = \frac{U_{1max}}{2^{\alpha_1 - 1}} \quad (5.2)$$

где  $U_{1max}$  – паспортное максимальное значение выходного напряжения АЦП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_1$ - число двоичных разрядов АЦП (без учета знакового разряда).

Целью моделирования рассматриваемой следящей системы является определение алгоритма управляющей программы микро-ЭВМ, обеспечивающего процесс регулирования, при котором звено робота при отработке задающего сигнала перемещается в заданное положение без каких-либо колебаний, т. е. чтобы в системе имел место апериодический переходный процесс. Эта цель может быть достигнута посредством управляющей программы, формирующей один из

типовых законов регулирования. В связи с этим в структурную непрерывно-дискретную модель следящей системы (рисунок 5.2), составленную на основе функциональной схемы (рисунок 5.1) с учетом динамических свойств элементов ее линейной части, введен дискретный ПИД-регулятор с передаточной функцией  $W_{\text{ПИД}}(z)$ .

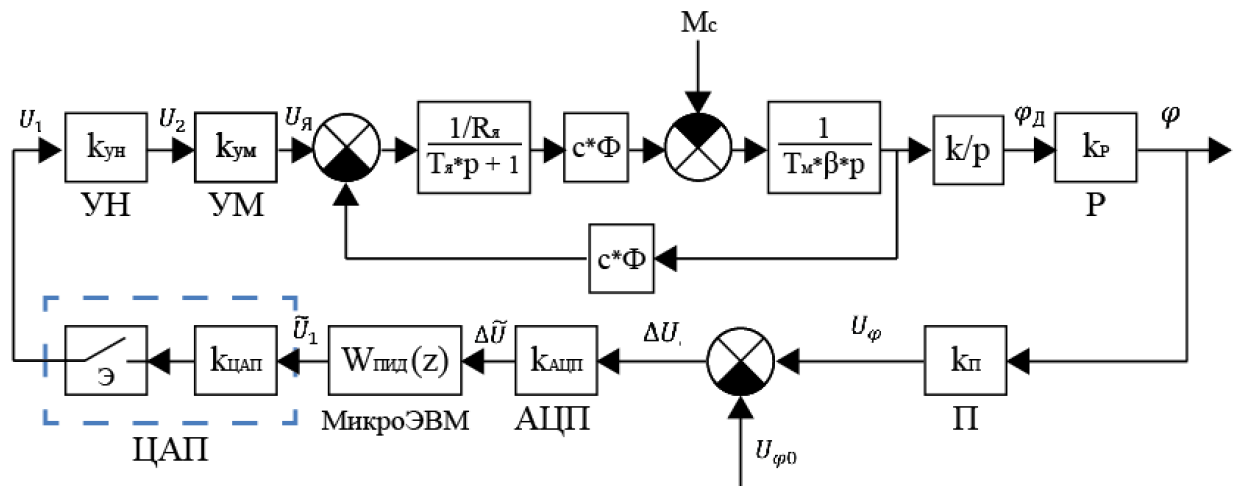


Рисунок 5.2 – Непрерывно-дискретная модель цифровой следящей системы

## 5.2 Расчет параметров для моделирования цифровой системы автоматического управления

Числовое значение  $k_{\text{АЦП}}$ , рассчитанное по формуле (5.1).

$$U_{1\max} = 5 \text{ В};$$

$$\alpha_1 = 7.$$

Подставив в (5.2) и затем в (5.1) получим:

$$h_1 = \frac{U_{1\max}}{(2^{\alpha_1} - 1)} = \frac{5}{127} = 0.0394 \text{ В} \quad (5.3)$$

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{0.0394} = 25.38 \frac{1}{\text{В}} \quad (5.4)$$

Коэффициент передачи ЦАП:

$$k_{\text{ЦАП}} = h_2 \quad (5.5)$$

Величина  $h_2$  определяется выражением

$$h_2 = \frac{U_{2\max}}{2^{\alpha_2} - 1}, \quad (5.6)$$

где  $U_{2\max}$  – паспортное максимальное значение выходного напряжения ЦАП, соответствующее его насыщению, В;

$\alpha_2$  – число двоичных разрядов ЦАП (без учета знакового разряда).

$$U_{2\max} = 5 \text{ В};$$

$$\alpha_2 = 7;$$

Подставив в (5.6) и затем в (5.5) получим

$$h_2 = \frac{U_{2\max}}{(2^{\alpha_2} - 1)} = \frac{5}{127} = 0.0394 \text{ В} \quad (5.7)$$

$$k_{\text{ЦАП}} = 0.0394 \text{ В}. \quad (5.8)$$

Найдем общий коэффициент усиления системы по формуле:

$$K_0 = \frac{K_y \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д}}}{i} \quad (5.9)$$

Коэффициент усилителя мощности определяется на основе заданных параметров:

- максимальной амплитуды допустимой ошибки слежения  $\varepsilon_{\text{дон}} = 3 \text{ град}$ ;
- максимальной скорости слежения  $\omega_{\text{max}} = 90 \frac{\text{град}}{\text{с}}$ ;

- максимального ускорения  $\omega'_{\max} = 35 \frac{\text{град}}{\text{с}^2}$ .

На основе заданных параметров строится «запретная зона».

При синтезе следящих систем обычно неизвестен закон изменения входного сигнала и при определении условий работы систем оговаривают только максимальную скорость слежения  $\omega_{\max}$  и максимальное ускорение  $\omega'_{\max}$ . В этом случае можно подобрать эквивалентный гармонический входной сигнал  $\alpha_3 = \alpha_{\max} \sin(\omega_k t)$ . Найдем режим, при котором амплитуды скорости и ускорения эквивалентного сигнала равны максимальным заданным значениям. Для этого необходимо выполнение условий:

$$\omega_k = \frac{\omega'_{\max}}{\omega_{\max}} = \frac{35}{90} = 0.389 \text{ с}^{-1}, \quad (5.10)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{\omega_{\max}^2}{\omega'_{\max}} = \frac{90^2}{35} = 231^\circ. \quad (5.11)$$

Введем понятие контрольной точки  $A_K$  с координатами:

$$\omega = \omega_k; L(\omega_k) = 20 \lg \frac{\alpha_{\max}}{\varepsilon_{\text{доп}}}, \quad (5.12)$$

где  $\varepsilon_{\text{доп}}$  – допустимое значение ошибки отработки входного сигнала.

$$L_k = 20 \lg \left( \frac{231}{3} \right) = 37.746 \text{ дБ}. \quad (5.13)$$

По этим величинам можно построить контрольную точку  $A_K$ . С учетом ее в общем случае строится запретная область, в которую не должна заходить ЛАЧХ разомкнутой следящей системы. При этом слева от точки  $A_K$  строится прямая с наклоном  $-20$  дБ/дек, а справа с наклоном  $-40$  дБ/дек. Если скорости и ускорения



не превышают  $\omega_{max}$  и  $\omega'_{max}$ , то при ЛАЧХ, расположенной выше запретной области, максимальная ошибка слежения не будет превышать  $\varepsilon_{доп}$ .

