

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению курсового проекта по дисциплине

"Автоматизированный электропривод"

для студентов специальности 151

Краматорск 2016

УДК 075.8

Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине "Автоматизированный электропривод" для студентов специальности 151 / Сост. О.В. Субботин. – Краматорск: ДГМА, 2016. – 84 с.

Приведены основные положения по расчету статических и динамических режимов, а также проектированию и моделированию автоматизированного электропривода станочного оборудования с аналоговой системой управления.

Составитель

О.В. Субботин, к.т.н., доцент

Отв. за выпуск

О.В. Субботин, к.т.н., доцент

## СОДЕРЖАНИЕ

1 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	5
1.1 Требования, предъявляемые к оформлению расчетно– пояснительной записки	5
1.2 Требования, предъявляемые к графической части проекта	6
1.3 Рекомендуемые обозначения основных величин	6
2 ЗАДАНИЕ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	8
2.1 Содержание расчетно-пояснительной записки	8
2.2 Содержание графической части проекта	9
2.3 Варианты заданий (исходные данные) для проектирования	10
3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	12
3.1 Введение. Общие сведения об электроприводах	12
3.2 Расчет и выбор источника питания на базе комплектного ТП	19
3.2.1 Расчет и выбор силового трансформатора	24
3.2.2 Расчет и выбор тиристорov для силовых вентильных блоков	25
3.2.3 Определение параметров якорной цепи электропривода	25
3.2.4 Построение статических характеристик ТП	28
3.2.5 Выбор и описание комплектного ТП	30
3.3 Статические режимы работы САУ ЭП	30
3.3.1 Построение электромеханических характеристик двигателя при питании от сети и от ТП в разомкнутой системе	30
3.3.2 Построение электромеханической характеристики РЭП в замкнутой системе	36
3.3.3 Расчет входного контура (задатчика интенсивности)	43
3.3.4 Расчет и выбор нелинейных звеньев контуров скорости и тока	45
3.3.5 Расчет регулятора положения и выбор датчика	49
3.4 Динамика САУ РЭП (СЭП)	50
3.4.1 Структурная оптимизация САУ ЭП	51
3.4.2 Составление структурной схемы в соответствии с полученным по-	

рядком астатизма	51
3.4.3 Расчет переходных процессов в РЭП [ $\omega(t)$ , $i(t)$ ] и в СЭП [ $\omega(t)$ , $\varphi(t)$ или $l(t)$ ]	53
3.4.4 Составление дифференциальных уравнений в форме Коши и уравнений связи	54
3.4.5 Составление таблицы исходных данных для моделирования динамики САУ ЭП	55
3.4.6 Оценка качества регулирования в различных режимах работы	58
3.5 Проектирование средств сопряжения ЭП и системы управления	60
3.5.1 Выбор импульсных (цифровых) датчиков скорости, положения	60
3.5.2 Выбор средств сопряжения измерительных преобразователей (ИП) с микропроцессорной системой (МПС)	60
3.6 Заключение	62
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	63
Приложение А. Образец титульного листа и штампа	65
Приложение Б (справочное). Технические характеристики электродвигателей по- стоянного тока типа ПН	66
Приложение В (справочное). Технические характеристики электродвигателя по- стоянного тока серии ПБСТ	69
Приложение Г (справочное). Технические характеристики согласующих транс- форматоров	70
Приложение Д (справочное). Технические характеристики тахогенераторов	71
Приложение Е (справочное). Технические характеристики измерительных преоб- разователей положения	72
Приложение Ж (справочное). Технические характеристики цифровых и аналого- вых преобразователей ЦАП и АЦП	73
Приложение И (справочное). Технические характеристики электронных компонентов	76
Приложение К. Пример структурной оптимизации САУ ЭП	79

# 1 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

## 1.1 Требования, предъявляемые к оформлению расчетно–пояснительной записки

Текст записки пишется чернилами или шариковой ручкой фиолетового или синего цвета на одной стороне листа бумаги формата 210x297 мм с полями 25...30 мм слева и 10...15 мм справа. Все расчеты выполняются с соблюдением СИ. Принятые обозначения величин должны соблюдаться во всей работе. Иллюстративные материалы, схемы, таблицы должны иметь подписи, сквозную нумерацию и выполняться с соблюдением требований ГОСТ 2.105-95.

Расчетные формулы вначале записываются в буквенных выражениях, затем делается расшифровка каждого буквенного обозначения, если оно вводится впервые, и приводится единица величины, после чего производятся вычисления. Полученный результат также дается с единицей величины. Если по одной и той же формуле производится ряд вычислений, достаточно продемонстрировать 2...3 вычисления, а результаты остальных расчетов свести в таблицу. Все расчеты необходимо сопровождать краткими пояснениями.

Построенные характеристики, графики, кривые переходных процессов нужно размещать в тех местах, где производятся вычисления их параметров.

Каждый раздел должен выделяться заголовком и начинаться с нового листа.

Рекомендуется следующий порядок расположения материала в записке: титульный лист (приложение А), задание с исходными данными, реферат, содержание, введение, основной материал, заключение, литература и приложения.

На первой странице записки размещается штамп, форма и размеры которого приведены в приложении А.

Готовая записка сброшюровывается в обложке из плотной бумаги. Объем пояснительной записки 60...65 листов рукописного текста. Допускается выполнение курсового проекта в печатном виде. В этом случае предоставляется для проверки твердая копия проекта с исходным электронным вариантом.

## 1.2 Требования, предъявляемые к графической части проекта

Изображаемые чертежи, схемы, графики должны выполняться в строгом соответствии с требованиями ГОСТа, а также в соответствии с методическими указаниями по дипломному проектированию для студентов специальности 7.092501[23].

Графические построения нагрузочных диаграмм, характеристик, кривых переходных процессов необходимо выполнять в осях координат 160x200 мм (размер одного квадранта) с нанесенной масштабной сеткой. Каждый лист должен иметь штамп.

## 1.3 Рекомендуемые обозначения основных величин

$U, u$  - напряжение, В

$I, i$  - ток, А

$M$  - момент силы, Н·м

$P$  - мощность, кВт

$KФ$  - конструктивный коэффициент двигателя, В·с

$E, e$  - электродвижущая сила, В

$R, r$  - активное сопротивление, Ом

$X, x$  - индуктивное сопротивление, Ом

$\Omega$  - угловая скорость вращения, с<sup>-1</sup>

$n$  - частота вращения, об/мин

$J$  - момент инерции, кг·м<sup>2</sup>

$U$  - передаточное число от двигателя к механизму

$S$  - подача, мм/об

$T$  - время, с

$T_{\text{Э}}$  - постоянная времени электромагнитная, с

$T_{\text{М}}$  - постоянная времени механическая, с

$D$  - диапазон регулирования

$K_{\text{с}}$  - коэффициент обратной связи по скорости, В/с<sup>-1</sup>

- К<sub>т</sub> - коэффициент обратной связи по току, В/А
- К<sub>п</sub> - коэффициент обратной связи по положению, В/мм
- $\delta_z$  - заданная погрешность, %
- $\varepsilon$  - заданное угловое ускорение, рад/с<sup>2</sup>
- $\nu$  - порядок астатизма
- E<sub>d</sub> - ЭДС тиристорного преобразователя, В
- U<sub>d</sub> - напряжение на выходе преобразователя под нагрузкой, В
- $\alpha_p$  - угол регулирования (открывания, запаздывания) в ТП, эл.град.
- K<sub>рс.необх</sub> - необходимый коэффициент усиления в разомкнутой САУ
- K<sub>с.необ</sub> - необходимый коэффициент усиления обратной связи по скорости
- $\sigma_{СТ}$  - статическая погрешность, %
- $\sigma_{ДИН}$  - динамическая погрешность, %
- U<sub>з.рэп</sub> - напряжение задания в регулируемом электроприводе, В
- U<sub>з.сэп</sub> - напряжение задания в следящем электроприводе, В
- T<sub>0</sub> - дискретное время регулирования в цифровом электроприводе, с
- ЭП - электропривод
- РЭП - регулируемый электропривод
- СЭП - следящий электропривод
- ЦЭП - цифровой электропривод

## 2 ЗАДАНИЕ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 2.1 Содержание расчетно-пояснительной записки

Содержание расчетно-пояснительной записки определяется заданием и предусматривает наличие следующих разделов.

Введение. Краткое описание работы привода заданного узла станка, обзор существующих систем электроприводов, основные требования к системам управления электроприводов (ЭП). Исходные данные.

1 Расчет и выбор источника питания для ЭП на базе комплектного тиристорного преобразователя (ТП).

1.1 Расчет и выбор силового трансформатора.

1.2 Расчет и выбор тиристорных силовых вентильных блоков комплектного ТП. Выбор схемы соединения вентильных блоков.

1.3 Определение параметров якорной цепи электропривода.

1.4 Построение статических характеристик ТП.

1.5 Выбор и краткое описание комплектного ТП.

