

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Ульяновский государственный технический университет»

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания  
к выполнению контрольных работ  
для студентов специальности 140600  
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»

Составитель: В. А. Коробко

Ульяновск  
2009

УДК 612.3(076)  
ББК 31.291я7  
П79

Рецензент: доктор технических наук Кузнецов А. В.

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета УлГТУ

П 79      **Проектирование электротехнических устройств** : методические указания к выполнению контрольных работ / составитель А. В. Коробко. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 44 с.

Методические указания составлены для студентов специальности 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» всех форм обучения и содержат исходные данные и необходимый пояснительный материал для выполнения контрольных работ.

Подготовлено на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

**УДК 612.3(076)**  
**ББК 31.291я7**

Учебное издание

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания  
Составитель: КОРОБКО Александр Васильевич

Корректор Федотова Н. В.  
Подписано в печать 27.12.2009 Формат 60×84/16  
Усл. печ. л. 2,55. Тираж 100 экз. Заказ 357.  
Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.  
Типография УлГТУ, 432027, ул. Серенный Венец, д. 32.

© Коробко А. В., составление, 2009  
© Оформление. УлГТУ, 2009

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Задание 1. Разработка принципиальных и монтажных электрических схем.....</b>	<b>5</b>
1.1 Реверсивный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель.....	6
1.2 Реверсивный асинхронный электродвигатель с фазным ротором.....	6
1.3 Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с реверсом по якорю.....	7
1.4 Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с реверсом по полю.....	7
1.5 Двигатель постоянного тока независимого возбуждения.....	8
<b>Задание 2. Разработка технического задания.....</b>	<b>9</b>
2.1 Электротельфер.....	10
2.2 Электрокар автоматизированного склада-штабелера.....	12
2.3 Пассажирский лифт.....	14
2.4 Подъемный кран.....	16
2.5 Продольно-лесопильный станок.....	19
<b>Задание 3. Алгоритмизация законов управления.....</b>	<b>22</b>
3.1 Следящая система.....	23
3.2 Двухзонный электропривод.....	26
3.3 Система стабилизации тока сталеплавильной печи.....	29
3.4 Система стабилизации скорости гребной электроустановки.....	32
3.5 Регулирование скорости ленточного материала в функции температуры нагрева печи.....	36
3.6 Система стабилизации момента резания металлорежущего станка.....	38
3.7 Система стабилизации скорости резания токарно-карусельного станка.....	40
<b>Библиографический список.....</b>	<b>44</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Контрольные задания, для выполнения которых предназначены настоящие методические указания, позволяют закрепить теоретический материал и получить практические навыки при разработке и составлении технического задания, принципиальных и монтажных схем электрооборудования различных технологических установок, алгоритмов цифровых систем автоматического управления, находящихся все большее распространение в настоящее время.

Каждое задание содержит 5 вариантов, каждый из которых, в свою очередь – 5 подвариантов, позволяющих получить различные сочетания для одной группы студентов.

## **ЗАДАНИЕ 1. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ И МОНТАЖНЫХ СХЕМ.**

Основополагающими документами для электротехнической установки являются принципиальная и монтажная электротехнические схемы. Если первая объясняет принцип и последовательность действия всех элементов электрооборудования в совокупности, то вторая позволяет установить местонахождение всех элементов и связей между ними на реальном объекте. Монтажные электротехнические схемы или схемы электрических соединений подразделяются на схемы внешних электрических соединений между отдельными блоками устройства (например: пульт управления, комплектное устройство, элементы, расположенные на рабочем органе установки) и монтажные схемы отдельных блоков (например: панель комплектного устройства, пульт управления и др.).

Принципиальные электрические схемы должны быть выполнены с обязательной нумерацией всех электрических цепей и зон расположения элементов в соответствии с действующими нормативами. Монтажные схемы, кроме необходимых функциональных элементов, должны содержать соединительные элементы – разъемы, клеммные наборы, штепсели, розетки и др.

Принципиальные электрические схемы должны в обязательном порядке содержать максимально-токовую и времятоковую (тепловую) защиту, ограничение максимальных перемещений «вперед/назад» по сигналам конечных выключателей, электромагнитный тормоз при снятии питания для осуществления безопасности работ.

Итогом выполнения задания считаются чертежи схем, выполненные на форматах А1 или А2:

- Принципиальная электрическая схема ЭЗ.1;
- Монтажная электрическая схема внешних соединений между пультом, комплектным устройством и элементами

электрооборудования объекта (электродвигатели, датчики, конечные выключатели и др.) ЭЗ.2;

- Монтажная электрическая схема панели комплектного устройства ЭЗ.3.

### **1.1. Реверсивный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель**

Кроме вышеотмеченных общих требований должны быть выполнены частные:

- Пуск в три ступени (по два токоограничивающих дополнительных сопротивления в каждой фазе в функции тока (подвариант Т) или времени (подвариант В));
- Динамическое торможение с подачей постоянного тока в две фазы от:
  - сети через трансформатор и выпрямитель (подвариант С);
  - аккумуляторной батареи (подвариант А);
  - предварительного заряженной конденсаторной батареи (подвариант К).

Варианты выполнения задания: 1) Т+С; 2) Т+А; 3) Т+К; 4) В+С; 5) В+К.

### **1.2. Реверсивный асинхронный электродвигатель с фазным ротором**

Кроме вышеотмеченных общих требований должны быть выполнены частные:

- Пуск в три ступени (по два токоограничивающих дополнительных сопротивления в каждой фазе ротора в функции тока (подвариант Т) или времени (подвариант В));
- Динамическое торможение с подачей постоянного тока в две фазы от:
  - сети через трансформатор и выпрямитель (подвариант С);
  - аккумуляторной батареи (подвариант А);
  - предварительного заряженной конденсаторной батареи (подвариант К).

Варианты выполнения задания: 1) Т+С; 2) Т+А; 3) Т+К; 4) В+С; 5) В+А.

### **1.3. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с реверсом по якорю**

Кроме вышеотмеченных общих требований должны быть выполнены частные:

- Пуск в три ступени (по два токоограничивающих дополнительных сопротивления в цепи якоря в функции тока (подвариант Т) или времени (подвариант В));
- Торможение:
  - динамическое (подвариант Д);
  - противотоковое (подвариант П);
  - выбегом с наложением электротормоза (подвариант Э).

Варианты выполнения задания: 1) Т+Д; 2) Т+П; 3) Т+Э; 4) В+Д; 5) В+П.

### **1.4. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с реверсом по полю**

Кроме вышеотмеченных общих требований должны быть выполнены частные:

- Пуск в три ступени (по два токоограничивающих сопротивления в цепи якоря) в функции тока (подвариант Т) или времени (подвариант В);
- Торможение:
  - динамическое (подвариант Д);
  - противотоковое (подвариант П);
  - выбегом с наложением электротормоза (подвариант Э).

Варианты выполнения задания: 1) Т+Д; 2) Т+П; 3) Т+Э; 4) В+Д; 5) В+П.

## 1.5. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Кроме вышеотмеченных общих требований должны быть выполнены частные:

- Реверс двигателя по якору (подвариант Я); по обмотке возбуждения (подвариант О);
- Пуск в три ступени (по два токоограничивающих дополнительных сопротивления в цепи якоря в функции тока (подвариант Т) или времени (подвариант В));
- Торможение:
  - динамическое (подвариант Д);
  - противотоковое (подвариант П);

Варианты выполнения задания: 1) Я+Т+Д; 2) Я+Т+П; 3) Я+В+Д;  
4) О+Т+Д; 5) О+В+Д.



## **ЗАДАНИЕ 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ**

Важнейшим этапом проектирования электротехнических промышленных установок является этап технического задания, на котором формируются все основные технологические и структурные решения, выбирается степень автоматизации проектируемого оборудования, закладываются основы получения экономического эффекта, который будет реализован на этапе производственной эксплуатации. Все последующие этапы (техническое предложение, эскизный проект, изготовление и испытания опытного образца, корректировка технической документации) реализуют в той или иной степени потенциал, заложенный в техническом задании.

Техническое задание разрабатывается исполнителем проекта на основании технических требований заказчика, в которых отражаются основные конструктивные параметры объекта, технические характеристики и условия его эксплуатации. В данном разделе приведено несколько примеров промышленных установок с различными вариантами технических требований. По заданным параметрам установки необходимо выбрать основные параметры электроустановки, проработать принципиальную электрическую схему с необходимыми защитами и блокировками, составить перечень основных элементов электрооборудования.

Степень защиты НКУ необходимо предусмотреть по ГОСТ 14254 – 80 IP 32, условия эксплуатации – по ГОСТ 15543 – 70 УХЛ, категория размещения – 4.

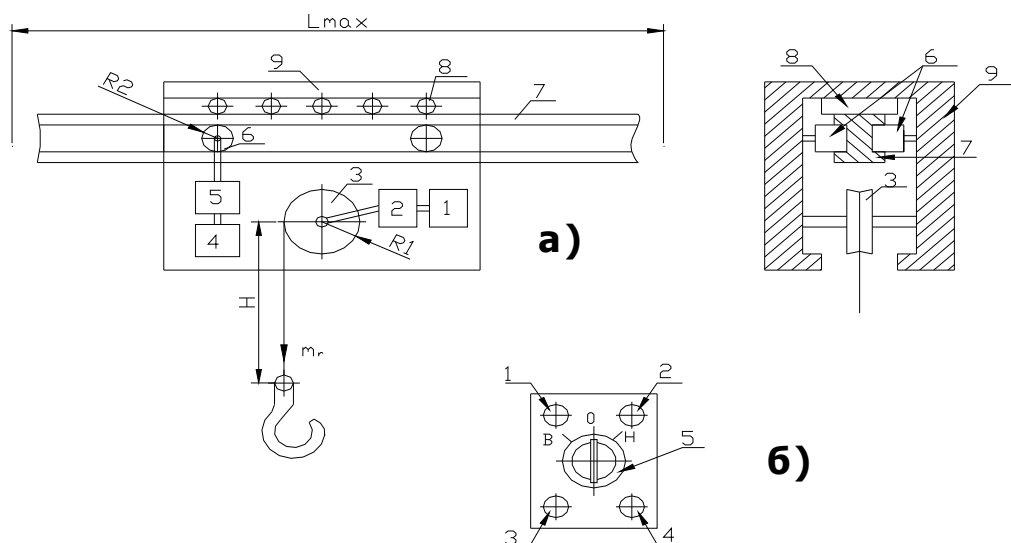
По результатам проведенных расчетов и проработок необходимо разработать техническое задание, в котором должны быть отражены следующие разделы:

1. Наименование и область применения.
2. Основание для разработки.
3. Цель и назначение установки.
4. Состав изделия и комплектность его основных элементов.

5. Технические требования к изделию и его основным элементам.
6. Стадии и этапы разработки.
7. Условия эксплуатации установки.
8. Методика испытаний опытного образца.
9. Экономические показатели.