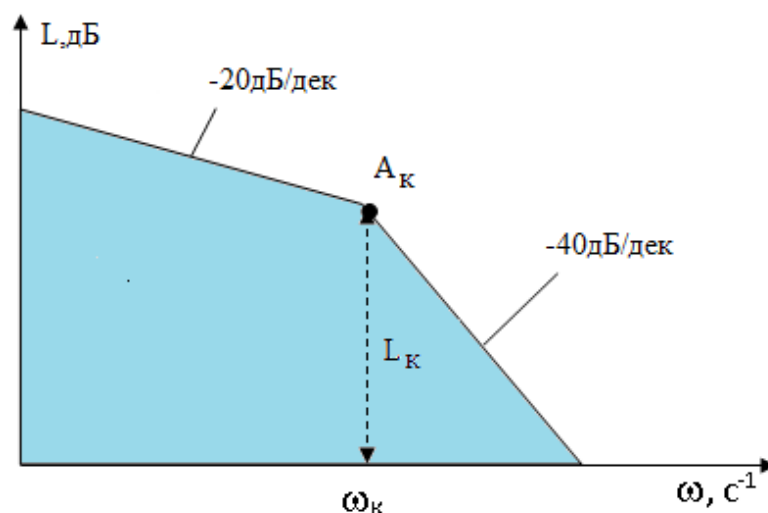


Рисунок 5.3 – запретная область ЛАЧХ разомкнутой следящей системы

Таким образом, ЛАЧХ скорректированной системы не должна заходить в запретную область, это условие необходимо учитывать при построении низкочастотной части характеристики.

Полагая, что коэффициент усилителя мощности равен единице, строится логарифмическая частотная характеристика неизменяемой части системы  $L_H(\omega, K_y = 1)$ . Чтобы максимальная допустимая ошибка не превышала заданную, необходимо поднять низкочастотную часть характеристики  $L_H(\omega, K_y = 1)$  на 6 дБ выше запретной зоны.

Построив эту характеристику, находим необходимый коэффициент усиления неизменяемой части  $K_y$ .

$$L' = |L(\omega_K, K_y)| + |L_K| + 6 \quad (5.14)$$

Найдем  $L(\omega_K, K_y = 1)$ :

$$|L(\omega_K, K_y)| = 20 \cdot \lg\left(\frac{1 \cdot K_{\Pi}}{i}\right) + 20 \cdot \lg(K_{\Pi}) + (-20 \cdot \lg(\omega_K)) =$$

$$= -8.321 \text{ дБ}.$$

(5.15)

Посчитаем по формуле (5.14)

$$L' = |-8.321| + |37.746| + 6 = 52.067 \text{ дБ} \quad (5.16)$$

Найдем  $K_y$  по формуле:

$$L' = 20 \lg(K_y) \quad (5.17)$$

$$K_y = 10^{\frac{52.067}{20}} = 401.192 \quad (5.18)$$

Подставив в (5.9) значения определим общий коэффициент усиления:

$$K_0 = \frac{K_y \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\Delta}}{i} = 59.858, \quad (5.19)$$

где  $K_{\Delta} = 14.92$  (коэффициент передачи двигателя)

Из малых некомпенсируемых постоянных времени объекта ( $T_{\mu t}$ ) практически значимы период следования импульсов управления  $T_u = 0,1..0,3$ мс и постоянная времени фильтра на выходе датчика тока:

$$T_{\phi t} = R_{82} \cdot C_{31} = 2 \text{ кОм} \cdot 0.01 \text{ мкФ} = 0.02 \text{ мс}. \quad (5.20)$$

Поэтому можно принять:

$$T_{\mu t} = T_u + T_{\phi t} = 0.23 + 0.02 = 0.25 \text{ мс} \quad (5.21)$$

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

Постоянная времени ШИП  $T_Y = 0.00025$  с

Найдем  $T_2^2$  и  $T_2$ :

$$T_2^2 = T_Y \cdot T_M, \quad (5.22)$$

где  $T_Y$  – постоянная времени якорной цепи.

$$T_Y = 0.0057 \text{ с.};$$

$T_M$  – электромеханическая постоянная двигателя.  $T_M = 0.015$  с.

Подставив в (5.22) получим:

$$T_2^2 = T_Y \cdot T_M = 0.0057 \text{ с} \cdot 0.015 \text{ с} = 8.55 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (5.23)$$

$$T_2 = T_M = 0.015 \text{ с} \quad (5.24)$$

### 5.3 Моделирование цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота

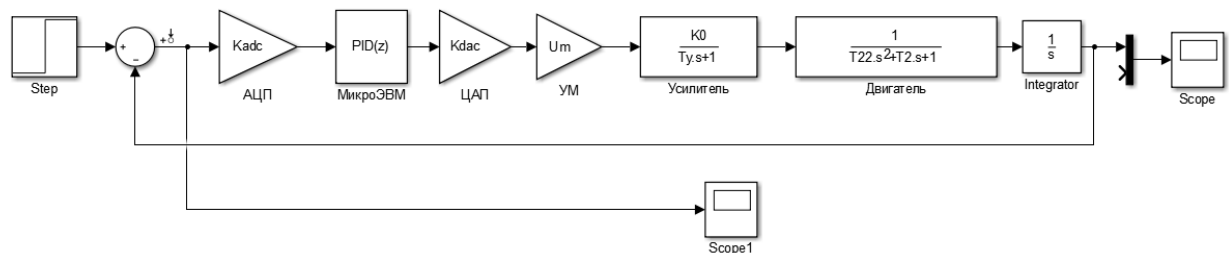


Рисунок 5.4 – Схема цифровой системы автоматического управления в MATLAB

Коэффициенты, используемые в схеме представлены в листинге программы и были определены в главе (5.2):

```
%Передаточное число редуктора  
i=1;  
%Потенциометрический датчик угловых перемещений  
Kp=0.01
```

```

%Коэффициент усиления
Ky=401.192
%Коэффициент двигателя
Kd=14.92
%Интервал квантования
T=0.02;
%АЦП
Kadc=25.38;
%ЦАП
Kdac=0.0394;
%Усилитель напряжения
Un=10;
%ШИП
Um=2.64;
%общий коэффициент усиления
K0=Kp*Ky*Kd
Ty=0.00025
%Двигатель
T22=0.0000855
T2=0.015

```

Workspace	
Name ▲	Value
i	1
K0	59.8578
Kadc	25.3800
Kd	14.9200
Kdac	0.0394
Kp	0.0100
Ky	401.1920
T	0.0200
T2	0.0150
T22	8.5500e-05
Ty	2.5000e-04
Um	2.6400
Un	10

Рисунок 5.5 – Рабочее окно МАТКАВ Workspace

Настроим параметры ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса.

Параметры регулятора определяются в следующей последовательности, применяя моделирование в системе Matlab:

1. Установим коэффициенты регулятора I, D равными нулю, а коэффициент P увеличивается до тех пор, пока система не окажется на границе устойчивости, то есть в ней будут существовать колебания с постоянной

амплитудой (рисунок 5.6).