2 Статические режимы работы САУ ЭП.

2.1 Построение естественной электромеханической характеристики (при питании от сети), характеристики в разомкнутой системе (при питании от ТП)

2.2 Составление расчетной функциональной схемы РЭП и определение входных параметров: необходимых коэффициентов передачи разомкнутой системы ( $K_{рс.необх}$ ), коэффициентов передачи регуляторов скорости и тока ( $K_{р.с}$ ,  $K_{р.т}$ ), коэффициентов передачи обратной связи по скорости ( $K_{с.необх}$ ).

2.3 Расчет входного контура (задатчика интенсивности).

2.4 Построение упорной электромеханической характеристики РЭП в замкнутой системе.

2.5 Расчет и выбор регуляторов скорости и тока и их нелинейных звеньев.

3 Динамика САУ РЭП (СЭП).

3.1 Синтез САУ ЭП.

- 3.1.1 Оптимизация контуров управления в САУ ЭП.
  - 3.1.2 Составление структурной схемы ЭП.
  - 3.2 Расчет переходных процессов в РЭП ( $\omega(t), i(t)$ ), СЭП ( $\omega(t), i(t)$ ).
    - 3.2.1 Составление дифференциальных уравнений в форме Коши и уравнений связи.
    - 3.2.2 Построение переходного процесса в РЭП (СЭП).
    - 3.2.3 Расчет и выбор датчика положения и регулятора положения.
  - 3.3 Оценка качества регулирования в различных режимах работы.
  - 4 Проектирование средств сопряжения электропривода с системой управления.
    - Выбор импульсных или цифровых датчиков скорости, положения.
    - Проектирование средств сопряжения микропроцессора (МП) с измерительными преобразователями (ИП) и исполнительными органами.
- Выводы.
- Перечень ссылок.
- Приложения.

## **2.2 Содержание графической части проекта**

Графическая часть курсового проекта состоит из четырех листов формата А1. На листы рекомендуется выносить следующий материал:

Лист 1. Статика.

- 1 Кинематика РЭП (СЭП).
- 2 Характеристики ТП [ $Ed(\alpha), Ud(\alpha), Ud(Uy), \alpha(Uy)$ ].
- 3 Статические электромеханические характеристики: естественная и при питании от ТП в разомкнутой САУ.
- 4 Статическая упорная электромеханическая характеристика и ее оценка.

Лист 2. Динамика.

- 1 Структурная схема двухконтурной аналоговой САУ в соответствии с порядком астатизма (РЭП) или структурная схема трехконтурной аналоговой САУ в соответствии с порядком астатизма (СЭП).
- 2 Кривые переходного процесса по  $\omega(t)$ ,  $i(t)$  для РЭП во всех режимах или

кривые переходного процесса по  $i(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $l(t)$  для СЭП.

Лист 3. Схемная реализация электропривода.

Принципиальная (функциональная) схема РЭП (СЭП) с сопряжением с системой управления.

Лист 4. Алгоритмическое обеспечение.

Алгоритмическое обеспечение работы спроектированного РЭП (СЭП).

### 2.3 Варианты заданий (исходные данные) для проектирования

Варианты заданий для СЭП и РЭП приведены в таблицах 1 и 2.

Исходные данные по электродвигателям следует скорректировать по техническим характеристикам электродвигателей, приведенных в приложениях Б и В.

Таблица 1 – Исходные данные для проектирования СЭП

Вариант	Параметры двигателя								Привед. момент инерц. $\sum J_i$	Вид схемы ТП (рис.4)	Диап. регул. скор. D	Доп. угл. ускор. $\varepsilon, c^{-2}$	$\sigma_{РЭП},$ %	$\sigma_{СЭП},$ %
	$P_n,$ кВт	$I_n,$ А	$n_n,$ об/мин	$U_n,$ В	КПД, %	$R_{я},$ Ом	$R_{дп}/R_{ш},$ Ом	$J_{дв},$ Ом						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,5	10,5	1060	220	76,5	1,08	0,915	0,047	3,5J <sub>д</sub>	а	80	2200	7,0	1,5
2	2	12,1	750	220	80,0	1,7	1,26	0,037	3,5J <sub>д</sub>	б	70	2100	7,5	1,5
3	3,2	19	750	220	80,5	1,1	0,04/181	0,1	3,5J <sub>д</sub>	в	30	1800	8,5	1,2
4	1,5	9,2	1500	220	81	2,92	0,05/242	0,03	3,5J <sub>д</sub>	г	70	2200	10	1,2
5	1,5	9,3	1000	220	82	2,9	0,11/280	0,04	3,5J <sub>д</sub>	д	80	2300	9,0	1,0
6	1,6	9,5	750	220	76,5	1,04	0,015	0,038	3,5J <sub>д</sub>	е	90	2300	7	1,4
7	3,0	17,1	1000	220	74	0,90	0,602	0,037	3,5J <sub>д</sub>	ж	30	1700	10	1,1
8	3,0	18,4	1060	220	78	1,04	0,03/198	0,04	3,5J <sub>д</sub>	з	40	1900	9,5	1,3
9	2,2	13,6	1500	220	79	1,91	0,05/168	0,09	3,5J <sub>д</sub>	а	60	2100	11	1,2
10	3	16,9	1000	220	75,5	0,88	0,64	0,047	3,5J <sub>д</sub>	б	40	1800	9	1,2
11	5	28,6	1000	220	75,5	0,75	0,6	0,7	3,5J <sub>д</sub>	в	60	1900	10	1,1
12	1	6,55	1300	220	75	1,66	0,85	0,012	3,5J <sub>д</sub>	г	25	1900	10,	0,8
13	1,1	6,81	1500	220	76	2,27	1,57	0,012	3,5J <sub>д</sub>	д	90	1800	10	0,9
14	1,6	9,4	750	220	68,5	1,88	1,59	0,018	3,5J <sub>д</sub>	е	41	1750	8,4	1,1
15	2,5	13,6	800	220	69,5	0,60	0,526	0,104	3,5J <sub>д</sub>	ж	180	1900	9,5	1,3
16	1,5	10,5	1500	220	77	1,0	0,9	0,047	3,5J <sub>д</sub>	з	70	2000	10	1,1
17	2,0	12,1	1000	220	80	1,7	1,2	0,037	3,5J <sub>д</sub>	а	50	1900	9,5	1,0
18	1,6	9,5	1500	220	82	1,04	0,8	0,04	3,5J <sub>д</sub>	б	30	2000	9	0,9
19	2,2	13,6	750	220	79	1,9	0,7	0,04	3,5J <sub>д</sub>	в	40	2200	9,5	1,0
20	1,6	9,5	1500	220	82	1,04	0,8	0,1	3,5J <sub>д</sub>	г	40	2000	9	1,5
21	1,5	9,2	1000	220	83	0,9	0,7	0,09	3,5J <sub>д</sub>	д	50	1900	9,2	1,2
22	2,0	12,1	1000	220	84	1,7	1,26	0,04	3,5J <sub>д</sub>	е	45	1800	9,3	1,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
23	1,0	5,6	750	220	79	1,6	0,85	0,04	3,5J <sub>д</sub>	ж	50	1900	9	1,0
24	1,1	6,8	1000	220	80	2,27	1,57	0,2	3,5J <sub>д</sub>	з	55	1800	8,5	1,5
25	3,2	18,4	1500	220	74	1,04	0,09	0,4	3,5J <sub>д</sub>	а	45	2100	10	1,0
26	3,0	17,1	1000	220	79	0,9	0,6	0,3	3,5J <sub>д</sub>	б	56	2000	10	1,0
27	5,0	28,6	1000	220	80	0,75	0,6	0,3	3,5J <sub>д</sub>	в	50	2100	11	1,2
28	1,5	9,3	1000	220	81	2,9	0,11	0,4	3,5J <sub>д</sub>	г	56	2000	10	1,1
29	1,5	10,5	750	220	80	1,2	0,85	0,2	3,5J <sub>д</sub>	д	48	2200	10	1,0
30	5,6	30,4	1500	220	85	0,32	0,21	0,1	3,5J <sub>д</sub>	е	40	1950	7,5	1,2