## 2.1. Электротельфер

Внешний вид установки приведен на рис. 2.1



**Рис. 2.1. Конструктивная схема электротельфера(а) и пульта управления(б)**

1,4 – электромоторы; 2,5 – редукторы; 3,6 – шкивы подъема и перемещения; 7 – несущая балка; 8 – направляющие качения; 9 – корпус. Пульт управления: 1,2 – кнопки «Вкл.», «Откл.»; 3,4 – кнопки «Подъем», «Опускание груза»; 5 – переключатель перемещения тельфера

### 2.1.1. Исходные данные

Таблица 2.1

№ п/п	Параметр	Вариант				
		1	2	3	4	5
1	$R_1$ , м	0,05	0,07	0,1	0,12	0,15
2	$R_2$ , м	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08
3	$H$ , м	2,5	2,8	2,8	3,0	3,2
4	$L_{max}$ , м	25	30	35	35	40
5	$m_r$ , т	1	1,5	2	2,5	3
6	$m_r$ , т	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17
7	Коэффициент трения $\mu$	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
8	Скорость подъема/опускания $V_1$ , м/мин	1,5	1,5	2,0	2,5	2,5
9	Скорость перемещения $V_2$ , м/мин	5,0	6,0	8,0	9,0	10,0
10	Продолжительность включения ПВ, %	25	25	40	40	60

### 2.1.2. Основные зависимости

Угловая частота вращения:

$$\omega_1 = V_1 / 60 R_1; \quad (2.1)$$

$$\omega_2 = V_2 / 60 R_2. \quad (2.2)$$

Вес груза:

$$Q_r = g \cdot m_r. \quad (2.3)$$

Вес груза с тельфером:

$$Q_\Sigma = g(m_r + m_t). \quad (2.4)$$

Тяговый момент механизма подъема:

$$M_r = R_1 \cdot Q_r. \quad (2.5)$$

Тяговый момент механизма перемещения:

$$M_\Pi = R_2 \cdot \mu \cdot Q_\Sigma. \quad (2.6)$$

Мощность двигателя подъема:

$$P_r = \omega_1 \cdot M_r / R_1. \quad (2.7)$$

Мощность двигателя перемещения:

$$P_\Pi = \omega_2 \cdot M_\Pi / R_2. \quad (2.8)$$

Потери механизмов на трение в опорных подшипниках  
принять 5%

Номинальная мощность электродвигателей подъема и  
перемещения:

$$P_{H1} \geq P_r \cdot \sqrt{ПВ/100}; \quad (2.9)$$

$$P_{H2} \geq P_\Pi \cdot \sqrt{ПВ/100}. \quad (2.10)$$

По расчетным значениям  $P_{H1}$  и  $P_{H2}$  выбираются АД из ряда скоростей,  
максимально приближенных к угловым скоростям шкивов  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ .

Передаточные отношения редукторов:

$$i_1 = \omega_{H1} / \omega_{B1}; \quad (2.11)$$

$$i_2 = \omega_{H2} / \omega_{B2}. \quad (2.12)$$

### 2.1.3. Разработка принципиальной схемы

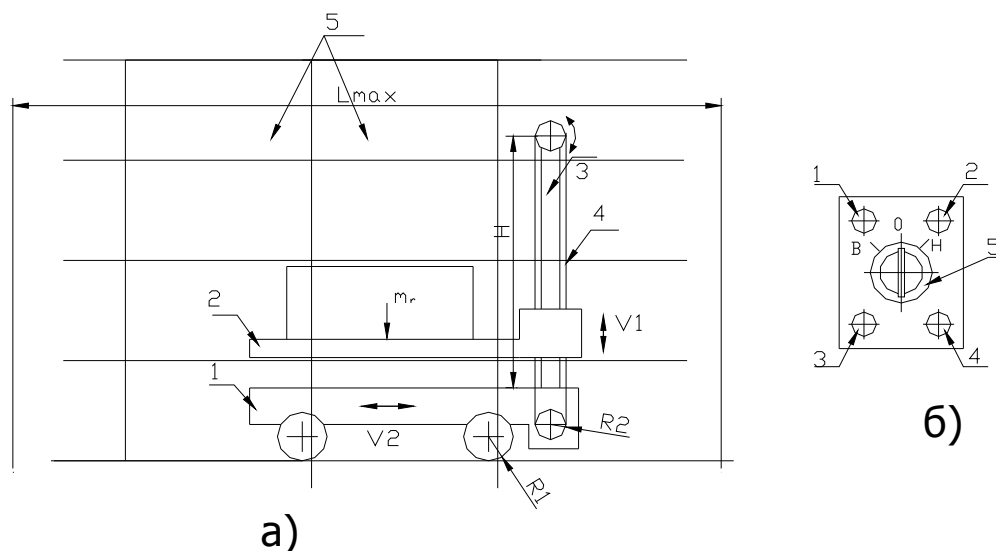
Электротельфер должен обеспечивать ручное управление  
следующими режимами:

- подъем/опускание груза;
- остановка подъема/опускания с фиксацией электромагнитным тормозом;
- перемещение «вперед»/«назад» электротельфера;
- ограничение ходов механизмов подъема/опускания и перемещения;
- максимально-токовую и времятоковую защиту электродвигателей

- подачу питания на электротельфер через стационарный вводной автоматический выключатель.

## 2.2. Электрокар автоматизированного склада – штабелера

Внешний вид установки приведен на рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Конструктивная схема электрокары (а) и пульта управления (б)**

1 – тележка; 2 – палета вертикального перемещения; 3 – стойка; 4 – цепная передача; 5 – ячейки склада. Пульт управления: 1,2 – кнопки подъема/опускания; 3,4 – кнопки включения/выключения электрокары; 5 – переключатель направления горизонтального перемещения

### 2.2.1. Исходные данные

Таблица 2.2

№ п/п	Параметр	Вариант				
		1	2	3	4	5
1	$R_1$ , м	0,15	0,17	0,20	0,21	0,22
2	$R_2$ , м	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08
3	$H$ , м	2,0	2,2	2,5	2,5	2,8
4	$L_{max}$ , м	30	40	40	50	50
5	$m_r$ , кг	1000	1500	1800	2000	2500
6	$m_{п}$ , кг	100	120	150	180	200
7	$m_t$ , кг	200	220	250	280	300
8	Коэффициент трения $\mu_1$	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
9	Коэффициент трения в направляющих скольжения цепной передачи $\mu_2$	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12
10	Скорость подъема/опускания $V_1$ , м/мин	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0
11	Скорость перемещения $V_2$ , м/мин	10,0	12,0	15,0	15,0	18,0
12	Продолжительность включения ПВ, %	25	40	40	60	60

### 2.2.2. Основные зависимости

Угловая частота вращения колес и шкива цепной передачи:

$$\omega_1 = V_1 / 60R_1; \quad (2.13)$$

$$\omega_2 = V_2 / 60R_2. \quad (2.14)$$

Вес груза с палетой:

$$Q_1 = g(m_r + m_n). \quad (2.15)$$

Реакция трения в направляющих скольжения:

$$F_{\text{тр1}} = \mu_2 \cdot Q_1. \quad (2.16)$$

Суммарный вес электрокара:

$$Q_\Sigma = Q_1 + g \cdot m_r. \quad (2.17)$$

Реакция трения в направляющих качения:

$$F_{\text{тр2}} = \mu_1 \cdot Q_\Sigma. \quad (2.18)$$

Тяговый момент при подъеме:

$$M_1 = R_2 \cdot (Q_1 + F_{\text{тр1}}). \quad (2.19)$$

Тяговый момент при перемещении:

$$M_2 = R_1 \cdot \mu_1 \cdot Q_\Sigma. \quad (2.20)$$

Мощность двигателей подъема и перемещения:

$$P_1 = M_1 \cdot \omega_1 / \eta_1; \quad (2.21)$$

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 / \eta_2. \quad (2.22)$$

Номинальная мощность электродвигателей:

$$P_{H1} \geq P_1 \cdot \sqrt{PB/100}; \quad (2.23)$$

$$P_{H2} \geq P_2 \cdot \sqrt{PB/100}. \quad (2.24)$$

По расчетным значениям  $P_{H1}$  и  $P_{H2}$  выбираются АД из ряда скоростей, максимально приближенных к угловым скоростям шкивов  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ .

Передаточные отношения редукторов:

$$i_1 = \omega_{H1} / \omega_{B1}; \quad (2.25)$$

$$i_2 = \omega_{H2} / \omega_{B2}. \quad (2.26)$$

### 2.2.3. Разработка принципиальной схемы

Электрокар должен обеспечивать ручное управление следующими режимами:

- перемещение «вперед/назад» тележки;
- подъем/опускание груза;
- ограничение ходов механизмов подъема/опускания и перемещения;
- максимально-токовую и время-токовую защиту;
- подачу питания на электрокар через контактные троллеи и напольные электроды.

## 2.3. Пассажирский лифт

Внешний вид установки приведен на рис. 2.3.

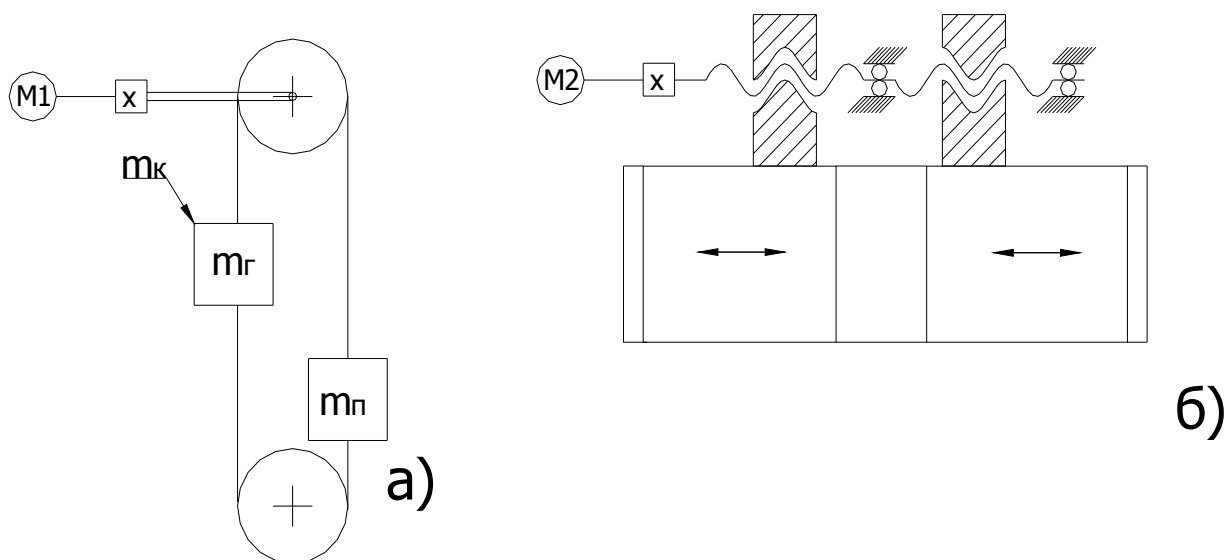


Рис. 2.3. Кинематические схемы механизмов подъема (а) и закрывания дверей (б) кабины лифта

### 2.3.1. Исходные данные

Таблица 2.3

№ п/п	Параметр	Вариант				
		1	2	3	4	5
1	$R$ , м	0,1	0,12	0,15	0,16	0,17
2	$m_{Г\text{ max}}$ , Т	0,5	0,6	0,7	0,8	1
3	$m_k$ , Т	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
4	$m_n$ , Т	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
5	Коэффициент трения в направляющих скольжения $\mu$	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12
6	Усилие прижатия к направляющим скольжения $F_n$ , кН	1	1,2	1,3	1,3	1,5
7	Рабочая скорость $V_p$ , м/мин	10	10	12	12	15
8	Скорость дотягивания $V_{min}$ , м/мин	5	5	6	6	7,5
9	Продолжительность включения ПВ, %	40	40	60	60	60

### 2.3.2. Основные зависимости

Тяговое усилие:

$$F_T = g \cdot (m_r + m_k - m_n) + \mu \cdot F_n. \quad (2.27)$$

Угловая рабочая скорость тягового шкива:

$$\omega_{ш} = V_p / 60R. \quad (2.28)$$

Момент сопротивления:

$$M_T = R \cdot F_T. \quad (2.29)$$

Мощность двигателей подъема/опускания:

$$P_T = M_T \cdot \omega_{ш} / \eta_1. \quad (2.30)$$

Потери механизме лифта принять 5% от расчетного значения  $P_T$

Номинальная мощность подъема:

$$P_{н1} \geq P_T \cdot \sqrt{PB/100}. \quad (2.31)$$

По расчетному значению выбирается АД из ряда скоростей, максимально приближенных к угловой скорости  $\omega_{ш}$ .