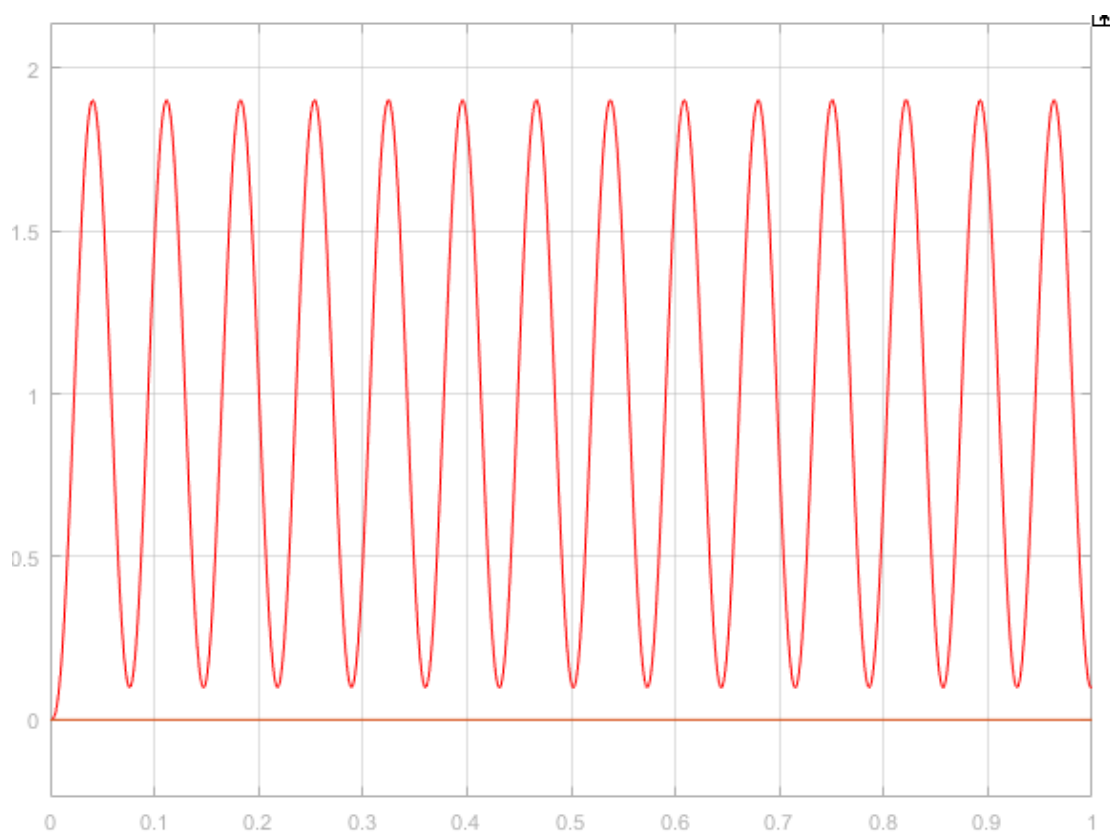


Рисунок 5.6 – Постоянные колебания

2. Рассчитаем значения коэффициентов. Найденное в пункте 1 значение  $P$  обозначается как  $P_{KP} = 0.77303$  (то есть критическое), а период незатухающих колебаний – как  $T_{KP} = 0.07$ .

$$P = \frac{3P_{KP}}{5} = 0.463818 \quad (5.25)$$

$$I = \frac{6P_{KP}}{5T_{KP}} = 13.25194 \quad (5.26)$$

$$D = \frac{3P_{KP}T_{KP}}{40} = 0.00406. \quad (5.27)$$

3. Введем найденные значения параметров в блок PID-регулятора (рисунок 5.7) и получите кривую переходного процесса.

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:  
☐ Continuous-time  
☒ Discrete-time

Discrete-time settings  
 Integrator method:  
 Sample time (-1 for inher

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0.463818

Integral (I): 13.25194

Derivative (D): 0.00406

☐ Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 100

Tune...

Рисунок 5.6 - Параметры ПИД-регулятора

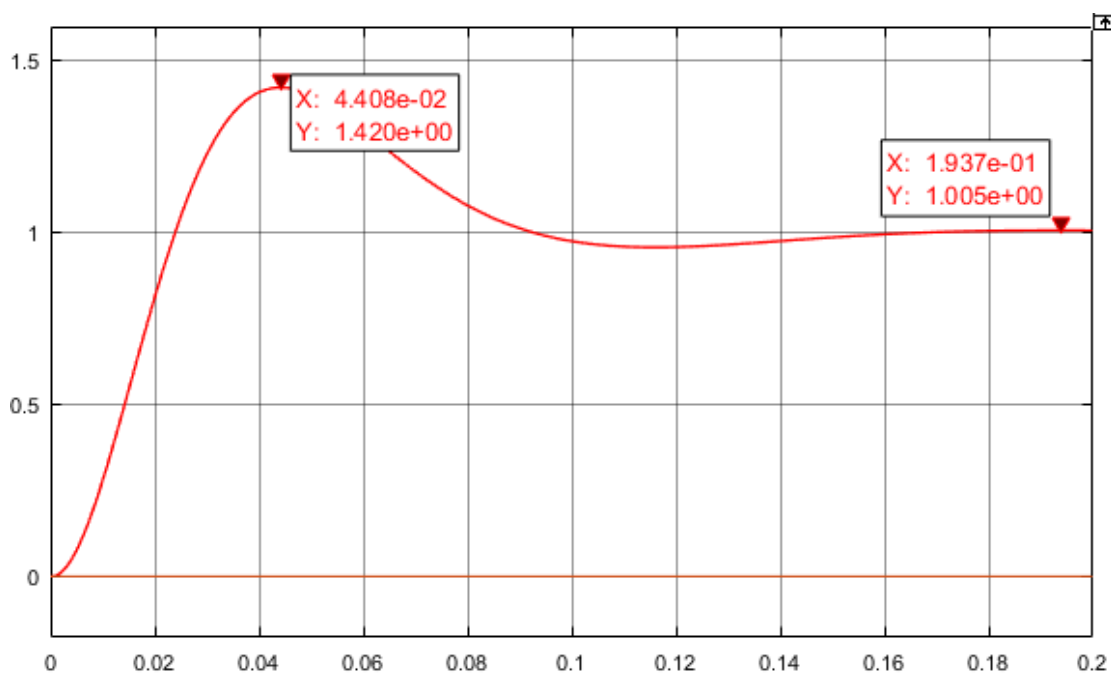


Рисунок 5.7 - График переходного процесса

Визуальный анализ графика показывает: переходный процесс в данном случае имеет перерегулирование, что недопустимо по технологическим требованиям. Поэтому настроим ПИД-регулятор с помощью функции *PID Tuner*. Настройку произведем с помощью функции *PID Tuner* [4]. В окне *Controller parameters* (параметры контроллера) показаны коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. В окне *Performance and robustness* (быстродействие и грубость) показаны параметры: *rise time* (время нарастания), *settling time* (время установления), *overshoot* (перерегулирование), *peak* (пик) (рисунок 5.8).