Таблица 2 – Исходные данные для проектирования РЭП

Вариант	Параметры двигателя								Привед. момент инерц. $\sum J_i$	Вид схемы ТП (рис.4)	Диап. регули- рова- ния, D	Доп.угл. ускорен. $\varepsilon, c^{-2}$	Доп. статич. погр.
	P <sub>н</sub> , кВт	I <sub>н</sub> , А	n <sub>н</sub> , об/мин	U <sub>н</sub> , В	КПД, %	R <sub>я</sub> , Ом	R <sub>дп</sub> , Ом	J <sub>дв</sub> , Ом					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	7,5	40	750	220	77	0,26	0,2	0,525	3,5J <sub>д</sub>	ж	36	2500	9,5
2	4,5	26	750	220	79	0,76	0,25	0,14	3,5J <sub>д</sub>	з	26	800	8
3	8	43,5	1500	220	81	0,27	0,2	0,1	3,5J <sub>д</sub>	а	40	1900	9
4	6	32,6	1000	220	85	0,494	0,02	0,14	3,5J <sub>д</sub>	б	44	2800	10
5	9	50	750	220	76,5	0,286	0,206	0,2	3,5J <sub>д</sub>	в	34	1700	8
6	8,8	40	1500	220	79	0,78	0,04	0,045	3,5J <sub>д</sub>	г	18	800	8
7	7,1	39	1000	220	83	0,181	0,122	0,3	3,5J <sub>д</sub>	д	21	1050	10,5
8	11	56	800	220	84	0,125	0,08	0,3	3,5J <sub>д</sub>	е	36	2100	8
9	11	57	800	220	81	0,125	0,08	0,3	3,5J <sub>д</sub>	ж	15	750	7,5
10	9	41	1500	220	83	0,181	0,121	0,2	3,5J <sub>д</sub>	з	18	800	9,5
11	8,5	44,5	800	220	82	0,18	0,116	0,2	3,5J <sub>д</sub>	а	49	2950	9,5
12	5	28,6	1000	220	79	0,39	0,204	0,084	3,5J <sub>д</sub>	б	21	900	10,5
13	4	21,8	1500	220	79	0,384	0,236	0,2	3,5J <sub>д</sub>	в	18	1100	8,5
14	4,2	22,2	750	220	81,5	0,378	0,263	0,2	3,5J <sub>д</sub>	г	15	1050	9
15	5,3	27,4	1500	220	85,5	0,216	0,175	0,221	3,5J <sub>д</sub>	д	19	950	10
16	7,1	36,3	1000	220	86,5	0,15	0,1	0,25	3,5J <sub>д</sub>	е	16	800	9,5
17	4,5	23,4	1500	220	83,5	0,338	0,221	0,21	3,5J <sub>д</sub>	ж	15	1000	9,5
18	3,2	16,9	1000	220	82,5	0,49	0,364	0,19	3,5J <sub>д</sub>	з	24	950	7,5
19	2,2	13,3	1000	220	83	1,75	0,22	0,05	3,5J <sub>д</sub>	а	19	2000	9,4
20	8,0	49,2	600	220	80	0,753	0,1	0,67	3,5J <sub>д</sub>	б	21	950	9,5
21	8,0	43	1000	220	82	0,328	0,27	0,16	3,5J <sub>д</sub>	в	19	880	8,5
22	6,6	33,5	750	220	80	0,591	0,16	0,530	3,5J <sub>д</sub>	г	23	1050	10,5
23	4,5	26	750	220	80	0,1	0,632	0,14	3,5J <sub>д</sub>	д	20	1000	10
24	10,0	38	1000	220	81	0,337	0,018	0,4	3,5J <sub>д</sub>	е	19	1000	9,5
25	3,8	25,4	1500	220	83	0,78	0,039	0,43	3,5J <sub>д</sub>	ж	20	800	10
26	0,7	4,3	1500	220	80	6,73	0,274	0,01	3,5J <sub>д</sub>	з	20	800	9,5
27	1,0	5,9	1000	220	80	4,17	0,274	0,01	3,5J <sub>д</sub>	а	20	800	10
28	6,0	33,2	1000	220	81	0,47	0,008	0,08	3,5J <sub>д</sub>	б	18	1000	10,5

## **3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

### **3.1 Введение. Общие сведения об электроприводах**

При выполнении этого раздела необходимо описать технологию работы заданного узла станка и конкретизировать требования к автоматизированному электроприводу, произвести обзор существующих электроприводов, с помощью которых можно решить поставленную задачу, остановиться на двух-трех вариантах и после тщательного анализа их особенностей выбрать наиболее оптимальный.

В зависимости от назначения различают приводы главного движения, подач и вспомогательные приводы [5,7].

Главный привод обеспечивает непосредственно процесс резания (рис. 1).

Приводы подачи осуществляют перемещение заготовки или режущего инструмента в зоне резания.

Вспомогательные приводы обеспечивают вспомогательные перемещения заготовок, деталей, режущего инструмента, вращение инструментальных механизмов, поворотных и наклонных столов, движение палет, тележек, перегружателей, подачу СОЖ и смазки, вентиляцию и т.д.

В соответствии с назначением к каждому приводу предъявляются различные конкретные требования.

Главный привод (рис. 3) должен регулироваться при постоянной мощности ( $P=\text{const}$ ), так как силовое резание выполняется при меньших частотах вращения шпинделя, а чистовая обработка с меньшими усилиями резания - при высоких частотах. Анализ технологических режимов станков различных групп показывает, что диапазон регулирования частот вращения шпинделя не превышает  $D=100$ . При наличии режима ориентации шпинделя диапазон расширяется до  $D>1000$ . Однако требуемая мощность привода при ориентации незначительна и существенно меньше мощности резания. В механизмах главного движения (даже там, где применяются регулируемые электроприводы) в большинстве станки имеют двух-, трехступенчатые коробки скоростей.

Привод подач должен регулироваться при постоянном моменте ( $M=\text{const}$ )

(рис. 2). В механизмах подачи основное усилие затрачивается на преодоление сил трения при перемещении узла станка. Приводы подачи должны обеспечивать сверхширокий диапазон регулирования ( $D > 10000$ ), так как в станках с ЧПУ минимальная подача определяется дискретностью управления и обратной связи.

Только при обработке приводом каждой дискреты могут быть обеспечены высокая точность и малая шероховатость при обработке. Кроме того, приводы подачи должны иметь высокие скорости быстрого хода и высокое быстродействие при разгоне - торможении и при сбросе - набросе нагрузки.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $D$  - электродвигатель,  $d_{х.в}$  - диаметр ходового винта,  $G_d$  - вес детали,  $G_{ст}$  - вес стола,  $V_{п}$  - скорость подачи,  $D_p$  - диаметр растачиваемого отверстия,  $n_{шп}$  - частота вращения шпинделя.

Вспомогательные приводы не участвуют в процессе резания. В этих приводах не требуется широкого диапазона регулирования ( $D < 10$ ), не всегда должно достигаться высокое быстродействие, часто необходимы плавный разгон и торможение.

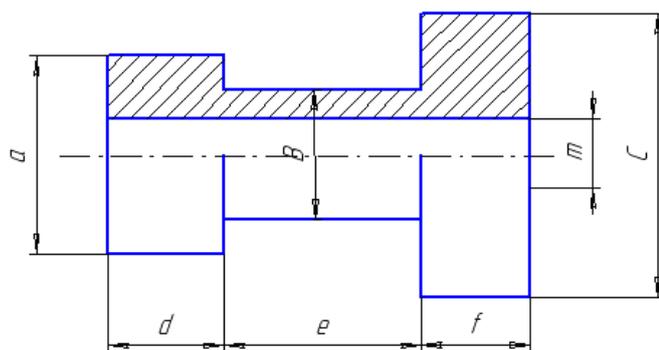


Рисунок 1 – Эскиз обрабатываемой детали

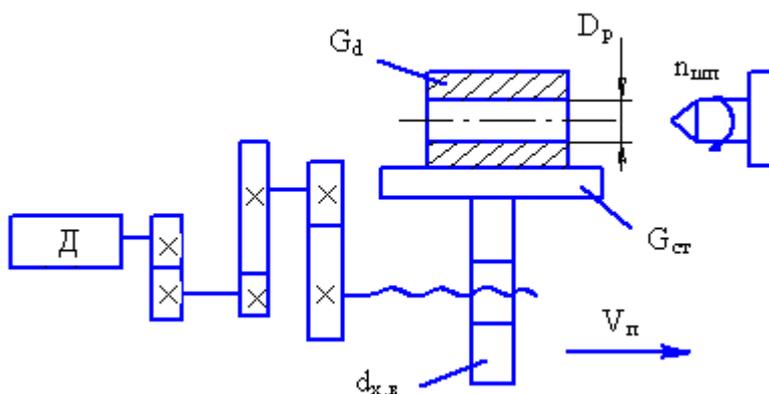


Рисунок 2 – Кинематика СЭП

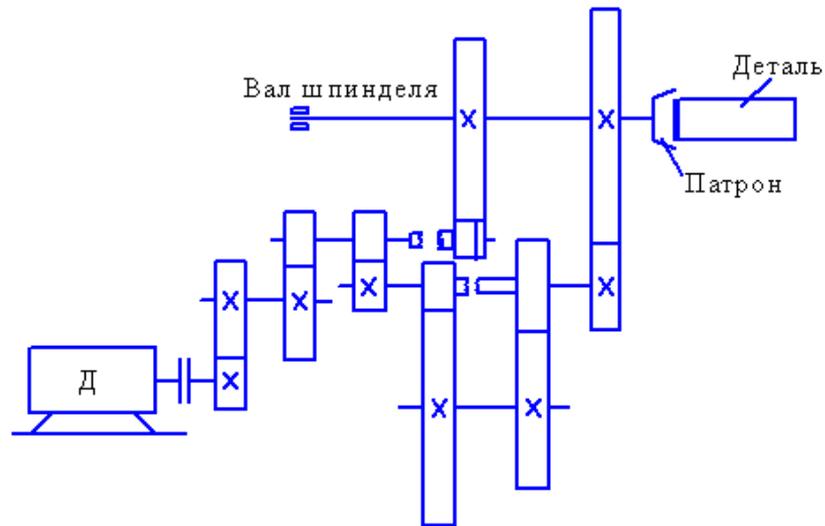


Рисунок 3 – Кинематика РЭП

В поворотных устройствах (магазинах, столах) с большим собственным моментом инерции и невысоким передаточным отношением, когда приведенный к валу двигателя момент инерции механизма значительно превышает собственный момент инерции двигателя, основное усилие затрачивается в переходных режимах на разгон и торможение маховых масс. При установившемся движении нагрузка на привод близка к холостому ходу. Режим работы вспомогательных приводов, как правило, повторно-кратковременный.