Передаточные отношения редукторов:

$$i_1 = \omega_n / \omega_{ш}. \quad (2.32)$$

Электродвигатель закрывания/открывания дверей выбирается по следующим данным:

- скорость перемещения  $V_2 = 30$  м/мин;
- усилие сопротивления  $F_c = 200$  Н; КПД механизма  $\eta_m = 0,85$ ;
- моменты полного закрытия/открытия дверей фиксируется по току упора  $I_{уп} = 1,5 \cdot I_n$ .

Скорость медленного доводочного перемещения кабины должна осуществляться путем включения второй скорости двухскоростного АД.

### 2.3.3. Разработка принципиальной электрической схемы

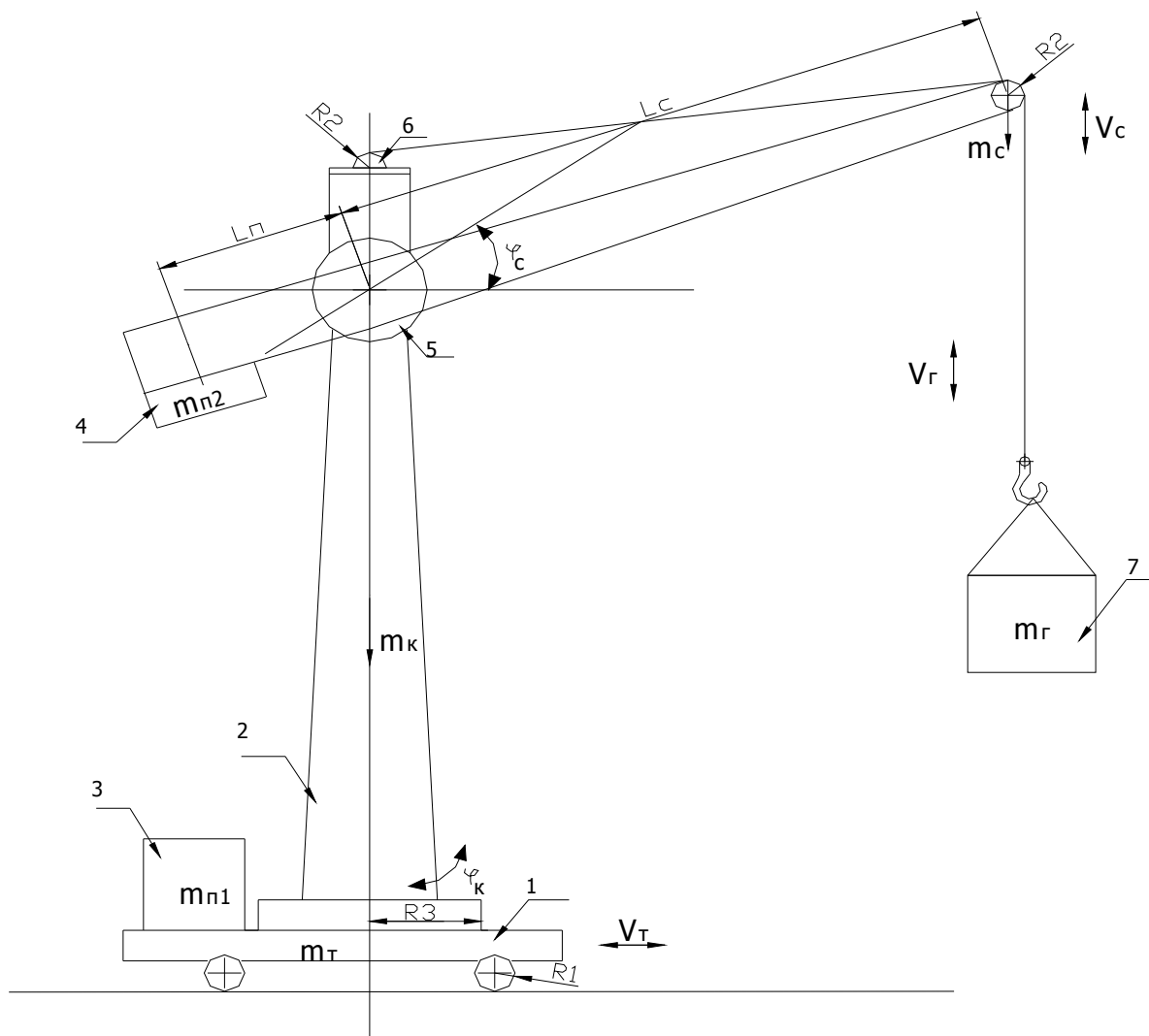
Управление лифтом должно обеспечивать следующие режимы:

- подъем/опускание кабины с грузом на 5 уровней;
- замедление скорости кабины по срабатыванию конечного выключателя замедления;
- остановку кабины с точностью  $\pm 3$  мм по срабатыванию конечного выключателя точного останова;

- открывание/закрывание дверей кабины с фиксацией момента выключения электропривода по току упора;
- ограничение ходов механизма подъема;
- максимальную токовую и тепловую защиту электроприводов;
- фиксацию положения кабины в нужном положении электромагнитным тормозом.

## 2.4. Подъемный кран

Общий вид подъемного крана приведен на рис. 2.4



**Рис. 2.4. Внешний вид подъемного крана**

1 – горизонтальная подъемная тележка; 2 – поворотная колонна; 3,4 – противовесы;  
5 – механизм поворота стрелы; 6 – механизм подъема груза; 7 – груз



### 2.4.1. Исходные данные

Таблица 2.4

№ п/п	Параметр	Вариант				
		1	2	3	4	5
1	$m_r$ , т	5,0	8,0	10,0	12,0	15,0
2	$m_c$ , т	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5
3	$m_T$ , т	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5
4	$m_k$ , т	3,0	5,0	6,0	7,0	9,0
5	$m_{п1}$ , т	3,0	5,0	6,0	7,0	9,0
6	$m_{п2}$ , т	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
7	$V_r$ , м/мин	5,0	6,0	6,5	7,0	8,0
8	$V_c$ , м/мин	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5
9	$n_k$ , об/мин	0,25	0,2	0,2	0,15	0,1
10	$\varphi_{с\max}$ , град	30	30	40	40	45
11	$\varphi_{к\max}$ , град	$\pm 180$	$\pm 180$	$\pm 180$	$\pm 180$	$\pm 180$
12	$V_T$ , м/мин	10,0	12,0	12,0	15,0	15,0
13	$R_1$ , м	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3
14	$R_2$ , м	0,15	0,15	0,17	0,18	0,2
15	$L_c$ , м	3,0	3,2	3,6	4,2	4,8
16	$L_{п}$ , м	1,0	1,0	1,2	1,5	1,6
17	$H_{\max}$ , м	6,0	8,0	10,0	10,0	12,0
18	Коэффициент трения качения	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
19	Коэффициент трения в направляющих поворотной колоны	0,08	0,08	0,09	0,1	0,1
20	Радиус направляющих	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5
21	Продолжительность включения ПВ, %	40	40	60	60	80

### 2.4.2. Основные зависимости

Общий вес крана:

$$Q_{\Sigma} = g \cdot (m_r + m_c + m_T + m_k + m_{п1} + m_{п2}). \quad (2.33)$$

Усилие сопротивления при горизонтальном перемещении:

$$F_{cl} = \mu_1 \cdot Q_{\Sigma}. \quad (2.34)$$

Угловая скорость колес тележки:

$$\omega_{T1} = V_T / 60 R_1. \quad (2.35)$$

Момент сопротивления на ведущих колесах тележки:

$$M_{cl} = R_1 \cdot F_{cl}. \quad (2.36)$$

Расчетная мощность двигателя перемещения тележки:

$$P_{p1} = M_{cl} \cdot \omega_{T1} / \eta_1, \quad (2.37)$$

где  $\eta_1 \approx 0,95$ .

Вес поднимаемого груза:

$$Q_{\Gamma}=g \cdot m_{\Gamma}. \quad (2.38)$$

Угловая скорость передаточных шкивов:

$$\omega_2=V_{\Gamma}/60R_2. \quad (2.39)$$

Момент сопротивления на передаточных шкивах:

$$M_{c2}=Q_{\Gamma} \cdot R_2. \quad (2.40)$$

Расчетная мощность двигателя перемещения тележки:

$$P_{p2}=M_{c2} \cdot \omega_2/\eta_2, \quad (2.41)$$

где  $\eta_2 \approx 0,95$ .

Полный вес поворотной колонны:

$$Q_K=g \cdot (m_{\Gamma}+m_c+m_K+m_{п2}). \quad (2.42)$$

Усилие сопротивления в направляющих поворота колонны:

$$F_{c3}=\mu_2 \cdot Q_K. \quad (2.43)$$

Момент сопротивления при повороте:

$$M_{c3}=R_3 \cdot F_{c3}. \quad (2.44)$$

Расчетная мощность двигателя поворота колонны:

$$P_{P3} = \frac{\omega_3 \cdot M_{C3}}{\eta_3} = \frac{\pi \cdot n_K \cdot M_{C3}}{30\eta_3}, \quad (2.45)$$

где  $\eta_3 \approx 0,9$ .

Угловая скорость поворота стрелы:

$$\omega_c=\omega_4=V_c/60L_c. \quad (2.46)$$

Момент сопротивления при повороте:

$$M_{c4}=g \cdot (m_c+m_{\Gamma}) \cdot L_c - g \cdot m_{п2} \cdot L_{\Gamma}. \quad (2.47)$$

Расчетная мощность двигателя поворота стрелы:

$$P_4=M_{c4} \cdot \omega_4/\eta_4, \quad (2.48)$$

где  $\eta_4 \approx 0,85$ .

Все электродвигатели следует выбирать из серии краново-металлургических асинхронных двигателей с фазным ротором. Диапазон регулирования скорости всех электроприводов  $\geq 1:10$  путем изменения активного сопротивления в фазах ротора. Возможно применение широтно-импульсного регулятора сопротивления.

При выборе электродвигателей следует учитывать заданную и паспортную продолжительность включения АД.

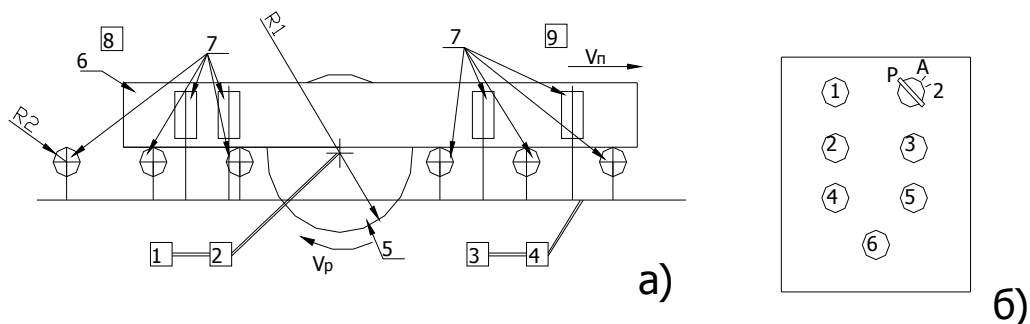
### 2.4.3. Разработка принципиальной электрической схемы

Управление подъемным краном должно обеспечивать следующие режимы:

- перемещение тележки с заданной максимальной скоростью с регулированием в диапазоне 1:10;
- подъем/опускание груза с заданной максимальной скоростью с регулированием 1:10;
- поворот колоны с заданной максимальной скоростью с регулированием 1:10;
- поворот стрелы с заданной максимальной скоростью с регулированием 1:10;
- ограничение максимальных ходов всех механизмов перемещения;
- фиксацию всех механизмов перемещения электромагнитным тормозом при отсутствии сигналов управления;
- максимально-токовую и тепловую защиту электроприводов;
- блокировку, исключающую совместную работу любого из двух электроприводов.