Меняя параметр *Response time* (время реакции) (рисунок 5.9), можем менять установившееся время, время нарастания и перерегулирование, исходя из этого меняется и время переходного процесса. После нахождения оптимальных коэффициентов усиления ПИД-регулятора для нашей системы получим: пропорциональный коэффициент усиления равен 0.2908, интегральный коэффициент усиления равен 0.384, дифференциальный коэффициент усиления равен 0.0071. Время установления равно 71.7 мс., перерегулирование равно 2.3%.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.29087	0.46382
I	0.38402	13.2519
D	0.0071517	0.00406
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.0525 seconds	0.0138 seconds
Settling time	NaN seconds	0.22 seconds
Overshoot	2.31 %	70.4 %
Peak	1.02	1.7
Gain margin	32.5 dB @ 740 rad/s	5.34 dB @ 117 rad/s
Phase margin	83.4 deg @ 78.1 rad/s	24.1 deg @ 77.3 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 5.8 – Окно параметров ПИД-регулятора и показателей качества

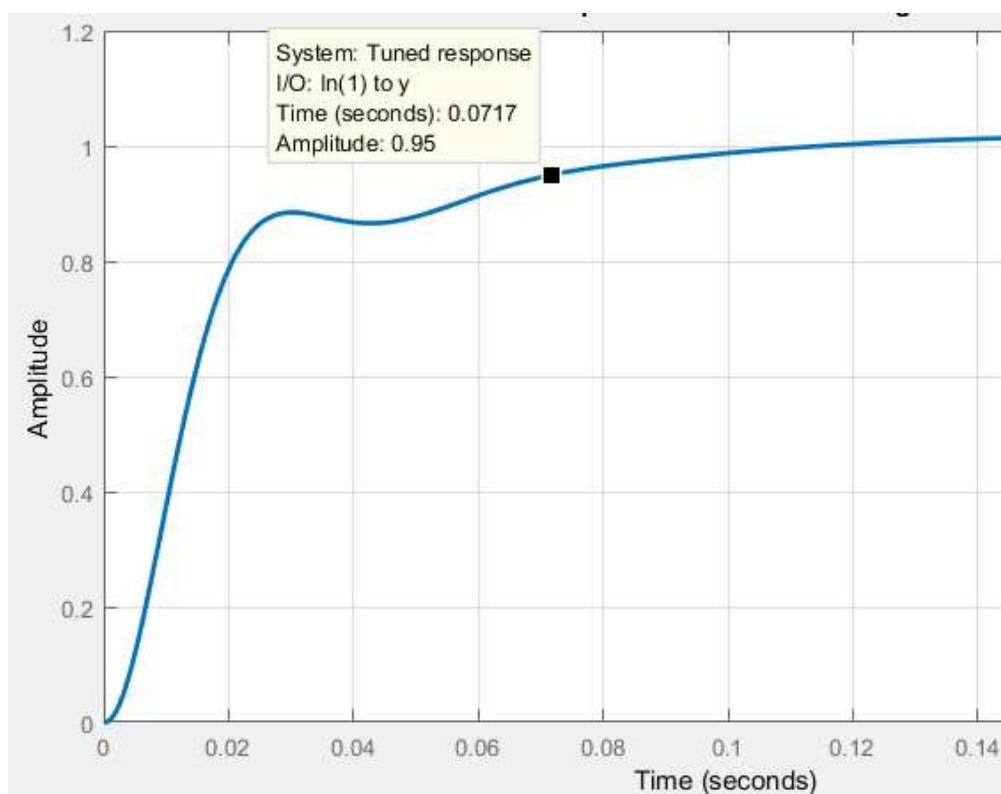


Рисунок 5.9 – Настройка ПИД-регулятора

Для того чтобы добиться переходного процесса с перерегулированием равным 0% попробуем заменить ПИД-регулятор на П-регулятор. Модель примет вид:

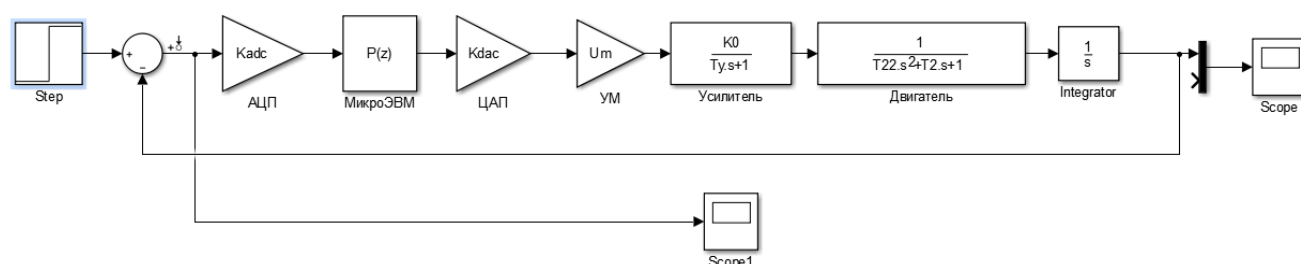


Рисунок 5.10 – Вид модели с П-регулятором



Подберем параметр П-регулятора рисунок 5.11.

Controller: P Form: Parallel

Time domain:  
☐ Continuous-time  
☒ Discrete-time

Discrete-time settings  
 Sample time (-1 for inherit)

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0.077

Tune...

Рисунок 5.11 – Параметр П-регулятора

Получим кривую переходного процесса:

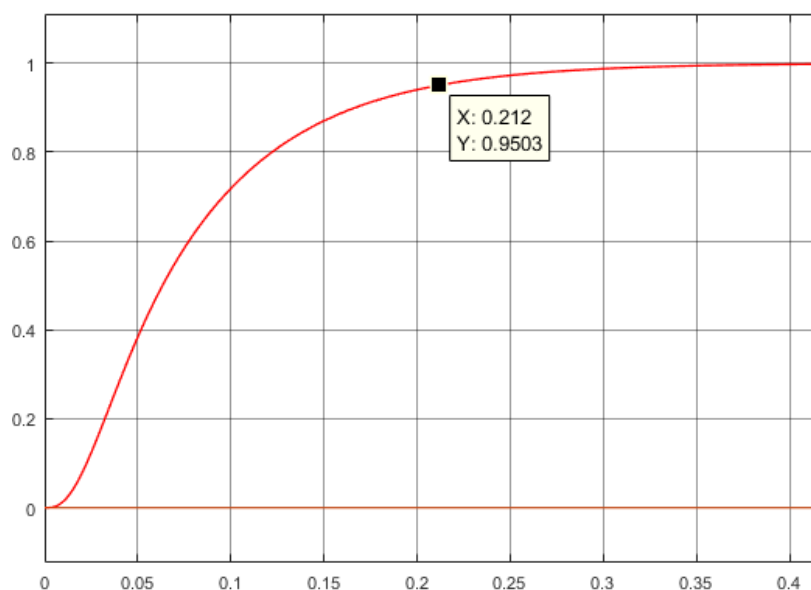


Рисунок 5.12 – Кривая переходного процесса с параметром П-регулятора ( $K_P=0.077$ )

С помощью функции PID Tuner можем получить точные параметры переходного процесса.

После нахождения оптимальных коэффициентов усиления П-регулятора для нашей системы получим: пропорциональный коэффициент усиления равен 0.15135, время установления равно 0.082 с., перерегулирование равно 0%.