Расширение технологических режимов обработки на одном станке с использованием современного режущего инструмента привело к усложнению установленных электроприводов, увеличению установленной мощности двигателя главного движения, вращающих моментов двигателей подач, расширению диапазона регулирования скорости главного привода, рабочих подач и установочных перемещений, увеличению быстродействия всех приводов при управляющем и возмущающем воздействиях, ужесточению требований к стабильности и равномерности вращения электродвигателей всех приводов.

Требование повышения производительности также привело: к увеличению мощности и максимальной скорости привода главного движения; к повышению скорости быстрого хода приводов подач; увеличению максимальных рабочих подач; уменьшению времени разгона и торможения, позиционирования приводов подач, вспомогательных перемещений и ориентации шпинделя.

Необходимость удовлетворения требований снижения шероховатости и повышения точности при обработке и позиционировании способствовала ужесточению требований к электроприводам относительно значений погрешностей в установившихся и переходных режимах при различных возмущающих воздействиях, расширения диапазона регулирования и увеличения чувствительности электроприводов к входному воздействию и нагрузке, относительно повышения равномерности движения, особенно при малых скоростях, увеличения быстродействия при возмущении, нагрузке и при реверсе под нагрузкой на малой скорости.

Для обеспечения повторяемости размеров деталей в обрабатываемой партии и высокой точности позиционирования необходимо иметь высокостабильный привод с высокой равномерностью перемещения и аperiodическим переходным процессом при изменении скорости.

Появление низкоскоростных высокомоментных двигателей небольших габаритов позволило существенно уменьшить механическую часть коробки подач, а в ряде случаев полностью ее убрать, установив исполнительный двигатель непосредственно на ходовой винт.

В случаях, когда двигатель не имеет коробки подач, повышается мощность механической передачи, КПД, снижается момент инерции электромеханического привода, увеличивается составляющая от резания в общей нагрузке приводов подач. В большинстве современных станков нагрузка на двигатель при рабочих подачах без резания составляет не более 20...30 % номинальной.

Рост составляющей от сил резания в общей нагрузке на привод подачи увеличил колебания нагрузки на электроприводе подачи при резании, что ужесточило требования к статической и динамической жесткости привода подачи.

Максимальная рабочая подача современных многоцелевых станков составляет 30-50 % скорости быстрых перемещений.

Скорость быстрых перемещений зависит от характеристик механической части привода, возможностей системы ЧПУ (в частности, от максимальной частоты сигнала управления приводом от системы ЧПУ), дискретности управления, максимальной угловой скорости приводного электродвигателя, коэффициента редукции передачи от двигателя к механизму и других ограничений, вносимых си-

стемой ЧПУ.

Минимальная скорость привода определяется технологическими требованиями, дискретностью управления чувствительностью электропривода. Особо высокие требования предъявляются к динамическим характеристикам привода по управляющему и возмущающему воздействиям. Неудовлетворительные динамические свойства регулируемого электропривода, особенно при возмущении по нагрузке, являются причиной повышенной шероховатости поверхности, поэтому весьма важно обеспечить высокое быстродействие привода при сбросе и набросе нагрузки, а также реверса двигателя под нагрузкой на самых малых скоростях.

Стабильность позиционирования и обработки определяется, в первую очередь, стабильностью электропривода, датчика положения и системы ЧПУ. Стабильность характеристик электропривода при достаточно большом коэффициенте усиления определяется стабильностью нуля входного усилителя регулятора и датчика скорости – тахогенератора. Наибольшая относительная нестабильность имеет место при малых скоростях, когда полезный сигнал соизмерим с дрейфом нуля усилителя и падением напряжения в щеточном контакте тахогенератора.

Другим фактором, влияющим на стабильность, а следовательно, и на идентичность параметров при обработке партии деталей, является характер переходного процесса по управляющему воздействию в замкнутых системах следящего и регулируемого электроприводов. В случае апериодического переходного процесса при движении в одну сторону лифты в механических узлах не раскрываются, а также отсутствует влияние гистерезиса, что способствует существенному повышению стабильности и точности позиционирования и обработки.

В механизмах главного движения в большинстве станков установлены регулируемые электроприводы без обратной связи по положению, в отдельных станках применяются специальные системы ориентации шпинделя от мощного двигателя главного привода или от специального маломощного двигателя со следящим приводом, аналогичным приводам подач.

Электроприводы подач подразделяются по следующим признакам:

- по способу выполнения силового преобразователя (виду силовых полупроводниковых приборов) – тиристорные на основе реверсивных управляемых вы-

прямителей, транзисторно-тиристорные на основе реверсивных широтно-импульсных преобразователей;

- по компоновке конструкции (числу приводов, выполненных в едином конструктиве) – однокоординатные, многокоординатные.

В состав электропривода подачи входят [1]:

- электродвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов со встроенным датчиком скорости, электромагнитным тормозом, датчиком температурной защиты и датчиком пути;

- полупроводниковый преобразователь, включающий силовой блок (обеспечивает преобразование напряжения переменного тока в постоянное), регуляторы (обеспечивают регулирование скорости двигателя в широком диапазоне с высокой точностью), блоки питания, защиты и диагностики;

- силовой трансформатор (автотрансформатор) для согласования напряжения питающей сети с напряжением электродвигателя, ограничения тока короткого замыкания в приводе и снижения влияния помех или токоограничивающий реактор, ограничивающий ток короткого замыкания;

- коммутационные реакторы для снижения взаимного влияния приводов при многокоординатном исполнении и питании их от одного силового трансформатора (или через токоограничивающие реакторы);

- уравнивательные или сглаживающие реакторы для ограничения уравнивательных токов при совместном управлении выпрямительной и инверторной группами тиристоров и для сглаживания пульсаций тока якоря двигателя (в результате чего обеспечивается снижение нагрева и улучшение коммутации двигателя);

- автоматический выключатель для отключения привода от сети в аварийных режимах.

Состав электропривода может меняться в зависимости от конкретного типа электропривода и способа выполнения силового преобразователя.

Питание электропривода производится от трехфазной промышленной сети переменного тока напряжением 220, 380, 440, 500В, частотой 50Гц.

Необходимо предусмотреть возможность заземления электрооборудования. Электроприводы должны обеспечивать работу при отклонениях: напряжения пи-

тающей сети – на -15... +10% номинального значения; частоты питающей сети – на -2...+2% номинального значения.

Сигнал управления, соответствующий максимальной скорости, - аналоговый, - 10...+10В.

Электроприводы снабжаются аппаратурой защиты, сигнализации, индикации рабочих и аварийных режимов и имеют следующие виды защит: от коротких замыканий; токовых перегрузок; перенапряжений; исчезновения вентиляции (в системах с принудительным охлаждением), а также от напряжения сети; неправильного чередования фаз (при необходимости).

Силовые преобразователи выполняются в одно-, двухкомплектном вариантах с питанием от одного силового трансформатора.

Наработка на отказ комплектного электропривода не менее 4000 ч. Срок службы не менее 10 лет.

Электроприводы главного движения постоянного тока классифицируются по следующим признакам:

- по способу выполнения силового преобразователя - тиристорные на основе управляемых вентилей, тиристорные (транзисторно-тиристорные) на основе широтно-импульсных преобразователей;

- по способу регулирования скорости - однозонные (изменяется напряжение на якоре электродвигателя), двухзонные (изменяется напряжение на якоре электродвигателя и ток возбуждения);

- по наличию реверса скорости электродвигателя - реверсивные, нереверсивные;

- по способу реверса - реверсивные электроприводы с реверсом тока якоря электродвигателя при питании от двухкомплектного ТП, реверсивные электроприводы с реверсом тока возбуждения электродвигателя.

Если главный привод должен работать в следящем режиме (с обратной связью по положению), то электропривод необходимо выполнять с реверсом тока якоря электродвигателя. В противном случае чувствительность электропривода при разнополярных возмущениях будет недостаточна для обеспечения устойчивости следящего привода.