## 2.5 Продольно-лесопильный станок

Общий вид станка представлен на рис.2.5



**Рис. 2.5. Общий вид пилорамы (а) и пульта управления (б)**

1,3 – электродвигатели главного движения и подачи; 2,4 – редукторы; 5 – дисковая пила; 6 – заготовка; 7 – подающие ролики; 8,9 – конечные выключатели входа и выхода заготовки.

Пульт управления: 1 – включить станок; 2 – переключатель режима «Ручное» – «Полуавтомат»; 3 – включить/отключить главный привод; 4,5 – включить/отключить привод подачи; 6 – аварийный стоп

### 2.5.1. Исходные данные

Таблица 2.5

№ п/п	Параметр	Вариант				
		1	2	3	4	5
1	Скорость резания $V_p$ , м/мин	5	6	6,5	7	8
2	Скорость подачи $V_{п}$ , м/мин	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5
3	$R_1$ , м	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3
4	$R_2$ , м	0,15	0,15	0,17	0,18	0,2
5	Масса заготовки $m$ , кг	3	3,2	3,6	4,2	4,8
6	Коэффициент трения направляющих $\mu$	0,08	0,08	0,09	0,09	0,1
7	Момент резания $M_p$ , Н·м	0,8	0,9	1	1,2	1,5

### 2.5.2. Основные зависимости

Частота вращения пилы:

$$n_1 = V_1 / \pi D; \quad (2.49)$$

$$\omega_1 = \pi n / 30. \quad (2.50)$$

Расчетная мощность главного привода:

$$P_{p1} = M_p \cdot \omega_{t1} / \eta_1, \quad (2.51)$$

где  $\eta_1 \approx 0,95$ .

Сопротивление резанию:

$$F_p \approx 0,8 \cdot M_p / R_1. \quad (2.52)$$

Усилие трения:

$$F_{тр} \approx \mu \cdot g \cdot m. \quad (2.53)$$

Суммарное усилие привода подачи:

$$F_{\Sigma} = F_p + F_{тр}. \quad (2.54)$$

Момент сопротивления на подающих роликах:

$$M_{c2} = K_{п} \cdot F_{\Sigma} \cdot R_2 \quad (2.55)$$

где  $K_{п} \approx 0,7$  – коэффициент, учитывающий «проскальзывание» заготовки.

Угловая скорость подающих роликов:

$$\omega_2 = V_2 / K_{п} R_2. \quad (2.56)$$

Расчетная мощность привода подачи:

$$P_{p2} = M_{c2} \cdot \omega_2 / \eta_2 \quad (2.57)$$

где  $\eta_2 \approx 0,9$ .

В обоих случаях выбираются нерегулируемые асинхронные электродвигатели с к.з. ротором. Заданная продолжительность включения ПВ=60% для всех вариантов.

### **2.5.3. Разработка принципиальной электрической схемы**

Управление пилорамой должно обеспечивать следующие режимы:

- «ручной» (раздельный запуск электродвигателей) и «полуавтоматический» (с использованием сигналов конечных выключателей входа и выхода заготовки) ;
- аварийное торможение главного привода и привода подачи по сигналу аварийного стопа или конечного выключателя состояния защитного кожуха (открыт/закрыт) с наложением электромагнитного тормоза и динамическим торможением;
- максимальную токовую и тепловую защиту электродвигателей.

### ЗАДАНИЕ 3. АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

В данном задании приведены несколько вариантов САУ различными технологическими объектами: следящий электропривод, двухзонный электропривод главного движения металлорежущего станка, система стабилизации момента резания металлорежущего станка, система стабилизации тока дуги сталеплавильной электропечи, система стабилизации скорости вращения винта гребной электроустановки дизель-электрохода, система регулирования скорости ленточного материала в электропечи, система стабилизации скорости резания токарно-карусельного станка.

Для каждого технологического объекта даны варианты различных параметров объектов регулирования и исполнительных органов, в соответствии с которыми необходимо:

- а) разработать структурную схему САУ и определить ее параметры, а также параметры регуляторов в соответствии с заданным законом управления;
- б) составить блок-схему алгоритма функционирования цифровых регуляторов САУ;
- в) определить таймерный интервал по максимальной ветке алгоритма управления.

В вариантах задания предусмотреть следующее время исполнения команд вычислительного устройства:

- считывание константы ППЗУ – 1 мкс;
- запись/считывание переменной ОЗУ – 1 мкс;
- сложение/вычитание – 2 мкс;
- умножение/деление – 5 мкс;
- сравнение – 2 мкс.

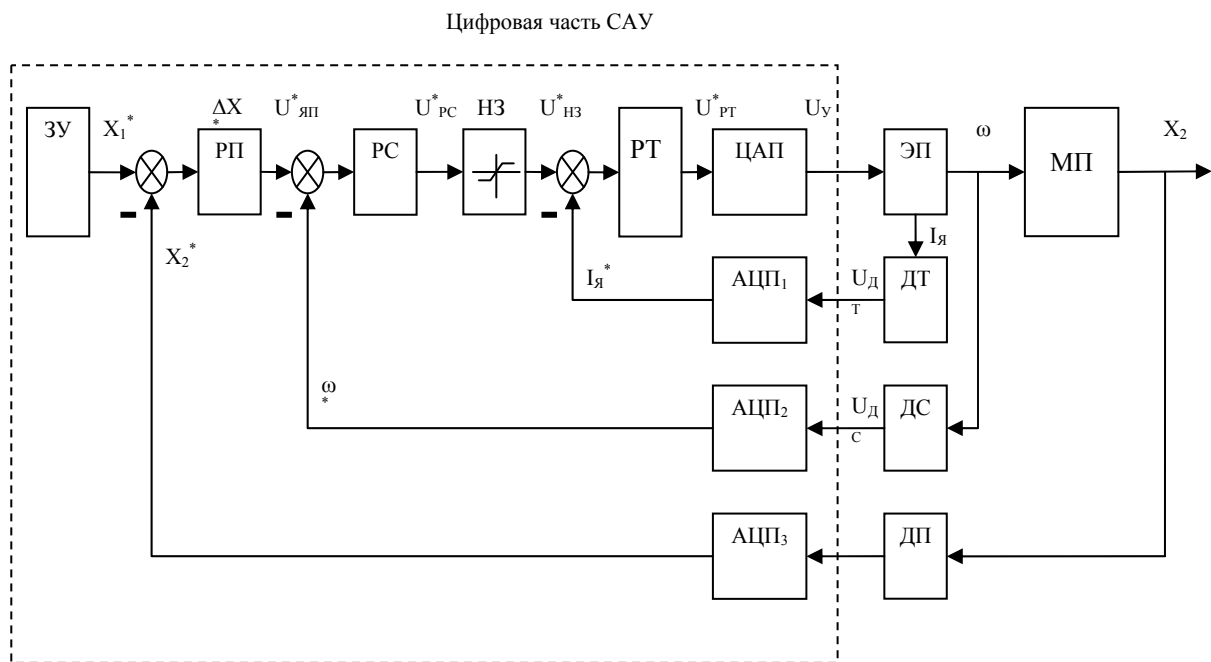
Разрядность АЦП, ЦАП – 12 + 1 знаковый, максимальное значение промежуточной переменной при вычислениях в ОЗУ – двухбайтовое слово.

### 3.1. Следящая система

#### 3.1.1. Функциональная схема

Схема следящей системы приведена на рис. 3.1.

Выходная координата  $X_2$  следящей системы воспроизводит заданные перемещения  $X_1^*$  ЗУ. Сигнал рассогласования  $\Delta X^*$  отрабатывается РП, который задает скорость перемещения. Все контуры управления настраиваются на технический оптимум. Параметры регуляторов определяются по заданным параметрам ЭП, МП, ДП. Тип датчика положения для всех вариантов – линейный, фотоимпульсный.



**Рис. 3.1. Функциональная схема следящей САУ**

ЗУ – задающее устройство; РП, РС, РТ – регуляторы положения, скорости, тока; ДП, ДС, ДТ – датчики положения, скорости, тока; АЦП, ЦАП – аналогово-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи; НЗ – нелинейное звено; ЭП – электропривод; МП – механический привод

### 3.1.2. Исходные данные

Таблица 3.1

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Электродвигатель					
$U_{я\text{ ном}}, \text{ В}$	48	60	110	150	220
$\omega_{\text{ном}}, \text{ с}^{-1}$	52,5	52,5	105	157	157
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	0,5	1	1,5	2	3
Коэффициент передачи МП $K_{\text{мп}}, \text{ об/мин}$	5	7	10	10	20
Дискретность ДП, мкм	1	1	2	2	5
Фазность тиристорного преобразователя, m	2	2	3	6	6
КПД. ЭП $\eta_{\text{эп}}$	0,7	0,7	0,75	0,77	0,8
Момент инерции привода $J_{\Sigma}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0,025	0,04	0,125	0,2	0,3

### 3.1.3. Методические указания

#### 3.1.3.1. Определение параметров САУ

Номинальный момент:

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}. \quad (3.11)$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эл.маг}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{эп}}. \quad (3.12)$$

Номинальный ток:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{эл.маг}} / U_{\text{ном}}. \quad (3.13)$$

Постоянная электродвигателя:

$$C = M_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}. \quad (3.14)$$

Номинальная ЭДС:

$$E_{\text{ном}} = C \cdot \omega_{\text{ном}}. \quad (3.15)$$

Сопротивление якорной цепи двигателя:

$$R_{\text{я}} = (U_{\text{я ном}} - E_{\text{ном}}) / I_{\text{ном}}. \quad (3.16)$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{\text{я}} = K_3 \cdot L_{\text{д}} / R_{\text{я}} \quad (3.17)$$

где  $K_3=1,25$  – коэффициент запаса, учитывающий влияние трансформатора и сглаживающего дросселя.

Индуктивность якоря двигателя:

$$L_{\text{д}} = K \cdot U_{\text{ном}} / p_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \quad (3.18)$$

где  $K=0,1$  – конструктивный коэффициент для компенсированных машин;  $p_{\text{п}}$  – число пар полюсов (для всех вариантов  $p_{\text{п}}=2$ ).



Передаточная функция тиристорного преобразователя:

$$W_{\text{тп}}(p) = K_{\text{тп}} / (T_{\text{тп}} \cdot p + 1). \quad (3.19)$$

Коэффициент передачи тиристорного преобразователя:

$$K_{\text{тп}} = U_{\text{тп max}} / U_{\text{y max}} = (U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{дин}}) / U_{\text{y max}} \quad (3.20)$$

где  $\Delta U_{\text{дин}} = 0,4 U_{\text{ном}}$  – напряжение динамического резерва.

Постоянная времени тиристорного преобразователя:

$$T_{\text{тп}} = 1 / m \cdot \omega_c = 1 / 2\pi \cdot m \cdot f_c \quad (3.21)$$

где  $f_c = 50 \text{ Гц}$  – частота питающей сети.

Коэффициенты передачи датчиков тока и скорости:

$$K_{\text{дт}} = 2I_{\text{ном}} / U_{\text{рс max}} \quad (3.22)$$

$$K_{\text{дс}} = K_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{ном}} / U_{\text{y max}} \quad (3.23)$$

где  $K_{\text{в}} = 1,5$  – коэффициент запаса на максимальное перерегулирование скорости  $\delta_{\text{max}} = 50\%$ .