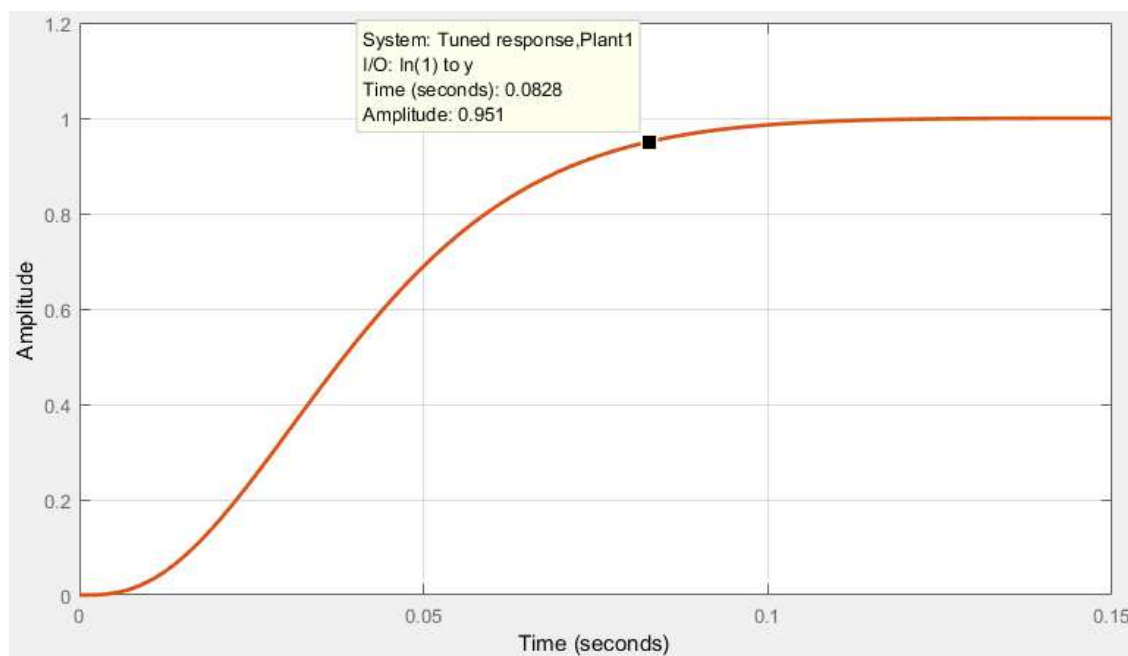


Рисунок 5.13 – Настройка П-регулятора


Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.15135	0.077
I	n/a	n/a
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.0549 seconds	0.144 seconds
Settling time	0.0956 seconds	0.271 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	1	0.999
Gain margin	16.9 dB @ 106 rad/s	22.8 dB @ 106 rad/s
Phase margin	69.3 deg @ 23.5 rad/s	79.4 deg @ 12.1 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 5.14 – Окно параметров П-регулятора и показателей качества

## 6 Экспериментальные исследования стенда

Стенд для исследования привода робота ТУР-10К предназначен для изучения изменения переходных процессов одной степени подвижности робота. Далее рассматриваются процессы разгона привода и функционирование контура положения.

### 6.1 Исследование процесса разгона привода робота ТУР-10К при ступенчатом задании скорости

Для того чтобы получить нужные характеристики и кривые переходных процессов, необходимо загрузить программу в среду *LabVIEW*. Запускается программа нажатием мышью на клавишу «  ». Включение привода осуществляется с помощью выключателя *DRIVE\_ON*.

Для ступенчатого изменения задания скорости необходимо установить переключатель «Рампа» так чтобы задание скорости шло в обход формирователя рамы (как показано на рисунке 6.1).

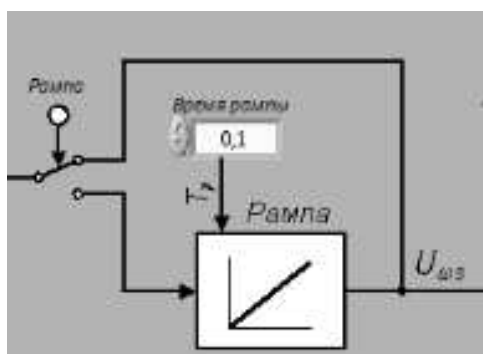


Рисунок 6.1 – Положение переключателя «Рампа» для ступенчатого задания скорости

Процессы разгона и торможения привода при ступенчатом задании скорости с токоограничением («отсечка тока») менее точно характеризуют результаты синтеза и оптимизации контуров системы автоматического

регулирования привода, чем переходные процессы без токоограничения. Чтобы добиться переходных процессов без токоограничения необходимо уменьшать амплитуду скачка (скачок задания скорости) до устранения, в характеристики тока, участка с неизменным значением тока (токоограничение, рисунок 6.2).

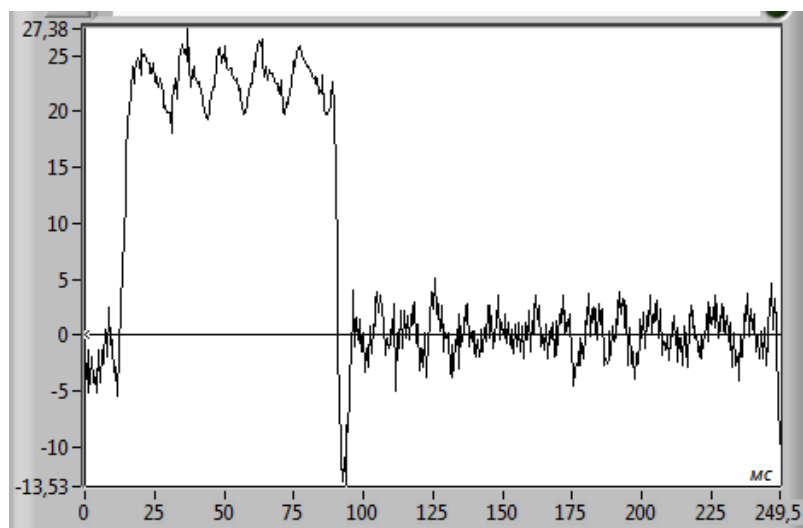


Рисунок 6.2 – Переходный процесс тока с токоограничением

Полученный переходной процесс при ступенчатом задании скорости без токоограничения представлен на рисунке 6.3.

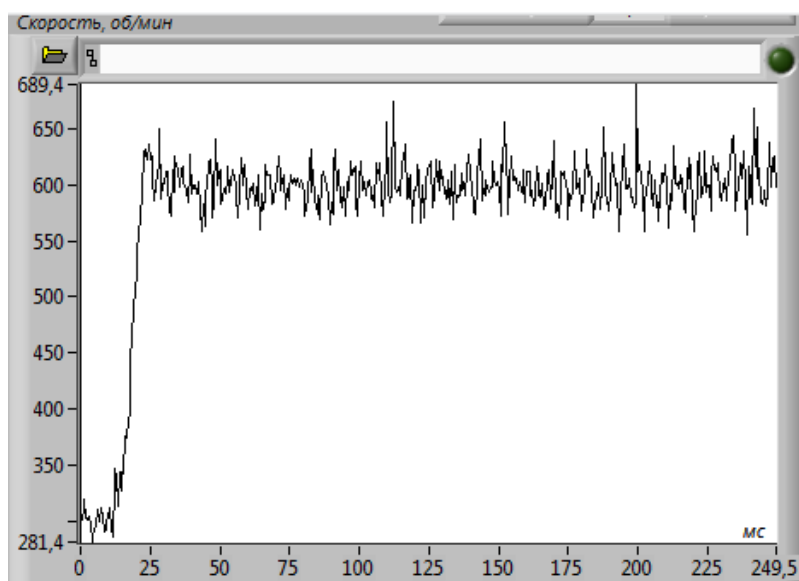


Рисунок 6.3 – Переходный процесс скорости

Определим показатели качества:

1. Время переходного процесса

$$t_p = 25 \text{ мс}$$

2. Перерегулирование

$$\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{640 - 600}{600} \cdot 100 = 6.7\% \quad (6.1)$$