В состав электропривода входят: электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов (двигатель может комплектоваться датчиком скорости, вентилятором и другими устройствами), полупроводниковый преобразователь; блок питания обмотки возбуждения двигателя; трансформатор или токоограничивающие реакторы; автоматический выключатель.

Требования к питающей сети и управлению соответствуют аналогичным требованиям с приводами подачи.

Динамическое торможение и торможение противовключением осуществляется при полном (номинальном) магнитном потоке. В процессе тормозных резисторов в обоих случаях задаются начальной скоростью и начальным тормозным моментом. Методика расчета резисторов и построения характеристик изложена в работах [1, 9, 11].

### **3.2 Расчет и выбор источника питания на базе комплектного ТП**

Однофазные схемы силовой части преобразователей используются для приводов малой мощности (1.0...1.5 кВт) с полупроводниковыми вентилями. Для приводов относительно небольшой мощности применяются также трехфазные трехпульсные схемы. Шестипульсные схемы применяются для приводов большой мощности, также в случаях, когда необходим большой диапазон регулирования скорости двигателя. Реверсивные электроприводы выполняются с одной (рис. 4, а, б, г, д, з) и двумя (рис. 4, в, ж) вентильными группами. В приводах, где допустимое время резерва составляет 0.5...2.5 с, возможно применение схемы с реверсом в цепи возбуждения (рис. 4, б, е). Недостаток этой схемы – малое быстродействие вследствие большой постоянной времени цепи возбуждения двигателя [11, 16].

Для приводов, где допустимое “мертвое” время составляет около 0,1 с и более, можно использовать схему тиристорного электропривода с реверсом в цепи якоря (см. рис. 4, г, з).

Для быстродействующих систем управления применяются схемы с двумя вентильными группами (см. рис. 4, в, ж).

В практике наибольшее распространение получила встречно-параллельная

схема соединения вентиляльных групп, так как она имеет ряд преимуществ перед другими схемами, а именно: содержит простой двухобмоточный трансформатор, который может быть применен как в реверсивном, так и в нереверсивном электроприводе, и имеет меньшую типовую мощность трансформатора по сравнению с трансформаторами в других схемах; может питаться непосредственно от трехфазной сети через анодные токоограничивающие реакторы; позволяет унифицировать конструкции реверсивного и нереверсивного электроприводов.

Расчет параметров силового трансформатора можно осуществить по методике, изложенной в работах [9, 11, 16]. В табл. 3 приведены значения основных расчетных коэффициентов, связывающих ток и напряжение в цепи с параметрами трансформатора в соответствии с приложением Г. Вначале определяется напряжение условного холостого хода ТП (минимальное необходимое значение  $E_{d0}$ ):

$$E_{d0} = U_{d2} + \Delta U_{cd} + \Delta U_k + \Delta U + \Delta U_{cp} + \Delta U_{TP}, \quad (1)$$

$$U_{d2} = U_H; \quad (2)$$

где  $U_{d2}$  – среднее значение выпрямленного напряжения на якоре электродвигателя, В;  $\Delta U_{cd} = (0,005 \dots 0,01)U_{d2}$  – падение напряжения на активном сопротивлении сглаживающего дросселя;  $\Delta U_{TP} = (0,015 \dots 0,025)U_{d2}$  – падение напряжения на активном сопротивлении силового трансформатора;  $\Delta U_k$  – коммутационное падение напряжения.

Для ориентировочного определения  $\Delta U_k$  целесообразно воспользоваться уравнением

$$\Delta U_k = A \frac{U_k}{100\%} U_{d2}, \quad (3)$$

где  $U_k$  – относительное напряжение короткого замыкания силового трансформатора, %;  $A$  – коэффициент, определяемый схемой преобразователя (для схемы трехфазного выпрямителя с нулевой точкой на вторичной обмотке величина  $A$  может быть принята равной 0,87, для мостовой трехфазной схемы – 0,5);  $\Delta U$  – изменение напряжения на выходе ТП, вызванное колебанием напряжения в питающей сети переменного тока,

$$\Delta U = 0,1E'_{d0}, \quad (4)$$

$$E'_{d0} = U_{d\alpha} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{TP} + \Delta U_k + \Delta U_{с.ср} \quad (5)$$

где  $\Delta U_{в.ср.}$  - среднее значение падения напряжения на тиристорах, В.

Необходимое напряжение на вторичной обмотке силового трансформатора должно быть:

- для схемы трехфазного выпрямителя с нулевой точкой:

$$E_{2\phi} = \frac{E_{d0}}{1,17} = U_{2\phi}; \quad (6)$$

$$E_{2л} = \frac{E_{d0}}{1,17} \sqrt{3} = U_{2л}; \quad (7)$$

- для мостовой трехфазной схемы:

$$E_{2\phi} = \frac{E_{d0}}{2,34} = U_{2\phi}; \quad (8)$$

$$E_{2л} = \frac{E_{d0}}{2,34} \sqrt{3} = U_{2л}. \quad (9)$$

Теоретическое значение тока вторичной обмотки определяется на основе методики, изложенной в справочнике [8]:

$$I_2 = I_d K_{T2}, \quad (10)$$

где  $K_{T2}$  – коэффициент схемы по току вторичной обмотки (берется из табл. 3);  
 $I_d = I_H$  – ток нагрузки.

Ток вторичной обмотки

$$I'_2 = I_2 K_i, \quad (11)$$

где  $K_i = 1,05 \dots 1,1$  – коэффициент отклонения формы тока от прямоугольной.

Коэффициент трансформации

$$K_{TP} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}, \quad (12)$$

где  $U_{1\phi}$  и  $U_{2\phi}$  – фазные напряжения на первичной и вторичной обмотках соответственно.

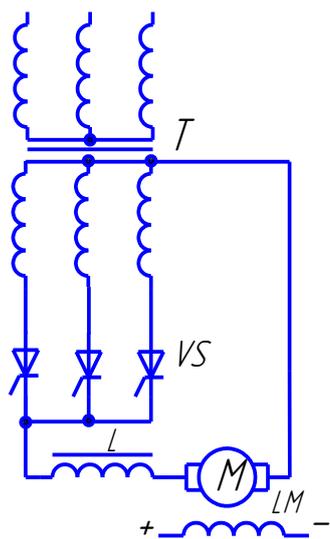
Теоретическое значение тока первичной обмотки, А,

$$I'_1 = K_{T1} \frac{I_d}{K_{TP}}, \quad (13)$$

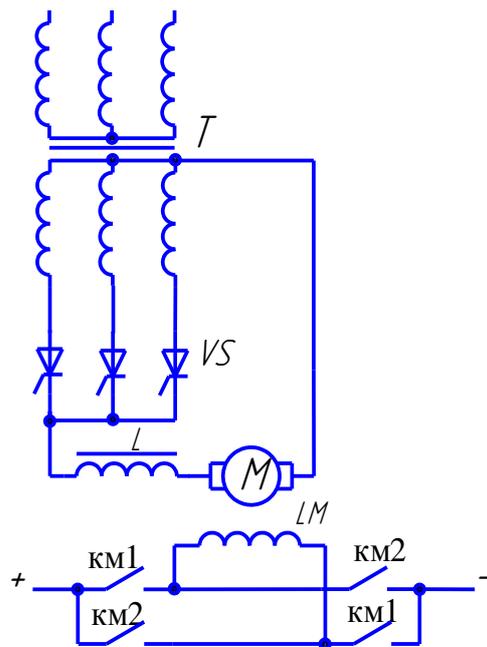
где  $K_{T1}$  – коэффициент схемы по току первичной обмотки, берется из таблицы 3.