### 3.1.3.2. Определение параметров регуляторов

В соответствии с заданными настройками контуров управления на технический оптимум, РТ должен обеспечивать изодромное (пропорционально-интегральное) регулирование, РС и РП – пропорциональное регулирование. В некоторых случаях для уменьшения моментной ошибки применяют настройку контура скорости на симметричный оптимум; РС становится при этом ПИ – регулятором. Для исключения больших перерегулирований на входе контура скорости или, что то же, на выходе окончного каскада РП, применяют фильтр с передаточной функцией, обратной передаточной функции РС.

Расчет регуляторов методом подчиненного регулирования подробно изложен в (1,4,6).

### 3.1.3.3. Разработка блок схемы алгоритма

По составленной структурной схеме САУ составляются уравнения цифровой управляющей части в операторном виде и в дифференциальных уравнениях.

(3.24)

$$(3.25)$$

26

В первой зоне регулирования система построена по двухконтурной схеме методом подчиненного регулирования: контуры тока и скорости настраиваются на технический оптимум. ЗИ задает темп изменения скорости  $\omega$  с заданным ускорением  $\varepsilon_0$ .

При задании сигнала  $U_z$ , определяющего скорость  $\omega > \omega_{ном}$ , в работу вступает вторая зона: сигнал на входе регулятора ЭДС. РЕ уменьшается, уменьшается ток  $I_b$  и, соответственно, поток возбуждения  $\Phi$ . При выборе РЕ и РТВ ПИ-регуляторами разность  $\Delta E$  мала и напряжение ТПЯ  $U_{я} = U_{я ном}$

### 3.2.2 Исходные данные

Таблица 3.2

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Электродвигатель					
$U_{я ном}, В$	220	220	360	440	440
$\omega_{ном}, с^{-1}$	105	105	157,5	157,5	210
$\omega_{мах}, с^{-1}$	420	315	315	315	410
$P_{ном}, кВт$	10	18	28	42	56
$U_{ов ном}, В$	110	220	220	220	220
$R_{ов}, Ом$	36	42	32	20	18
Фазность тиристорных преобразователей					
ТПЯ – $m_1$	3	3	6	6	6
ТПВ – $m_2$	2	2	3	3	6
КПД. ЭП в 1-й зоне регулирования, $\eta_{эп}$	0,75	0,78	0,8	0,82	0,83
Момент инерции привода, $J_{\Sigma}, кг \cdot м^2$	0,2	0,3	0,36	0,45	0,52
Число пар полюсов, $p$	2	2	2	4	4
Число параллельных витков обмотки якоря, $a$	1	1	1	2	2
Число витков обмотки якоря, $W_{я}$	248	248	186	152	120

### 3.2.3. Методические указания

#### 3.2.3.1. Определение параметров САУ

Параметры для первой зоны регулирования определяются аналогично п. 3.1.3.1 по формулам (3.1) – (3.22).

Передаточная функция ОВД разделяется на два последовательно соединенных звена:

$$W_b(p) = \Phi(p)/U_b(p) = W_i(p) \cdot W_{\phi}(p); \quad (3.26)$$

$$W_i(p) = I_b(p)/U_b(p) = K_i/(T_b p + 1); \quad (3.27)$$

$$W_{\phi}(p)=\Phi(p)/I_{\phi}(p)=K_{\phi}/(T_{\phi}p+1). \quad (3.28)$$

Постоянная времени  $T_{\phi}$  обусловлена инерционностью нарастания тока возбуждения из-за большой индуктивности обмотки возбуждения, постоянная времени  $T_{\phi}$  – инерционностью нарастания магнитного потока.

В первом приближении:

$$T_{\phi}=0,13+0,21g \cdot P_{\text{ном}} \text{ (с)}; \quad (3.29)$$

$$T_{\phi}=0,1T_{\phi}. \quad (3.30)$$

Номинальный ток возбуждения:

$$I_{\phi \text{ ном}}=U_{\phi \text{ ном}}/R_{\phi}. \quad (3.31)$$

Коэффициент передачи ТПВ:

$$K_{\text{ТПВ}}=U_{\phi \text{ ном}}/U_{y2 \text{ max}}. \quad (3.32)$$

Коэффициент передачи  $K_i$ :

$$K_i=I_{\phi \text{ ном}}/U_{\phi \text{ ном}}. \quad (3.33)$$

Конструктивный коэффициент двигателя:

$$K_d=P_{\phi} \cdot W_{\phi}/2\pi \cdot a. \quad (3.34)$$

Номинальный поток двигателя:

$$\Phi_{\phi \text{ ном}}=C/K_d \text{ [Вб]}. \quad (3.35)$$

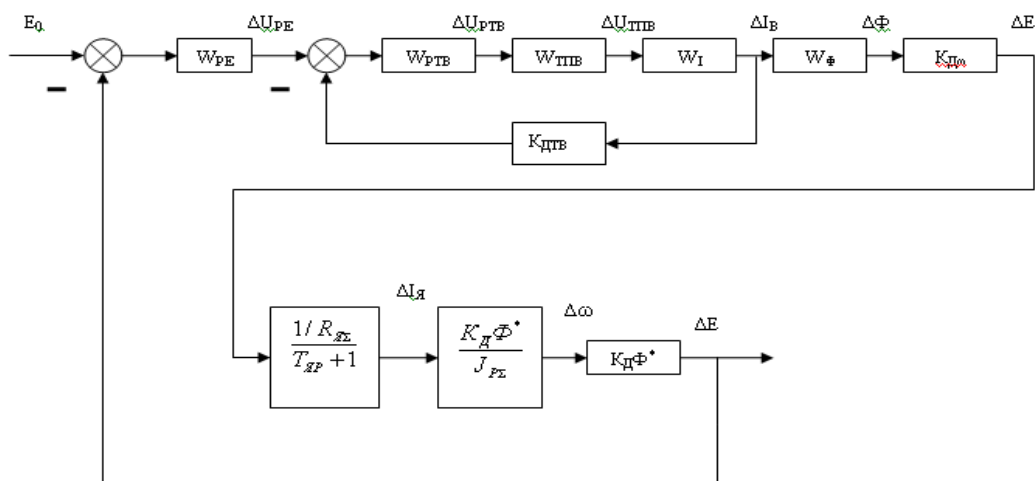
Коэффициент передачи  $K_{\phi}$  (в точке линеаризации при  $\Phi=\Phi_{\phi \text{ ном}}$ ):

$$K_{\phi}=\Phi_{\phi \text{ ном}}/I_{\phi \text{ ном}}. \quad (3.36)$$

Перед построением структурной схемы следует более детально раскрыть элементы ЯЭД и ОВД функциональной схемы по рис.3.2а.

### 3.2.3.2. Определение параметров регуляторов

РС и РТ для первой зоны регулирования рассчитываются по известной методике (см. п. 3.1.3.2). Для второй зоны регулирования упрощенная линеаризованная структура представлена на рис. 3.2б.



**Рис. 3.2б. Структурная схема для второй зоны регулирования**

Изотромный РТВ внутреннего контура компенсирует наибольшую инерцию ОВД с постоянной времени  $T_v$ , оставляя некомпенсированной малую постоянную времени  $T_{ТПВ}$ . При рассмотрении внешнего контура регулирования ЭДС следует рассмотреть, какая инерция здесь преобладает: в магнитной цепи ОВД или обусловленная механической инерцией с постоянной времени.

$$T_m = I_{ян} \cdot R_{ян} / (K_d \cdot \Phi^0)^2. \quad (3.37)$$

Точку линеаризации следует выбирать для скорости  $\omega^0 = \omega_{ном}$ .

### **3.2.3.3. Разработка блок-схемы алгоритма цифровых регуляторов САУ**

Осуществляется аналогично п.п. 3.1.3.3.

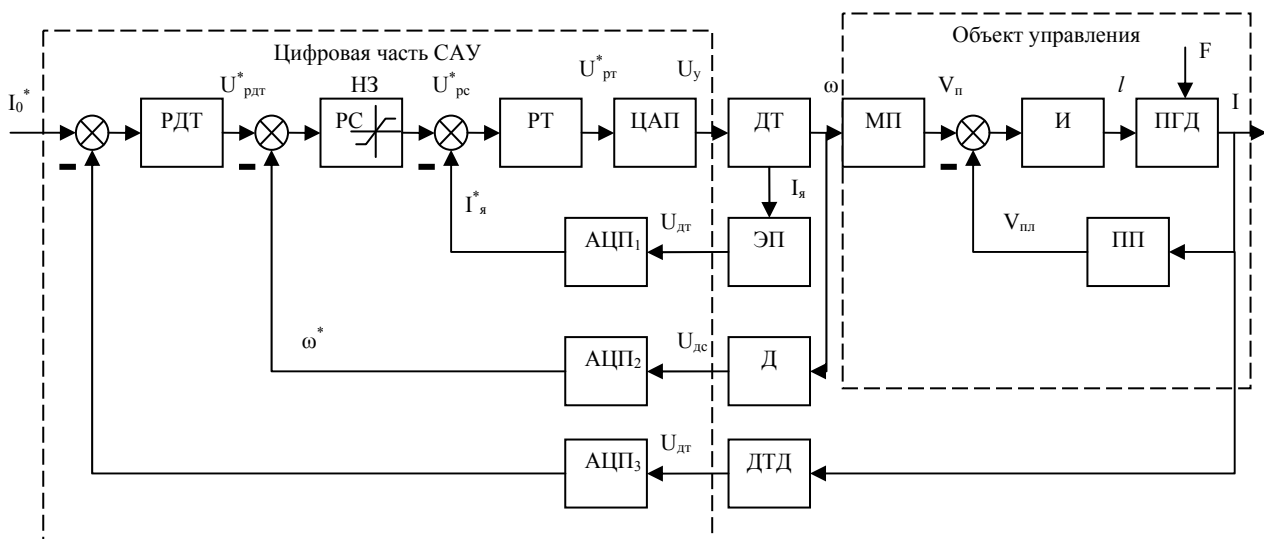
## **3.3. Система стабилизации тока дуги сталеплавильной электропечи**

### **3.3.1. Функциональная схема**

Схема стабилизации тока дуги сталеплавильной электропечи приведена на рис. 3.3а.

Заданное значение  $I_0^*$  тока дуги  $I_d$  стабилизируется изменением скорости ЭП  $\omega$  и, соответственно, скорости подачи  $V_n$ . Перемещение  $l$  электродов на расплавленную массу металла вызывает большое или меньшее значение  $I_d$  в зависимости от междугового промежутка  $l = \int (V_n - V_{пл}) dt$  и действия возмущения  $F$ , обусловленного конфигурацией расплавляемой массы, колебаниями напряжения сети, питающей силовой трансформатор, и др. В зависимости от тока  $I_d$  скорость плавления  $V_{пл}$  также изменяется по мере усадки расплавляемой массы металла.

ЭП представляет собой комплект, состоящий из электродвигателя подачи, тиристорного преобразователя и системы импульсно - фазового управления, на вход которой подается сигнал  $U_y$  через ЦАП от цифрового РТ. Система управления ЭП и стабилизации  $I_d$  построена по трехконтурной схеме методом подчиненного регулирования.



**Рис. 3.3а. Функциональная схема системы стабилизации тока дуги**

РТД, РС, РТ – регуляторы тока дуги, скорости и тока ЭП; ЭП – электропривод; МП – механическая передача; И – интегрирующее звено; ПГД – процесс горения дуги; ПП – процесс плавления; ДТД, ДС, ДТ – датчики тока дуги, скорости и тока ЭП; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП<sub>1,2,3</sub> – аналого-цифровые преобразователи; НЗ – нелинейное звено;  $I_0$ ,  $I_d$  – заданное и фактическое значение тока дуги;  $l$  – перемещение;  $V_n$ ,  $V_{пл}$  – скорости подачи и плавки;  $F$  – возмущение; максимальные значения сигналов  $U_y$ ,  $U_{дт}$ ,  $U_{дс}$ ,  $U_{дтд} \leq 10V$

### 3.3.2. Исходные данные

Таблица 3.3.