## 6.2 Исследование функционирования контура положения

Для того чтобы получить переходные процессы контура положения необходимо переключатель РП установить так, чтобы задание скорости шло от регулятора положения (РП). Установим изменение заданного положения от текущего на 0.05В.  $U_q=0$ ,  $U_{q3}=0.05$ . Не изменяя диапазон скачка положения, получим три переходных процесса с коэффициентами РП  $k_1=100$ ,  $k_2=200$  и  $k_3=300$ . Изменение коэффициента РП осуществляется в специальном поле (рисунок 6.4)



Рисунок 6.4 – Поле для изменения коэффициента РП

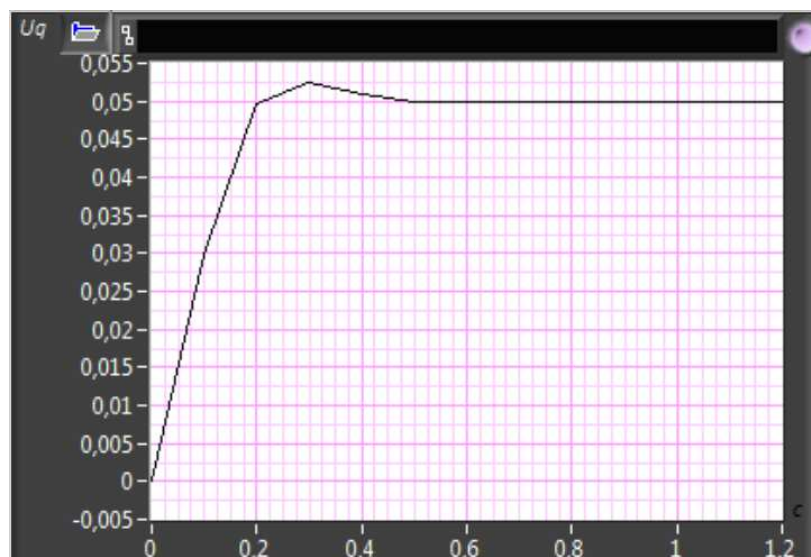


Рисунок 6.5 – Переходный процесс по положению при  $k_1$

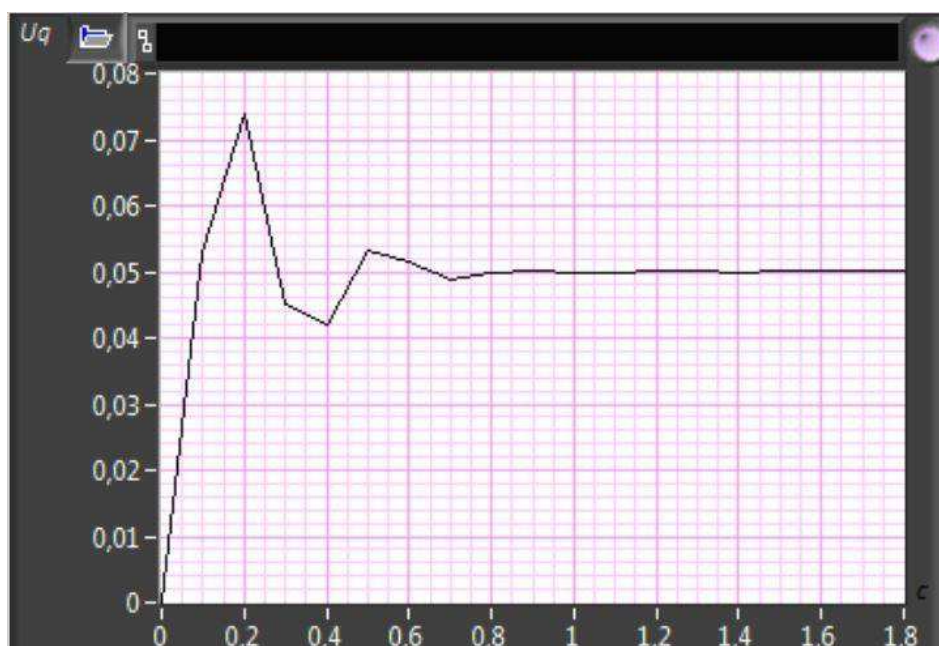


Рисунок 6.6 - Переходный процесс по положению при  $k_2$

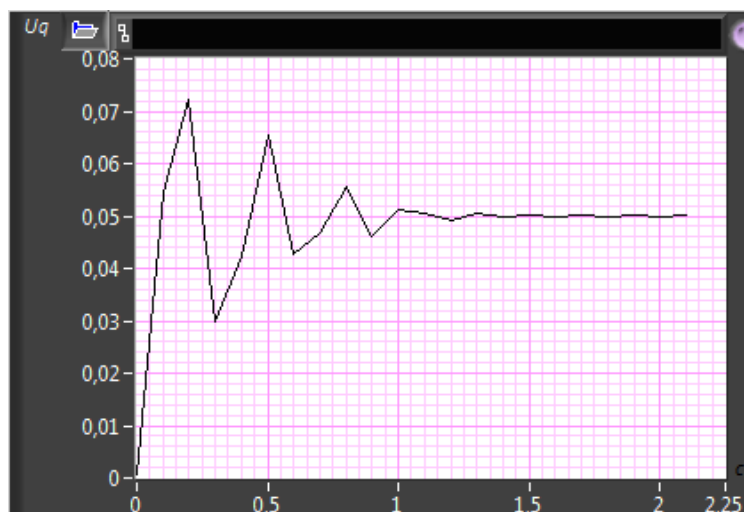


Рисунок 6.7 - Переходный процесс по положению при  $k_3$

Определим показатели качества полученных характеристик.

1) Время переходного процесса при  $k_1$  :

$$t_{p1} = 0.31 \text{ с}$$

2) Перерегулирование:

$$\sigma_1 = \frac{x_{max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{0.05 - 0.0525}{0.05} \cdot 100 = 5\% \quad (6.2)$$

3) Время переходного процесса при  $k_2$  :

$$t_{p2} = 0.55 \text{ с}$$

4) Перерегулирование:

$$\sigma_2 = \frac{x_{max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{0.074 - 0.05}{0.05} \cdot 100 = 48\% \quad (6.3)$$

5) Время переходного процесса при  $k_3$  :

$$t_{p3} = 0.85 \text{ с}$$

6) Перерегулирование:

$$\sigma_3 = \frac{x_{max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{0.072 - 0.05}{0.05} \cdot 100 = 44\% \quad (6.4)$$

При увеличении  $k$  процесс становится более резким и колебательным, затрачивается время на завершение колебаний и процесс удлиняется.

### 6.3 Сравнение показателей качества

Сравним показатели качества, полученные экспериментально (в главе 6.1) и полученные при синтезе контура скорости (в главе 4.4).

Время переходного процесса полученное экспериментально  $t_{p.э.} = 25$  мс, а при синтезе  $t_{p.с} = 7.9$  мс. Перерегулирование, полученное экспериментально,  $\sigma_э = 6.7\%$ , а при синтезе  $\sigma_с = 4.3\%$ . Как видно из показателе качества контура скорости, при работе с физической моделью мы получили характеристики немного хуже чем при синтезе системы. Процесс получился более затянутый и с большим перерегулированием.