Ток первичной обмотки, А,

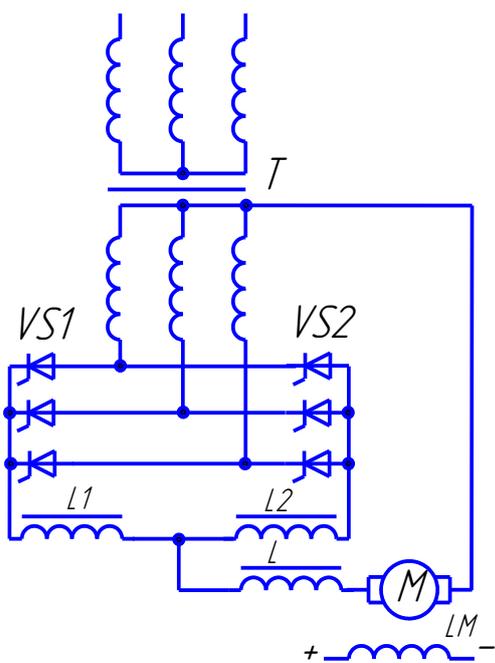
$$I'_1 = K'_i I_1. \quad (14)$$



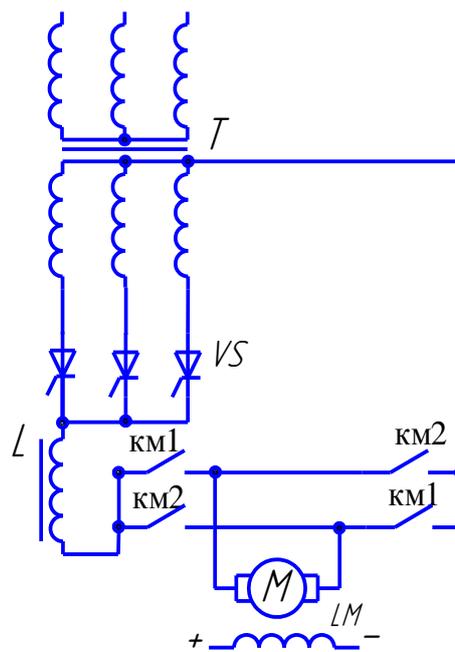
*a*



*б*

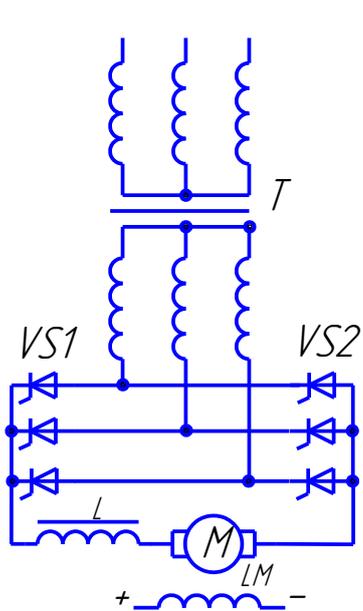


*в*

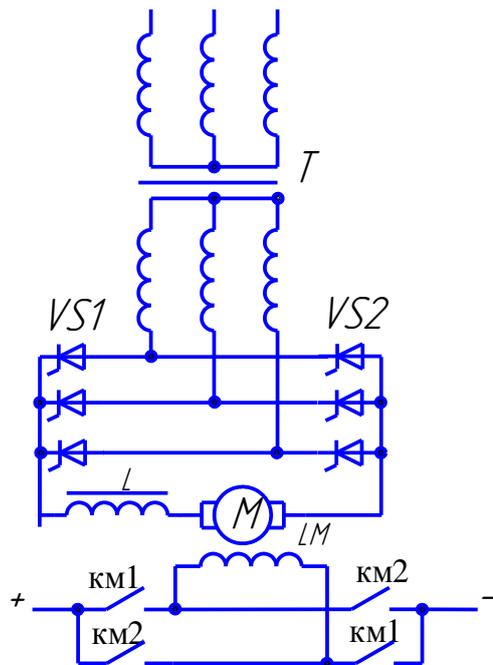


*г*

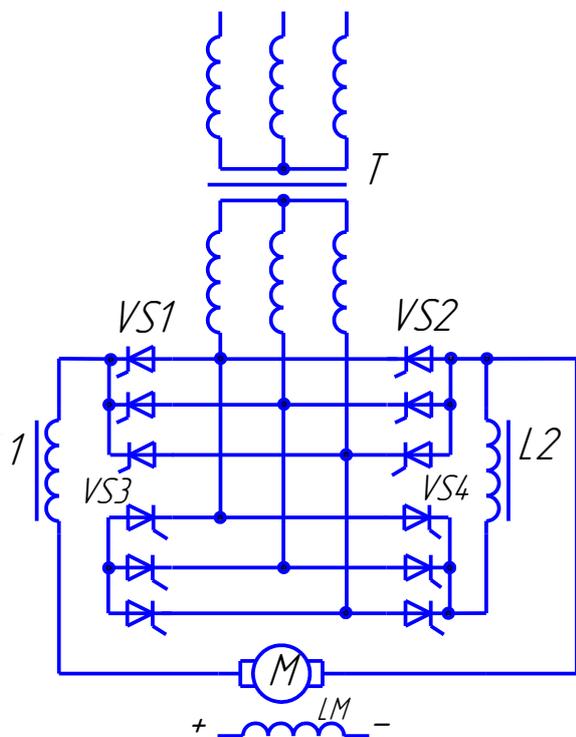
Рисунок 4 – Виды схем силовой части преобразователей (см. также с.18)



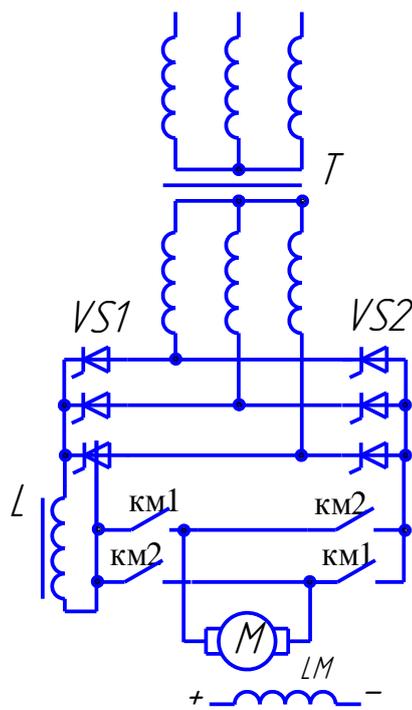
d



e



Ж



з

Рисунок 4 – Окончание

Таблица 3 - Значения основных расчетных коэффициентов, связывающих ток и напряжение в цепи с параметрами трансформатора без учета коэффициентов запаса

Схема ТП	$K_{cx}$ $K_{cx} = U_d / E_2$	$K_{T2}$ $K_{T2} = I_2 / I_d$	$K_{T1}$ $K_{T1} = K_{TP} I_1 / I_d$	$K_M$ $K_M = S_T / (U_d I_d)$	$K_{HB}$ $K_{HB} = U_{B.маx} / U_d$	$K_{TB}$ $K_{TB} = I_B / I_d$
Однофазная двухполупериодная	-	0,786	1,11	1,77	3,72	0,5
Трехфазная с нулевым выводом	1,17 <sub>ф</sub> /0,68 <sub>л</sub>	0,578	0,47	1,45	2,25	0,333
Трехфазная мостовая	2,34 <sub>ф</sub> /1,35 <sub>л</sub>	0,815	0,815	1,065	1,065	0,333

### 3.2.1 Расчет и выбор силового трансформатора

Теоретическое значение типовой мощности трансформатора идеального выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС.

$$S_T = K_M U_d I_d 10^{-3}, \quad (15)$$

где  $K_M$  – коэффициент схемы по мощности, берется из табл. 3;  $I_d = I_H$ ;  $U_d = U_H$ .

Расчетная типовая мощность трансформатора

$$P_T = K_U K_d K_i S_T, \quad (16)$$

где  $K_d = K_H = 1,1$ ;  $K_i = 1,03$ .

На основании найденных значений типовой мощности, линейного напряжения тока принимается трансформатор в соответствии с приложением Г.

Для выбранного трансформатора и заданной схемы соединения вентиляей определяем фактическое значение  $E_{d0}$ :

$$E_{d0} = U_{2л} K_{cx.л.} = U_{2A} \cdot 1,35(0,68), \quad (17)$$

где значение 1,35 – для мостовой схемы, а 0,68 – для нулевой, или

$$E_{d0} = U_{2ф} K_{cx.ф.} = \frac{U_{ГЛ}}{\sqrt{3}} \cdot 2,34(1,17), \quad (18)$$

где значение 2,34 – для мостовой схемы, а 1,17 – для нулевой.

### 3.2.2 Расчет и выбор тиристоров для силовых вентиляльных блоков

Для выбора вентиля определяется среднее значение тока вентиля [8]:

$$I_B = K_{ТВ} I_d, \quad (19)$$

где  $K_{ТВ}$  - коэффициент схемы по среднему току вентиля, берется из табл. 3.

Номинальный ток вентиля

$$I_{ВН} = K_B I_B, \quad (20)$$

где  $K_B=(2 \dots 2,5)$  – коэффициент запаса, выбираемый исходя из надежности работы вентиля с учетом пусковых токов.

Величина тока, проходящего через ventиль при коротком замыкании на стороне постоянного тока,

$$I_K = \frac{100}{U_K \% } I_d . \quad (21)$$

Полагая, что кратковременный допустимый ток, протекающий через ventиль не должен превышать 15-кратного значения номинального тока, найдем номинальный ток вентиля:

$$I_{ВН} = \frac{I_K}{15}. \quad (22)$$

Ventиль выбирается по большему из двух полученных значений номинального тока (приложение И).

Максимальная величина обратного напряжения, прикладываемого к ventилью, определяется по соотношению:

$$U_{ВМАХ} = K_{Н.В} K_U K_\alpha K_R U_d , \quad (23)$$

где  $K_{Н.В}$  – коэффициент схемы по максимальному напряжению вентиля, берется из табл. 3: для мостовой схемы  $K_{Н.В}=1,065$ , для нулевой –  $K_{Н.В}=2,35$ ;

$$K_\alpha = K_R = U_d = 1,1.$$

Класс вентиля, определяемый величиной максимального обратного напряжения, также определяется с запасом.