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Объект регулирования					
Номинальный ток дуги $I_{дн}$ , кА	10	12	14	16	20
Коэффициент дуги $K_d$ , кА/м	80	100	100	120	120
Коэффициент осадки (плавления)					
КПД, м/с·кА	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
Радиус приведения МП $K_{мп}$ , м	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Электродвигатель подачи					
Номинальная скорость $\omega_n$ , с <sup>-1</sup>	52,5	105	105	157,5	157,5
Номинальная мощность $P_n$ , кВт	2	3	3	4	5
Номинальное напряжение $U_n$ , В	110	110	165	220	220
КПД. ЭП $\eta_{эп}$ , %	70	72	75	75	78
Момент инерции привода $J_\Sigma$ , кг·м <sup>2</sup>	0,2	0,3	0,3	0,35	0,4
Перегрузочная способность по моменту (току), $\lambda$	4	4	3	3	2

### 3.3.3. Методические рекомендации

#### 3.3.3.1. Расчет параметров САУ

Параметры электродвигателя, тиристорного преобразователя, рассчитываются аналогично п. 3.1.3.1.

Структура объекта регулирования приводится к виду по рис.3.3б.

Передаточная функция объекта:

$$W_{ор}(p) = K_{мп} \cdot K_{пл} / (1/K_d \cdot K_{пл} \cdot p + 1) = K_{ор} / (T_{пл} \cdot p + 1). \quad (3.38)$$

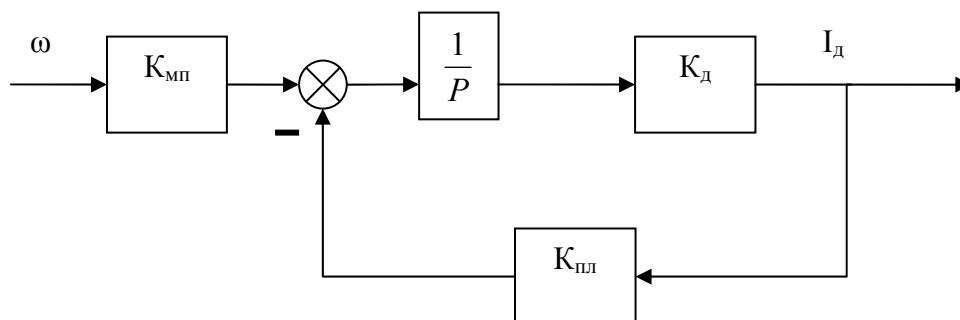


Рис. 3.3б. Структурная схема объекта регулирования.

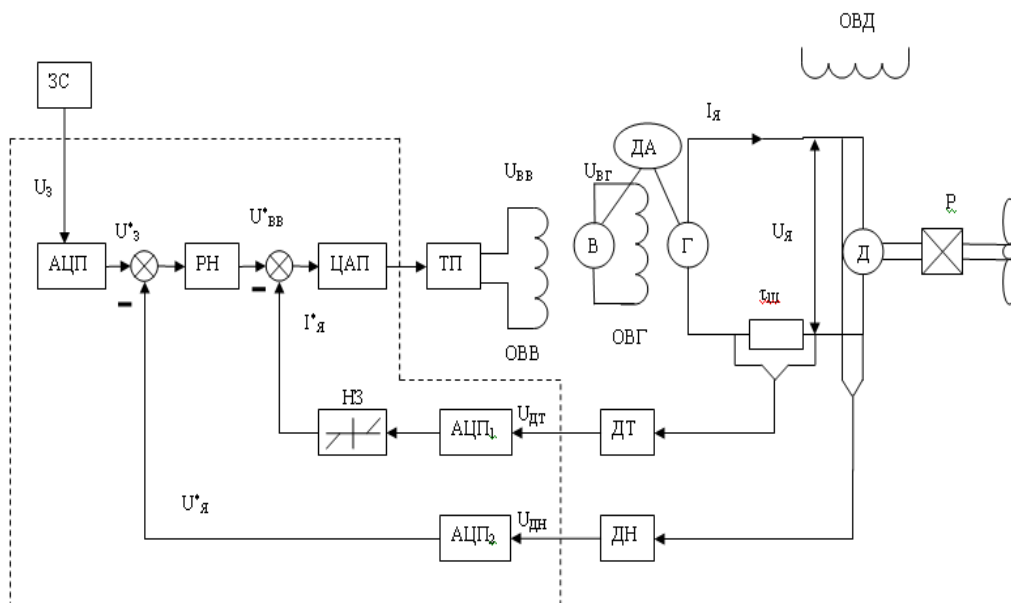
Вследствие большой постоянной времени плавления  $T_{пл}$ , обусловленной инерционностью тепловых процессов, потребуется большая постоянная в числителе передаточной функции РТД. Для цифровой реализации РТД это особых технических затруднений не вызывает, однако вследствие малых приращений за таймерный интервал может вызвать погрешность регулирования, обусловленную конечным значением квантования по амплитуде АЦП.

### 3.3.3.2. Разработка структурной схемы, составление управлений, блок-схемы алгоритма управления, оценка величины таймерного интервала и его влияние на динамику

Вести согласно рекомендациям п. 3.1.3.

## 3.4. Система стабилизации скорости гребной электроустановки

### 3.4.1. Функциональная схема



**Рис. 3.4а. Функциональная схема САУ гребной электроустановки**

ДА – дизельный агрегат; В – возбудитель; Г – генератор; Д – двигатель; ОВВ, ОВГ, ОВД – обмотки возбуждения двигателя, возбудителя, генератора; РН – регулятор напряжения; НЗ – нелинейное звено; ДТ, ДН – датчики тока, напряжения; ТП – тиристорный преобразователь; АЦП<sub>1,2,3</sub> – аналого-цифровые преобразователи; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; Р – редуктор



Заданное значение скорости вращения винта  $U_3$  от ЗС в рубке управления судна оцифровывается АЦП<sub>3</sub>. Стабилизация скорости осуществляется при помощи обратной связи по напряжению с обеспечением предельной статической точности, равный статизму естественной механической характеристики Д. Обратная связь по току обеспечивает получение экскаваторной характеристики с началом действия отсечки от  $I=I_{ян}$  до максимального значения  $I=1,5I_{ян}$ .

Возбудитель В обеспечивает необходимое усиление сигнала преобразователя П по мощности.

На гребную электроустановку действует возмущения по нагрузке, обусловленные режимом работы судна. Момент сопротивления  $M_c$  от угловой скорости винта зависит в квадратичной зависимости:

$$M_c = a \cdot \omega^2. \quad (3.39)$$

Предельные режимы работы судна: «швартовый», т.е. работа на упор, и движение в чистой воде без груза. Коэффициент  $a$  при этом принимает различные значения (рис. 3.46).

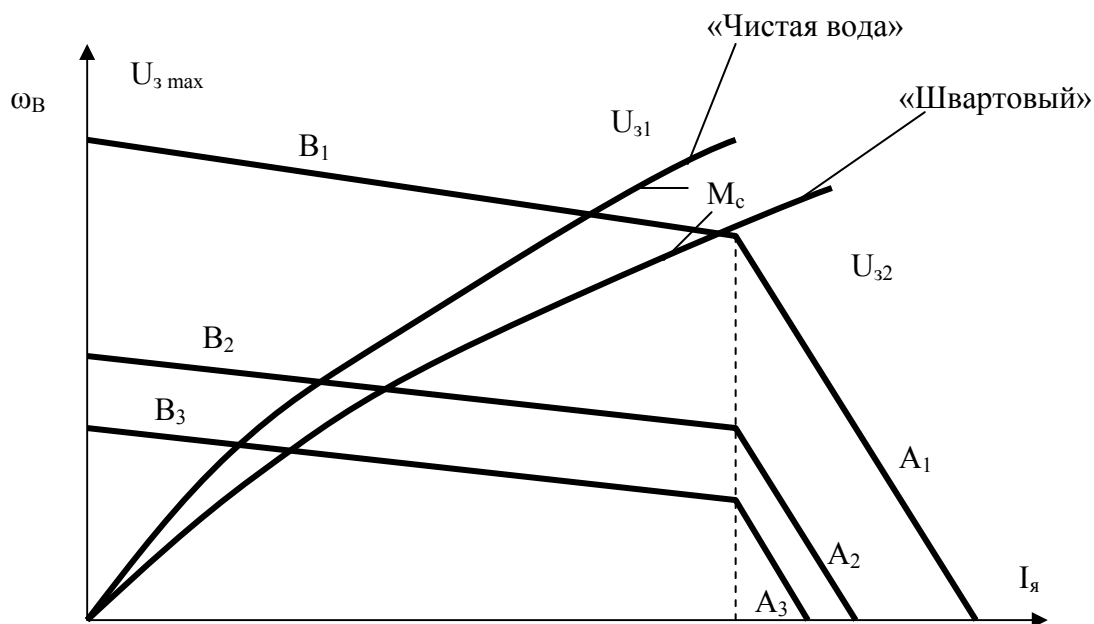


Рис. 3.46. Статические характеристики момента сопротивления и механические характеристики системы

При уменьшении сигнала задания значения моментов сопротивления, двигателя и скоростей винта иллюстрируются т.т.  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  в «швартовом» режиме и т.т.  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  при движении в «чистой» воде.

### 3.4.2. Исходные данные

Таблица 3.4.

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Электродвигатель					
$U_{ян}, В$	440	460	520	540	540
$P_{дн}, кВт$	140	160	180	200	220
$\omega_{дн}, с^{-1}$	52,5	52,5	78,7	78,7	105
$\eta_d$	0,85	0,85	0,87	0,87	0,89
Генератор					
$U_{гн}, В$	460	500	540	560	560
$P_{гн}, кВт$	200	220	240	260	280
$\omega_{гн}, с^{-1}$	105	105	157	157	157
$\eta_g$	0,86	0,86	0,88	0,88	0,89
$U_{вгн}, В$	180	180	200	220	220
$R_{вг}, Ом$	15	12	10	9	8
Возбудитель					
$U_{вн}, В$	210	210	220	230	230
$P_{вн}, кВт$	2,5	3,2	4,4	5,6	6,4
$\omega_{вн}, с^{-1}$	105	105	157	157	157
Тиристорный преобразователь возбудителя $U_{тпн}, В$	230	260	260	300	300
Фазность $m$	2	3	3	6	6
$U_{вхн}, В$	10	10	10	10	10

### 3.4.3. Методические указания

#### 3.4.3.1. Определение параметров САУ

Параметры двигателя определяются аналогично п.3.1.3.1.

Номинальный ток генератора:

$$I_{гн} = P_{гн} / U_{гн}. \quad (3.41)$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{эгн} = P_{гн} / \eta. \quad (3.42)$$

ЭДС генератора:

$$E_{гн} = P_{эгн} / I_{гн}. \quad (3.43)$$

Внутреннее сопротивление:

$$R_{г} = (E_{гн} - U_{гн}) / I_{гн}. \quad (3.44)$$

Индуктивность якоря генератора  $L_{г}$  определяется по (3.18)

Суммарные индуктивность и сопротивление якорной цепи (3.45)

двигателя: (3.46)

$$L_{\Sigma} = L_{д} + L_{г};$$

$$R_{\Sigma} = R_{яд} + R_{яг}.$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{я\Sigma} = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}. \quad (3.47)$$

Ток ОБГ:

$$I_{вгн} = U_{вгн} / R_{вгн}. \quad (3.48)$$

Ток возбуждателя:

$$I_{ввн} = P_{вн} / U_{вн}. \quad (3.49)$$

Сопротивление якоря возбуждателя:

$$R_{яв} = U_{вн} / I_{вв}. \quad (3.50)$$

Параметры тиристорного преобразователя, датчиков тока и напряжения определяются аналогично п.3.1.3.1.