Сравним показатели качества, полученные экспериментально (в главе 6.2) и полученные при синтезе контура положения (глава 4.5).

Для контура положения были получены показатели качества для трех коэффициентов РП ( $k_1=100$ ,  $k_2=200$  и  $k_3=300$ ). Характеристики полученные экспериментально приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Экспериментальные показатели качества контура положения

Коэффициент регулятора положения	Перерегулирование, $\sigma$ , %	Время переходного процесса, $t_p$ , мс
$k_1 = 100$	5	310
$k_2 = 200$	48	550
$k_3 = 300$	44	850

Перерегулирование, полученное при синтезе контура положения  $\sigma = 4.3\%$ , время переходного процесса  $t_p = 880$  мс. Расхождения в показателях качества обусловлено тем, что физическая модель не обеспечивает нужной точности.



У всего технического оборудования есть ошибка при работе.

Также были получены кривые переходных процессов при моделировании цифровой системы автоматического управления углового перемещения звена робота (с ПИД и П-регуляторами, глава 5.3). Про моделировав систему с П-регулятором, было получено:

- 1) перерегулирование  $\sigma = 0 \%$ ;
- 2) время переходного процесса  $t_p = 83$  мс.

В системе с ПИД-регулятором было получено:

- 1) перерегулирование  $\sigma = 2.3 \%$ ;
- 2) время переходного процесса  $t_p = 71$  мс.

Так как П-регулятор обеспечивает более лучшие показатели качества переходных процессов, то его использование в системе более предпочтительно. Время регулирования в системе с П-регулятором и ПИД-регулятором приблизительно равно, но во втором случае имеется перерегулирование, что недопустимо по технологическим требованиям для нашей системы.

## 7 Экономическое обоснование проекта

Целью технико-экономического расчета является определение сметы затрат на разработку стенда. Смета затрат - это выражение в денежной форме затрат на разработку и выполнение хозяйственно-договорной работы. Смета затрат будет складываться из затрат на:

- оборудование;
- программное обеспечение;
- заработную плату;
- аренду помещения.

Далее представлен расчет всех составляющих сметы затрат на разработку системы.

*Расчет затрат на основное оборудование и программное обеспечение.*

Стоимость затрат на приобретение оборудования и программного обеспечения вычислим по формуле 7.1.

$$S_3 = S_{об} + S_{прог} \quad (7.1)$$

где  $S_{об}$  – стоимость затрат на приобретение основного оборудования, представлена в таблице 7.1;

$S_{прог}$  – затраты на приобретение программного обеспечения, представлены в таблице 6.2.

Таблица 7.1 – Стоимость основного оборудования

Наименование	Количество, шт	Цена, руб	Стоимость, руб
Персональный компьютер 1	1	10000	10000
Монитор 1	1	500	500
Компьютерная мышь 1	1	500	500

Продолжение таблицы 7.1

Наименование	Количество, шт	Цена, руб	Стоимость, руб
Клавиатура 1	1	400	400
Персональный компьютер 2	1	15000	15000
Монитор 2	1	1000	1000
Компьютерная мышь 2	1	500	500
Клавиатура 2	1	500	500
Датчик угловых перемещений BE178A5	1	9500	9500
Двигателя ПЯ-250	1	10000	10000
Тахогенератор ТП80-20-0,2	1	6000	6000
NI PCI-6221	1	2000	2000
Стойка КОНТУР - 1	1	16500	16500
Общая стоимость			72400

Таблица 7.2 - Стоимость программного обеспечения

Наименование	Стоимость, руб.
Microsoft Windows XP	3000
Microsoft Office 2010	5000
LabVIEW	7500
Общая стоимость	15500

Используя формулу 7.1 проведем расчет общей стоимости затрат на приобретение оборудования:

$$S_3 = 72400 + 15500 = 87900 \text{ рублей}$$

### *Затраты на заработную плату*

Рассчитаем основную заработную плату по формуле 7.2.

$$\text{ОЗП} = \text{ОКЛ} * \text{КР} * \text{Т}, \quad (7.2)$$

где ОЗП – основная заработная плата, рублей в месяц;

ОКЛ – оклад, рублей в месяц;

КР – районный коэффициент, %;

Т – время разработки, месяц

С помощью формулы 7.2 рассчитаем основную заработную плату научного руководителя:

$$\text{ОЗП} = 20000 * 1,3 * 4 = 104000 \text{ рублей}$$

С помощью формулы 7.2 рассчитаем основную заработную плату ведущего инженера:

$$\text{ОЗП} = 30000 * 1,3 * 3 = 117000 \text{ рублей}$$

С помощью формулы 7.2 рассчитаем основную заработную плату техника-электромонтажника:

$$\text{ОЗП} = 15000 * 1,3 * 1 = 19500 \text{ рублей}$$

С помощью формулы 7.2 рассчитаем основную заработную плату консультанта по экономике:

$$\text{ОЗП} = 30000 * 1,3 * 0.1 = 3900 \text{ рублей}$$

Просуммировав зарплаты всех работников получаем сумму затрат на заработную плату:

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{ОЗП} = 104000 + 117000 + 19500 + 3900 = 244400 \text{ рублей}$$

Рассчитаем расходы на социальные нужды по формуле 7.3.

$$\text{РСН} = \text{ОСН} * \text{ОЗП}, \quad (7.3)$$

где РСН – расходы на социальные нужды, рублей в месяц;

ОЗП – основная заработная плата рублей в месяц;

ОСН – отчисления на социальные нужды.

ОСН включает в себя отчисления 22% в пенсионный фонд, 2.9% в фонд социального страхования, 5.1% в фонд обязательного медицинского страхования, 0.2% в фонд страхования от несчастных случаев.

$$\text{РСН} = 0.302 * 244400 = 73808.8 \text{ рублей}$$

Согласно полученным данным, рассчитаем общие затраты на заработную плату на весь период разработки по формуле 7.4.

$$\text{ЗЗП} = \text{ОЗП} + \text{РСН}, \quad (7.4)$$

где ЗЗП – общие затраты, связанные с заработной платой, рублей;

ОЗП – основная заработная плата, рублей в месяц;

РСН – размер затрат на социальные нужды, рублей в месяц;

$$\text{ЗЗП} = 244400 + 73808.8 = 318208.8 \text{ рублей}$$

*Расчёт накладных расходов*

Рассчитаем накладные расходы по формуле 7.5.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						101
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P_H = K_{HP} * (P_{CH} + S_3) \quad (7.5)$$

где  $P_H$  – величина накладных расходов, руб.;

$K_{HP}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, %;

$$P_H = 0,18 * (73808.8 + 87900) = 29107.58 \text{ рублей}$$

### *Затраты на электроэнергию*

Исходные данные для расчета стоимости электроэнергии:

- мощность, потребляемая ПК - 300 Вт;
- мощность, потребляемая лампой дневного света - 18 Вт;
- количество ламп в помещении - 10 шт.