### 3.2.3 Определение параметров якорной цепи электропривода

В ходе дальнейших расчетов определяются следующие параметры.

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямлен-

ного тока, Ом,

$$R_T = \frac{U_a U_{2\phi}}{I'_{2\phi}}, \quad (24)$$

или

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3}}{amI_{2a}^2}, \quad (25)$$

где  $U_a$  - активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_a=5\%=0,05$ ;  $\Delta P_{K3}$  - мощность короткого замыкания трансформатора, Вт;  $a$  - число параллельных проводов,  $a=3$ ;  $m$  - число фаз,  $m=3$ ;  $I_{2a}$  - выпрямленный ток.

Индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока,

$$X_T = \frac{U_L U_{2\phi}}{I'_{2\phi}}, \quad (26)$$

где  $U_L$  - индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_L=0,05$ .

Сопротивление, вносимое за счет перекрытия анодных токов

$$R_{II} = \frac{mX_T}{2\pi}, \quad (27)$$

где  $m$  - коэффициент пульсаций для трехфазной схемы с нулевым выводом,  $m = 3$ ;  $R_T + R_{II}$  - активное сопротивление источника питания.

Сопротивление щеточного контакта

$$R_{щ} = \frac{2}{I_d}. \quad (28)$$

Индуктивность трансформатора, приведенная к контуру двигателя,

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f}, \quad (29)$$

где  $f$  - частота напряжения питающей сети.

Индуктивность двигателя складывается из индуктивности якоря и индуктивности дополнительных полюсов электродвигателя ( $n=2$ ):

$$L_{дв} = L_{я} + L_{дп} = K_L \frac{U_H}{P\omega_H I_H}, \quad (30)$$

где  $K_L$  - коэффициент индуктивности; для некомпенсированных линий  $K_L=0,6$ , а для компенсированных линий  $K_L=0,25$ ;  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $\omega_H$  - соответственно номинальное

напряжение, ток и угловая скорость ( $\omega = 2\pi n$ ) двигателя;  $P$  - число пар полюсов,  $p=2; 4$ .

Активное сопротивление сглаживающего дросселя

$$R_{CD} = \frac{\Delta U_{CD}}{I_d} . \quad (31)$$

Расчетное активное сопротивление цепи якоря, Ом

$$R_p = 1,2 (r_{\text{я}} + R_{\text{ДП}}) + R_T + R_{\text{П}} + R_{\text{Щ}} + R_{CD} + R_{\text{ПР}}, \quad (32)$$

где  $R_{\text{ПР}}$  – сопротивление проводников,  $R_{\text{ПР}} < 1,5$  Ом.

Индуктивность сглаживающего дросселя

$$L_{CD} = \frac{e_n E'_{d0}}{ie \omega' m I_d} - (L_T + L_{\text{ДВ}}), \quad (33)$$

где  $e_n$  - относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения, определяется кривой  $e_{\text{П}}(\alpha)$ , где  $\alpha$  - предельный угол регулирования (рис. 5):

$$\alpha = \alpha_{\text{ПРЕД}} = \arccos \frac{K\Phi_n \omega_{\text{min}} + I_H R_p}{E'_{d0}}, \quad (34)$$

где  $\omega_{\text{min}}$  - скорость вращения электродвигателя, соответствующая нижнему пределу его регулирования,

$$\omega_{\text{min}} = \frac{\omega_H}{D}, \quad (35)$$

где  $D$  - диапазон регулирования скорости;  $E'_{d0}$  - выпрямленная ЭДС ТП при условном холостом ходе и  $\alpha=0$  (рис. 6);  $i_e = (0,02 \dots 0,03)$  - относительная величина эффективного значения пульсаций первой гармоники выпрямленного тока;  $\omega = 2\pi f$  - угловая скорость первой гармоники выпрямленного напряжения.

Расчетная индуктивность якорной цепи

$$L_p = L_{\text{я}} + L_{\text{ДП}} + L_T + L_{CD}. \quad (36)$$

Электромагнитная постоянная времени

$$T_{\text{Э}} = \frac{L_p}{R_p}. \quad (37)$$

Электромеханическая постоянная времени

$$T_M = \frac{J R_p}{(K\Phi_n)^2}, \quad (38)$$

где  $J$  - момент инерции привода в целом.

### 3.2.4 Построение статических характеристик ТП

Регулировочная характеристика преобразователя при условном холостом ходе может быть построена по уравнению [21]:

$$E_{d\alpha} = E_{d0} \cos \alpha, \quad (39)$$

$$E_{d0} = U_2^{1/\phi} K_{cx}^{1/\phi}. \quad (40)$$

Зависимость напряжения на якоре электродвигателя в функции угла регулирования преобразователя при неизменном (номинальном) моменте на валу может быть определена с помощью уравнения

$$U_{d\alpha} = E_{d0} \cos \alpha - I_H (R_T + R_P), \quad (41)$$

где  $R_T + R_P$  - внутреннее сопротивление источника питания.

Обе характеристики представлены на рис. 6.

При построении характеристик результаты расчетов целесообразно сводить в табл. 4.

Таблица 4 - Результаты расчетов

$\alpha$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$E_{d\alpha} = E_{d0} \cos \alpha$										
$U_{d\alpha} = E_{d0} \cos \alpha - I_H (R_T + R_P)$										

По значениям  $U_{d0} = E_{d0} - I_H (R_T + R_P)$  и  $U_H$  находят так называемый динамический запас по напряжению  $\Delta U_{дин}$ , необходимый для реализации жесткой характеристики при действии отрицательной обратной связи по скорости (см. рис. 6):

$$\Delta U_{дин} = U_{d0} - U_H. \quad (42)$$

Начальный (минимальный) угол регулирования можно определить графически или из уравнения

$$\alpha_{НОМ} = \alpha_{мин} = \arccos \frac{U_{d\alpha} + I_d (R_T + R_P)}{E_{d0}}. \quad (43)$$

Проверяют соответствие значений  $\alpha_{НОМ}$ , полученных графическим путем по  $U_d = f(\alpha)$ , и  $\alpha_{НОМ}$ , полученных аналитическим путем.

Характеристика “вход - выход” преобразователя  $E_{ТП} = f(U_y)$  может быть по-

строена при известной регулировочной характеристике системы управления тиристорами  $\alpha = f(U_y)$  и по регулировочной характеристике  $E_d = f(\alpha)$  путем последовательного перестроения.

Общий вид зависимости  $E_{ТП} = f(U_y)$  для соответствующей системы приведен на рис. 7. По полученной характеристике определяется коэффициент передачи преобразователя:

$$K_{ТП} = \frac{\Delta E_{ТП}}{\Delta U_y}. \quad (44)$$

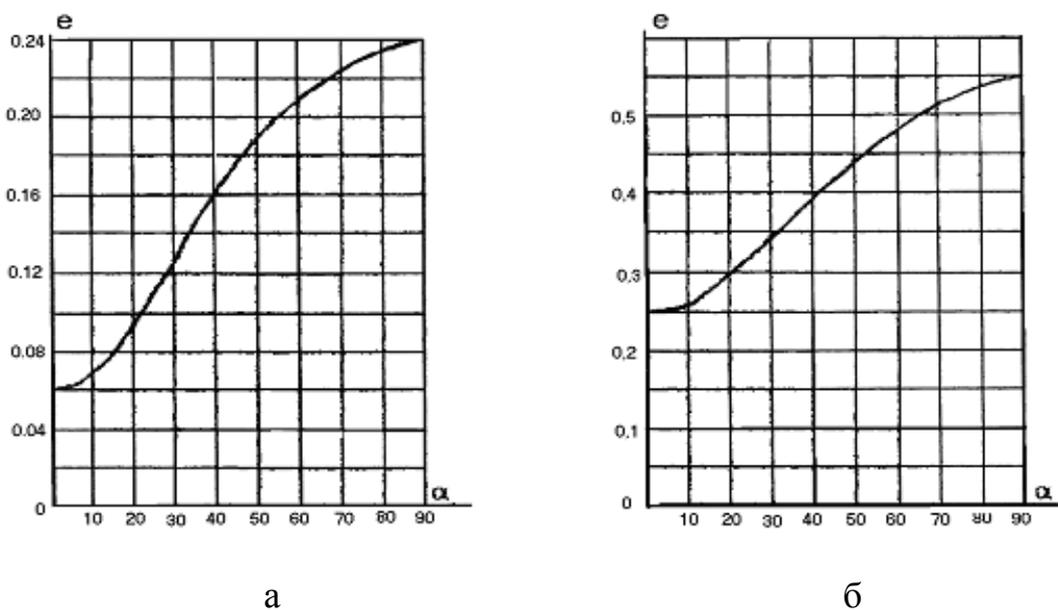


Рисунок 5 – Зависимость  $e_n(\alpha)$  для трехфазной мостовой схемы (а) и для трехфазной схемы с нулевым выводом (б)