### 3.4.3.2. Определение параметров РН и НЗ

Для получения статизма в системе Г-Д с обратной связью по напряжению равного статизму естественной характеристики Д, необходимо применение изотропного РН:

$$W_{рн} = K_{рн} (T_{овр} + 1) / T_{рн}. \quad (3.51)$$

Параметры РН выбираются методом ЛАЧХ с условием обеспечения максимального перерегулирования переходной характеристики не более  $\delta_{\max} \leq 35\% [1, 4, 6]$

При настройке ДТ на максимальный токовый сигнал  $I_{\max} = 1,5 \cdot I_{ян}$ ,  $U_{дт \max} = 10В$  и  $K_{дт} = U_{дт \max} / I_{\max}$ . Напряжение ДТ, соответствующее  $I_{отс} = I_{ян}$ :

$$U_{дт \ отс} = K_{дт} \cdot I_{отс}. \quad (3.52)$$

Максимальный выходной сигнал НЗ:

$$I_{я \ max}^* = 2^{12} [\text{дискрет}]. \quad (3.53)$$

Сигнал НЗ при  $I_{я} < I_{ном} I_{я}^* = 0$ .

Максимальный выходной сигнал РН, соответствующий  $U_{ян}$ ,  $U_{рн\ max}^* = 2^{12}$ . Следовательно, при задании максимальной скорости  $\omega_{max}$  в момент начала действия отсечки  $U_{рн\ отс}^* = (E_{дн}/U_{ян}) \cdot 2^{12}$ .

Коэффициент передачи НЗ:

$$K_{нз}^* = U_{нс\ отс}^* / I_{я\ отс}^* \quad (3.54)$$

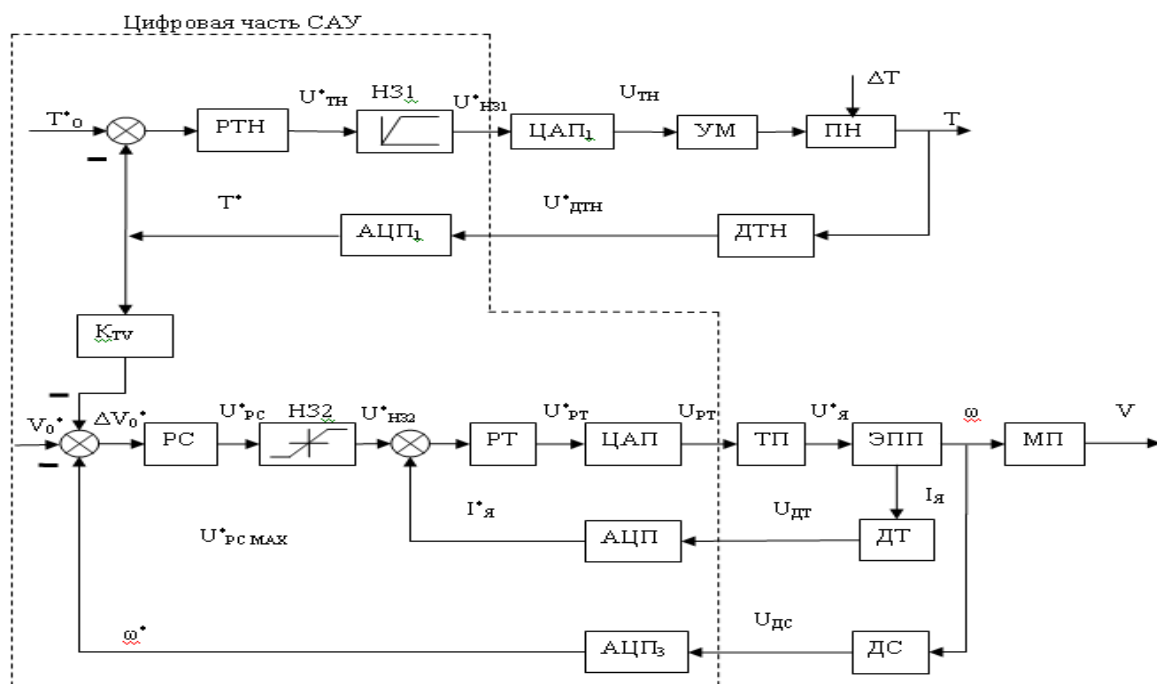
### 3.4.3.3. Разработка блок-схемы алгоритма

Вести согласно п.п.3.1.3.3, 3.1.3.4.

## 3.5. Регулирование скорости ленточного материала в функции температуры нагрева печи

### 3.5.1. Функциональная система САУ

Начальная температура  $T_n$  нагрева печи равна температуре окружающей среды. При включении установки включается электропривод подачи с начальной скоростью  $V_0$  и начинается процесс нагрева печи и ленточного материала до температуры  $T=T_0$ . При повышении температуры повышается скорость подачи до уровня  $V_{max}=V_0+\Delta V$  соответствующего стабилизируемой температуре  $T_0$ . Нелинейные звенья НЗ<sub>1,2</sub> ограничивают выходные сигналы регуляторов в начальный момент включения и в переходных режимах. ЭПП настроен на технический оптимум.



**Рис. 3.5. Функциональная схема регулирования скорости ленточного материала в функции температуры нагрева**

РС, РТ, РТН – регуляторы скорости, тока, температуры; ДС, ДТ, ДТН – датчики скорости, тока, температуры; АЦП, ЦАП – аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи; НЗ<sub>1</sub>, НЗ<sub>2</sub> – нелинейные звенья; ПН – процесс нагрева; УМ – усилитель мощности; МП – механизм подачи; ЭПП – электропривод подачи

### 3.5.2. Исходные данные

Таблица 3.5

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Электродвигатель					
$U_{ян}, В$	65	110	110	150	220
$\omega_n, с^{-1}$	52,5	105	105	157	210
$P_n, кВт$	3	3	4	4	5
$\eta_{эп}$	0,82	0,82	0,85	0,85	0,87
$J, кг \cdot м^2$	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3
Начальная скорость $V_0, м/с$	0,005	0,015	0,02	0,02	0,02
Максимальная скорость $V_{max}, м/с$	0,05	0,15	0,15	0,2	0,2
Процесс нагрева					
Начальная температура $T_n, град$	20	20	25	25	30
Температура стабилизации $T_0, град$	200	200	250	250	300
Постоянная времени нагрева $T_n, с$	10	10	12	12	15
Усилитель мощности					
$U_{вх}, В$	10	10	10	10	10
$U_{умн}, В$	110	110	220	220	220
$T_{ум}, с$	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15

### 3.5.3. Методические указания

#### 3.5.3.1 Определение параметров САУ

Параметры ЭПП (двигателя совместно с тиристорным преобразователем), и датчиков определяются согласно п.3.1.3.1.

Передаточная функция процесса нагрева

$$W_{\text{пн}}(p) = K_{\text{пн}} / (T_{\text{пн}} p + 1), \quad (3.55)$$

где  $K_{\text{пн}} = T_0 / U_{\text{умн}}$ .

Передаточная функция УМ:

$$W_{\text{ум}} = K_{\text{ум}} / (T_{\text{ум}} p + 1). \quad (3.56)$$

#### 3.5.3.2. Определение параметров регуляторов

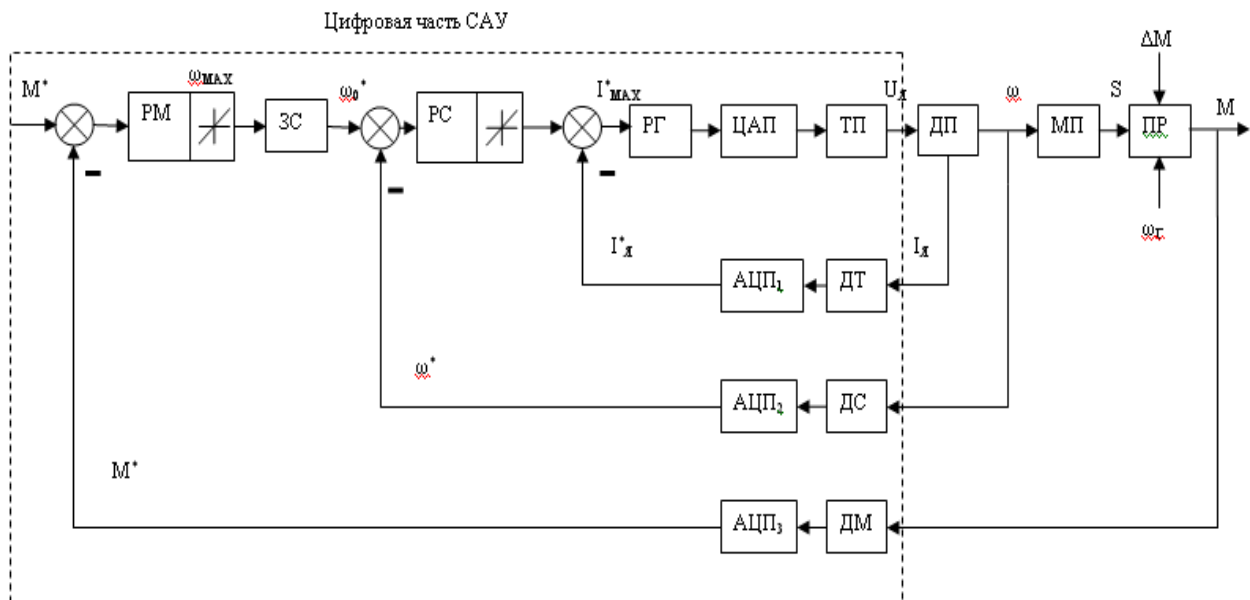
РТ и РС ЭПП настраиваются на технический оптимум по известной методике [1,4,6]. РТН настраивается по условию обеспечения нулевой статической ошибки в контуре стабилизации температуры нагрева.

#### 3.5.3.3. Разработка блок-схемы алгоритма

Производится согласно п.п. 3.1.3.3., 3.1.3.4

### 3.6. Система стабилизации момента резания металлорежущего станка

#### 3.6.1. Функциональная схема САУ



**Рис. 3.6. Функциональная схема САУ**

ПР – процесс резания; МП – механизм подачи; ДП – двигатель подачи; ТП – тиристорный преобразователь; ДТ, ДС, ДМ – датчики тока, скорости, момента резания; РТ, РС, РМ – регуляторы тока, скорости, момента; ЦАП, АЦП – цифро-аналоговый и аналого-цифровые преобразователи;  $\omega_r$  – угловая частота вращения главного привода;  $\Delta M$  – возмущения по моменту резания; ЗС – задатчик скорости подачи; ТП – тиристорный преобразователь

Заданное значение  $M_0^*$  момента резания стабилизируется путем изменения скорости подачи  $S$  в пределах  $0 < S < S_{\max}$ , где  $S_{\max}$  – максимальная подача для данного режима резания, пропорциональная уровню  $\omega_s^*$  устанавливаемого ЗС. Контуры тока и скорости настраиваются на технический оптимум; контур стабилизации момента резания выбирается астатическим с РМ интегрального типа. Постоянная времени РМ выбирается из условия не отработки периодических возмущений амплитудой  $\Delta M$  и частотой  $\omega_r$  по заданному значению неравномерности скорости  $\Delta S/S$ .