Расходы на электроэнергию в день рассчитываются по формуле 7.6.

$$S_{эл.д} = (P_{ПК} + P_{л} * n) * N_{ч} * T_{эл} \quad (7.6)$$

где  $P_{ПК}$  – мощность, потребляемая ПК;

$P_{л}$  – мощность, потребляемая лампой дневного света;

$n$  – количество ламп дневного света;

$N_{ч}$  – количество часов;

$T_{эл}$  – тариф на электроэнергию.

$$S_{эл.д} = (0,3 + 0,018 * 10) * 8 * 2,52 = 9.68 \text{ рубля.}$$

Расходы на электроэнергию, затраченную на разработку рассчитываются по формуле 7.7.

$$S_{эл.} = S_{эл.д.} * N \quad (7.7)$$

где N – количество дней:

$$S_{\text{эл}} = 9.68 \cdot 90 = 871.2 \text{ рублей.}$$

#### *Затраты на амортизацию оборудования*

Определим затраты на амортизацию оборудования и программного обеспечения по формуле 7.8.

$$Z_A = \frac{S_K}{n_l \cdot 12 \cdot n_m} \quad (7.8)$$

где  $S_K$  - первоначальная стоимость всего оборудования и программного обеспечения, руб.;

$n_m$  – время использования, мес;

$n_l$  – срок службы, лет.

$$Z_A = 87900 / (5 \cdot 12 \cdot 4) = 366.25 \text{ рублей}$$

#### *Материальные затраты*

Сумма затрат на разработку и отладку программного обеспечения складывается из затрат, связанных с приобретением дополнительного оборудования, программного обеспечения. Данные затраты можно определить по формуле 7.9.

$$MЗ = S_3 + СФ + СБУМ, \quad (7.9)$$

где MЗ – материальные затраты, руб.;

$S_3$  – стоимость затрат на приобретение, руб.;

СФ – стоимость флешки, руб.;

СБУМ – стоимость бумаги, руб.;

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						103
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таким образом, материальные затраты составят:

$$МЗ = 87900 + 900 + 250 = 89050 \text{ рублей}$$

*Расчет сметы затрат на разработку стенда*

Все затраты, связанные с расходами на разработку и отладку стенда приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Затраты на разработку и отладку стенда

№ п/п	Затраты на разработку системы управления	Сумма затрат, руб.
1	Материальные затраты	89050
2	Заработная плата основная	244400
3	Отчисления на социальные нужды	73808.8
4	Затраты на электроэнергию	871.2
5	Амортизация оборудования	366.25
6	Накладные расходы	29107.58
Итого		437603.83

Вывод: затраты на разработку стенда составляют 437603.83 руб.



## 8 Безопасность исследовательского стенда

### *Безопасность элементов лабораторного стенда*

Главный элемент конструкции исследовательского стенда является электропривод, который соответствует требованиям безопасности ГОСТ 12.1.019:

- электропривод обеспечивает безопасность работающих при вводе в эксплуатацию и эксплуатации, как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией;
- материалы электропривода не окажут опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы и предусмотренных условиях эксплуатации, а также не создадут пожаровзрывоопасных ситуаций, т.к. выбраны материалы с классом опасности 4;
- для устранения опасности поражения электрическим током в случае прикосновения к корпусу и к другим не токоведущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением, применяется защитное зануление. Доступные металлические части оборудования, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции, должны быть надежно электрически соединены короткими проводниками с заземляющим проводом;
- конструкция электропривода и его отдельных частей исключает возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации и монтажа (демонтажа), т.к. спроектированные сочленяемые узлы и детали предполагается выполнить с достаточным запасом прочности;
- элементы конструкции электропривода не имеют острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих;

- конструкция электропривода исключает самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей, за счёт надёжного крепления. Опрокидывание исключено тем, что конструкция жёстко закреплена с корпусом стойки исследовательского стенда;

- проведение измерения физических величин при помощи ручных измерительных инструментов разрешается только при обеспечении мер, исключающих возможность контакта, работающего с токоведущими частями.

#### *Безопасность при размещении*

Согласно требованиям, ГОСТ 12.3.002-75, ГОСТ 12.3.003-91, ГОСТ 12.3.061-81, СНиП 31-01-03:

- лабораторные (рабочие, монтажные) площадки, на которых выполняются работы вне производственных помещений, соответствуют требованиям действующих строительных норм и правил, а также правил, утвержденных органами государственного надзора;

- размещение электропривода соответствует действующим нормам технологического проектирования;

- организация рабочих мест отвечает требованиям безопасности с учетом эргономических требований, устанавливаемых в государственных стандартах на конкретные производственные процессы, производственное оборудование и рабочие места.

#### *Требования безопасности к профессиональному отбору*

К обслуживанию электропривода допускаются лица:

- имеющие профессиональную подготовку в высших или среднетехнических заведениях;

- прошедшие инструктаж, обучение и проверку знаний по охране труда;

- не имеющие медицинских противопоказаний.

### *Пожарная безопасность*

Пожарная безопасность оборудования должна быть обеспечена в соответствии с требованиями настоящих стандартов, ГОСТ 12.1.004, ГОСТ, ГОСТ 12.2.007.0, ПУЭ, ПТЭ, и ПТБ, СНиП 3.05.06, СНиП 3.05.07. Исходя из этого выбран тип исполнения электрооборудования и степень его защиты от пыли и влаги.

Для обеспечения пожарной безопасности объекта, где предполагается установка электропривода необходимо использовать мероприятия пожарной профилактики:

- организационные (инструктаж персонала, разработка плана эвакуации и т.д.);
- технические (устройство не горючих перегородок);
- режимные (курение в специальных местах);
- эксплуатационные (профилактические осмотры).

### *Контроль выполнения требований безопасности*

Контроль за выполнением требований безопасности при эксплуатации электропривода возлагается на должностные лица в соответствии с правовыми и нормативными документами по созданию безопасности и нормальных условий труда.

### *Безопасность при чрезвычайных ситуациях*

При возникновении ЧС необходимо:

- 1) отключить электропитание электропривода и лаборатории;
- 2) выполнить предписание должностных инструкций;
- 3) покинуть здание и поступить в распоряжение начальника ГО и ЧС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была исследована система регулирования положения робота ТУР-10К.

Разработана математическая модель силовой части привода (одной степени подвижности робота), синтезирован контур тока, скорости и положения методом подчиненного регулирования.

Произведен расчет параметров для моделирования цифровой системы автоматического управления и произведено ее моделирование. Получены экспериментальные данные о разгоне привода и функционировании датчика положения.

Произведен сравнительный анализ полученных результатов.

Рассчитана сметная стоимость разработки стенда.

					БР 15.03.06 ПЗ	Лист
						108
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дубровский И.Л., Дамбраускас А.П., Рыбин А.А. Микропроцессорное управление электроприводами промышленных роботов: учебное пособие/; - Красноярск, КГТУ, 1993 – 88 с;
2. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. СПб: Питер, 2002. 448 с;
3. Смольников А.П. Теория автоматического управления. Линейные системы. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005г. 99 с;
4. Карташов Б. А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования, 2017 – 426 с;
5. Автоматизированные электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями. / М.Е. Гольц и др. – М.: Энергия, 1972 – 112 с;
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982 – 392с.
7. LabView [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.labview.ru>

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

«Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.Н. Сочнев  
подпись

« 08 » 08 2019г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

по направлению 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

«Исследование следящей системы регулирования положения робота ТУР-10К»

Руководитель

Решаев 8.07.19 доцент, к.т.н.  
подпись, дата должность, ученая степень

А.П. Смольников

Выпускник

Л. 8.07.2019  
подпись, дата

А.Ю. Лемешко

Нормоконтролер

Куликова 08.07.19г.  
подпись, дата

В.Н. Куликова

Красноярск 2019