### 3.6.2. Исходные данные

Таблица 3.6

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Электродвигатель					
$U_{ян}, В$	110	120	160	180	200
$\omega_n, с^{-1}$	157	157	105	105	105
$P_n, кВт$	2	3	4	4	5
$\eta_{эп}$	0,82	0,82	0,83	0,83	0,85
Фазность тиристорного преобразователя, $m$	3	3	6	6	6
Коэффициент механической передачи $K_{мп}, м$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Процесс резания					
$M_0, нм$	1000	2000	3000	3200	3600
$\Delta M, нм$	250	500	500	600	800
$K_{пр}, нс \cdot 10^4$	5	10	15	15	15
$K_n = \Delta S/S$ , не более	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05
$\omega_r, с^{-1}$	15	12	10	8	6

### 3.6.3. Методические указания

#### 3.6.3.1. Определение параметров САУ

Параметры электродвигателя и тиристорного преобразователя выбираются аналогично п.3.1.3.1.

Параметры процесса резания определяются следующим образом:

Скорость быстрого хода станка:

$$S_{бх} = \omega_n \cdot K_{мп}. \quad (3.57)$$

Расчетная скорость резания:

$$S_p = M_0 / K_{пр}. \quad (3.58)$$

Амплитуда колебаний скорости подачи при «идеальной» обработке возмущения  $\Delta M$ :

$$\Delta S_v = \Delta M / K_{пр}. \quad (3.59)$$

Требуемая амплитуда колебаний скорости подачи по условию неравномерности:

$$\Delta S_{тр} = S_p \cdot K_n. \quad (3.60)$$

Коэффициент ослабления колебаний в замкнутой скорости САУ на частоте возмущения  $\omega_r$ :

$$K_{тр} = \Delta S_{тр} / \Delta S_v. \quad (3.61)$$

Передаточная функция ПР представляется аperiодическим звеном с постоянной времени:

$$T_{пр} = 2\pi / \omega_r. \quad (3.62)$$

### 3.6.3.2. Определение параметров РТ, РС

Аналогично п.3.1.3.2.

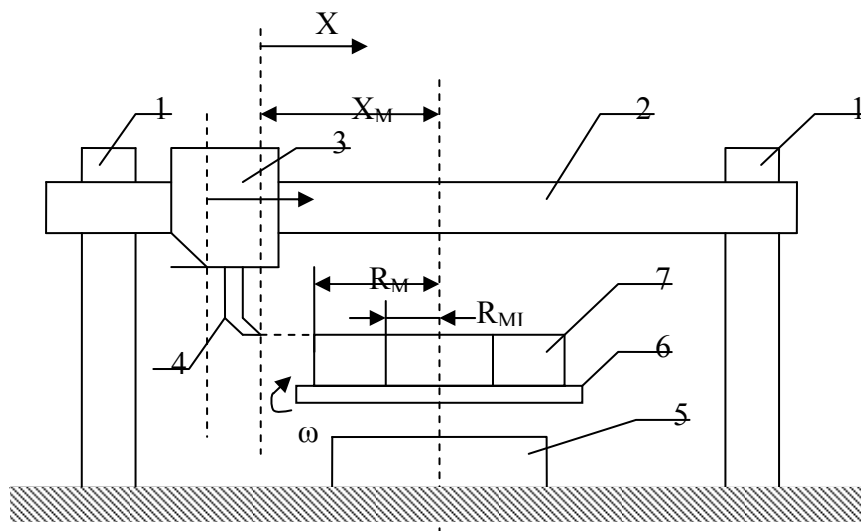
Постоянная времени интегрального РМ выбирается по контрольной точке желаемой ЛАХЧ разомкнутой САУ:  $\omega = \omega_r$ ,  $W_{раз}(\omega_r) = K_{тр}$ .

### 3.6.3.3. Разработка блок-схемы алгоритма функционирования цифровых регуляторов

Аналогично п.3.1.3.3.

## 3.7. Система стабилизации скорости резания токарно-карусельного станка

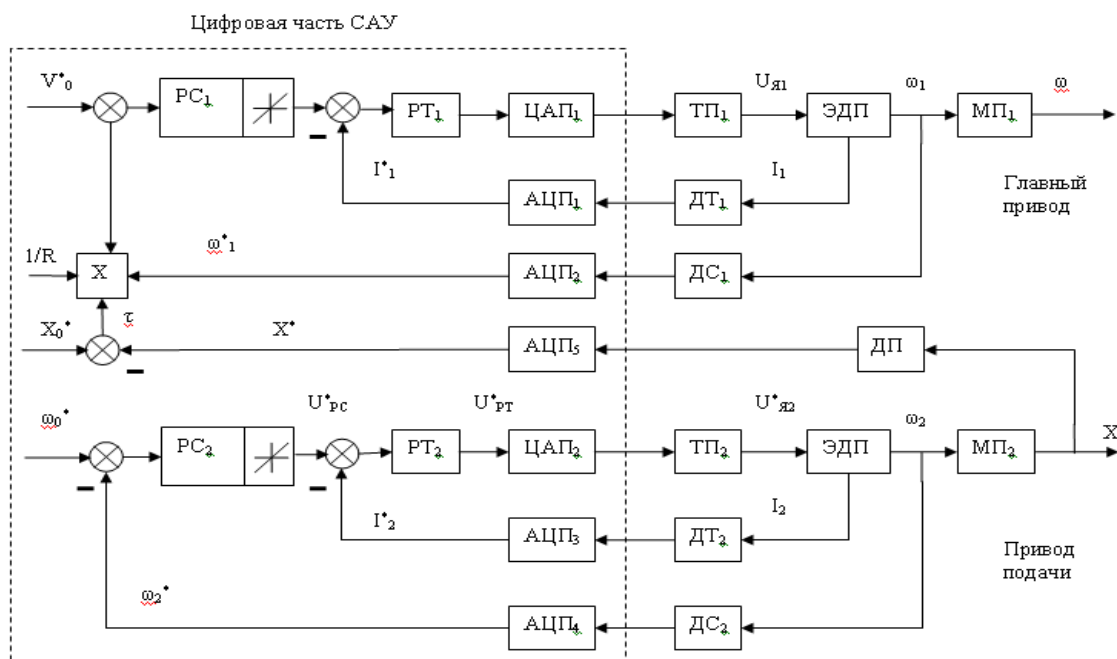
### 3.7.1. Функциональная схема САУ



**Рис. 3.7а. Общий вид токарно-карусельного станка**

1 – стойка, 2 – поперечины, 3 – суппорт, 4 – резец, 5 – станина, 6 – планшайба, 7 – деталь





**Рис. 3.76. Функциональная схема САУ**

ЭГД, ЭДП – электродвигатели главного движения и подачи; МП<sub>1</sub> – редуктор главного привода; МП<sub>2</sub> – механизм подачи; ТП – тиристорные преобразователи; ДТ, ДС, ДП – датчики тока, скорости и положения суппорта станка; РТ, РС – регуляторы тока, скорости; АЦП, ЦАП – аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;  $V_0^*$  – заданное значение скорости резания;  $X_{0\max}^*$  – координата крайнего положения суппорта;  $X^*$  – текущая координата от начала отсчета  $X = X_{\max} \cdot R_{\max, \min}$ ,  $r$  – максимальный, минимальный и текущий радиус обработки.

В начале обработки суппорт из исходного положения  $X=0$ , соответствующего крайнему положению суппорта  $X_{\max}$  от центра станка, движется со скоростью подачи  $S_x = dx/dt$  на деталь. При  $X = X_{\max} - R$  происходит врезание резца в деталь. Для заданного значения скорости резания  $V = V_0$  угловая скорость вращения планшайбы при этом  $\omega_1 = V_0/R$ . По мере уменьшения радиуса  $r$  обработки происходит увеличение частоты вращения  $\omega_1 = V_0/R$  вследствие уменьшения коэффициента обратной связи  $K_{oc} = K_{дс1} \cdot r/R$ ; скорость резания при этом сохраняется неизменной  $V = V_0$ .

### 3.7.2. Исходные данные

Таблица 3.7

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Радиус обработки $R_{\max}$ , м $R_{\min}$ , м Максимальный обрабатываемый размер $X_{\max}$ , м Скорость резания $V_0$ , м/мин Рабочая скорость подачи $S_x$ , мм/мин	1 0,25 1,5 60 100	1,5 0,5 2 54 120	2 0,5 2,5 46 150	2,5 0,5 3 48 170	3 0,6 3,5 42 200
Электропривод подачи $U_{я2}$ , В $\omega_{н2}$ , с <sup>-1</sup> $P_{н2}$ , кВт $\eta_2$ Фазность ТП <sub>2</sub> , $m_2$ $J_2$ , кг·м <sup>2</sup>	110 52,5 2 0,82 2 0,05	110 52,5 2,5 0,82 3 0,06	140 105 2,8 0,84 3 0,06	150 105 3,5 0,85 6 0,07	180 157 4 0,86 6 0,08
Электропривод главного движения $U_{я1}$ , В $\omega_{н1}$ , с <sup>-1</sup> $P_{н1}$ , кВт $\eta_1$ Фазность ТП <sub>1</sub> , $m_1$ $J_1$ , кг·м <sup>2</sup>	220 52,5 15 0,84 3 0,4	220 52,5 18 0,84 3 0,6	440 52,5 21 0,85 6 0,9	440 105 24 0,86 6 1,2	440 105 30 0,87 6 1,5
Передаточное число редуктора главного привода, $i$	12	25	30	60	85
Коэффициент механической передачи привода подачи $K_{мп}$ , м	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$

### 3.7.3. Методические указания

#### 3.7.3.1. Определение параметров приводов подачи и главного движения

Аналогично п.3.1.3.1.

Расчетные значения установок  $\omega_0^*$  и  $V_0^*$  определяются следующим образом.

Скорость быстрого хода подачи:

$$S_{x \max} = \omega_{н2} \cdot K_{мп}. \quad (3.63)$$

Этой скорости соответствует максимальное значение сигнала ДС<sub>2</sub> U<sub>дс2</sub>=10 В и АЦП<sub>4</sub>  $\omega_{2 \max}^* = 2^{12} = 4096$  дискр. Следовательно, для рабочего значения подачи S<sub>x</sub>

$$\omega_0^* = \omega_{2 \max}^* \cdot (S_x / S_{x \max}). \quad (3.64)$$

Максимальное значение угловой частоты вращения планшайбы:

$$\omega_{1 \max} = \omega_{1H} / I. \quad (3.65)$$

Минимальное значение угловой частоты вращения планшайбы:

$$\omega_{1 \min} = V / 60R. \quad (3.66)$$

Скорости  $\omega_{1 \max}$  соответствует максимальное значение ДС<sub>1</sub> U<sub>дс1</sub>=10 В и АЦП<sub>1</sub>  $\omega_{1 \max}^* = 2^{12} = 4096$  дискр. Следовательно  $\omega_{1 \min}^* = \omega_{1 \max}^* \cdot (\omega_{1 \min} / \omega_{1 \max})$ . Т.к. при  $\omega_{1 \min}$  отношение r/R=1, то  $V_0^* = \omega_{1 \min}^*$ .

### **3.7.3.2. Определение параметров регуляторов**

Аналогично п.3.1.3.2.

### **3.7.3.3. Составление уравнений САУ и блок-схемы алгоритма**

Согласно п.3.1.3.3.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, М. П. Инжиниринг автоматизированного электропривода / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Раесудов. – М. : АСАДЕМА, 2006. – 486 с.
2. Капуцнов, Ю. Д. Электрооборудование и электропривод промышленных установок / Ю. Д. Капуцнов, В. А. Елисеев, Л. А. Ильяшенко. – М. : Высшая школа, 1979. – 359 с.
3. Коробко, А. В. Проектирование электротехнических устройств: учебное пособие / А. В. Коробко. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 96 с.
4. Справочник по автоматизированному электроприводу / под редакцией В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 535 с.
5. Справочник по монтажу электроустановок промышленных предприятий / под редакцией В. В. Белоцерковского. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – кн. 1,2.
6. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под редакцией В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л.Самовера. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 682 с.
7. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов: методические указания к курсовому проектированию / А. В. Коробко. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 84 с.