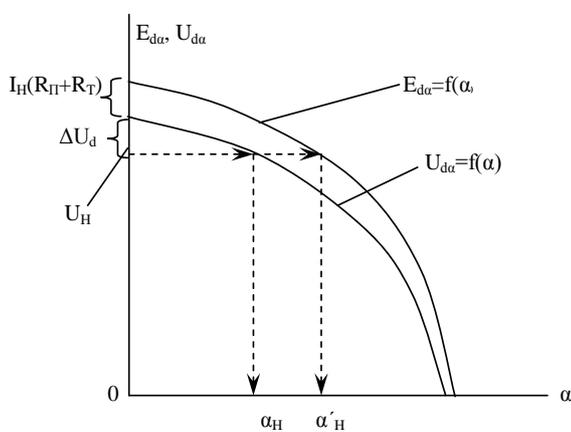


Рисунок 6 – Регулировочные характеристики преобразователя при условном холостом ходе  $E_{da} = f(\alpha)$  и номинальной нагрузке электродвигателя  $U_{da} = f(\alpha)$

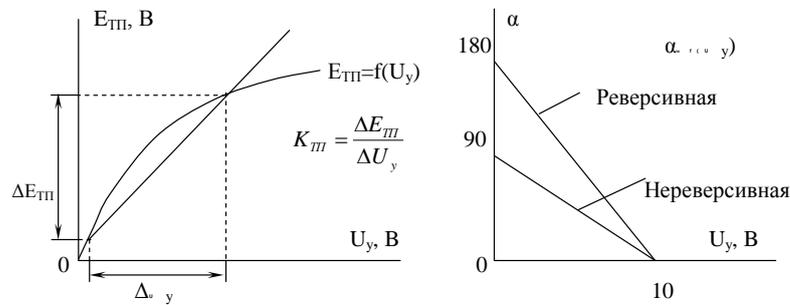


Рисунок 7 – Зависимости  $E_{\text{ТП}}=f(U_y)$  и  $\alpha=f(U_y)$  преобразователя

### 3.2.5 Выбор и описание комплектного ТП

Параметры преобразователя заменить на расчетные, полученные в ходе проектирования.

Описание осуществлять в соответствии со следующей методикой:

- 1 Выделяются цепи главного тока и анализируются их возможности, состав, режимы работы, возможности реверса, аппаратура защиты.
- 2 Выделяются и анализируются контуры регулирования электропривода на основе выбранного комплектного ТП, органы задания управляющих воздействий, реализация обратных связей, регулировка.
- 3 Выделяются и кратко описываются функциональные блоки, обеспечивающие работу комплектного ТП.
- 4 Описывается устройство связи электропривода с системой управления металлорежущего станка.

Функциональная схема комплектного тиристорного электропривода приводится на рис. 8.

## 3.3 Статические режимы работы САУ ЭП

### 3.3.1 Построение электромеханических характеристик двигателя при питании от сети и от ТП в разомкнутой системе

В этом разделе необходимо построить естественную и искусственные характеристики, полученные путем снижения сетевого напряжения до  $0.5U_{\text{НОМ}}$ , а также при минимальном напряжении  $U_{\text{min}}$  при  $I_{\text{ДВ}}=2I_{\text{H}}$ , найти диапазон регулиро-

вания и жесткость механических характеристик при номинальном магнитном потоке, построить эти характеристики.

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения имеет вид [5]

$$\omega = \frac{U_c}{k\Phi_n} - M \frac{R_{дв}}{(k\Phi_n)^2} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (45)$$

где  $U_c=U_H$  – напряжение, подводимое к якорной цепи двигателя, В;  $M$  – электромагнитный момент, развиваемый двигателем, Н·м;  $R_{дв}$  – сопротивление цепи якоря, Ом,  $R_{дв}=R_я+R_{дп}$ ;  $k$  – конструктивный коэффициент;  $\Phi_n$  – номинальный магнитный поток одного полюса, В·с;  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода,  $c^{-1}$ ;  $\Delta\omega$  – перепад скорости,  $c^{-1}$ .

Приведенное уравнение преобразуют в уравнение электромеханической (скоростной) характеристики:

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_n} - I \frac{R_{дв}}{k\Phi_n}, \quad (46)$$

где  $I$  – сила тока в нагрузке.

Обе характеристики представляют собой прямые линии. Поэтому их построение осуществляется по двум точкам в координатах  $(\omega_0, I=0, \omega_n, I=I_H)$ .

Пользуясь каталожными данными, определяем:

скорость идеального холостого хода –

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}; \quad (47)$$

номинальную угловую скорость -

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}; \quad (48)$$

коэффициент ЭДС электродвигателя -

$$k\Phi_n = \frac{U_H - IR_{дв}}{\omega_n}; \quad (49)$$

номинальный момент -

$$M_H = k\Phi_n I_H, \quad (50)$$

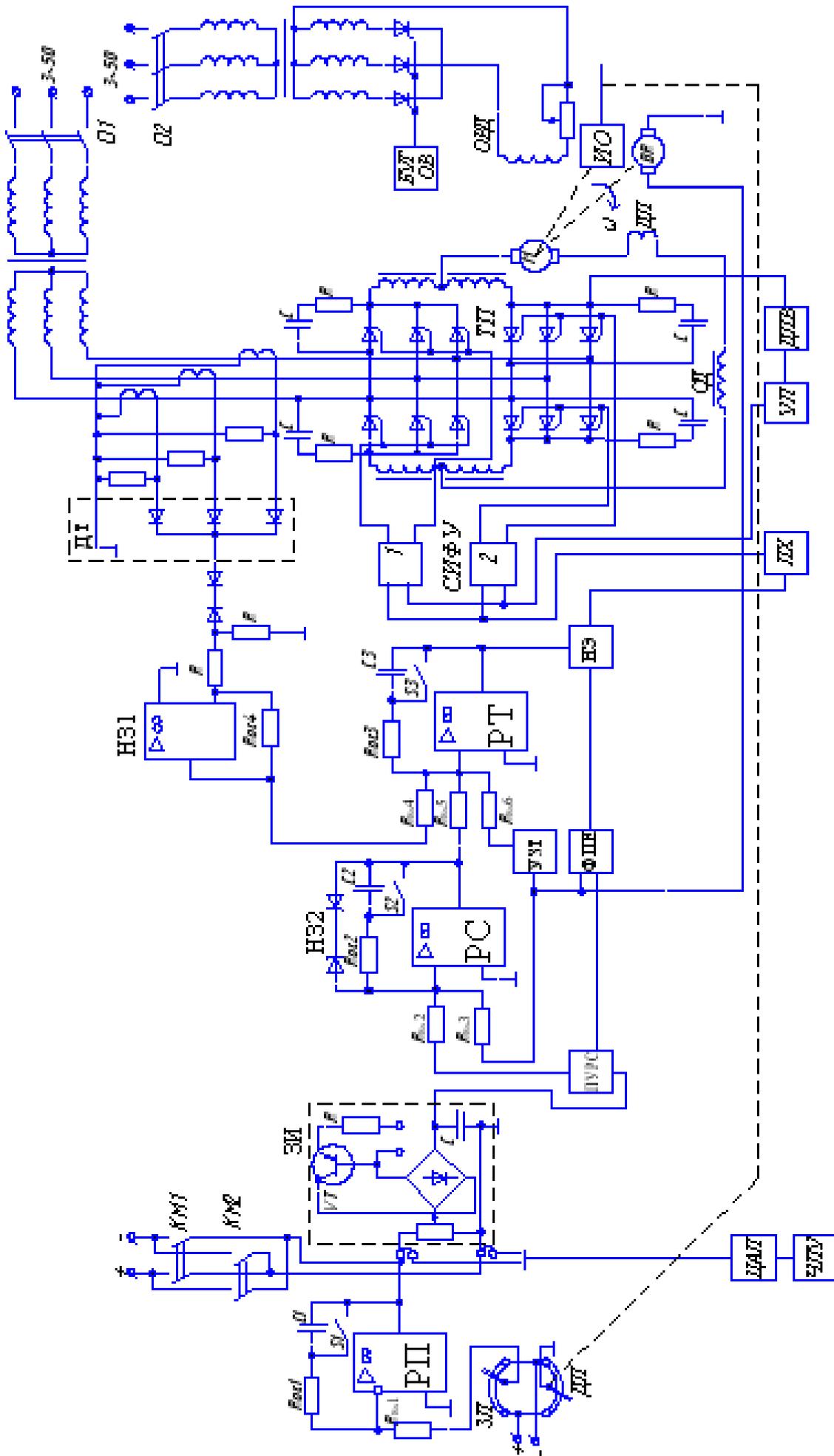


Рисунок 8 – Схема электрическая функциональная САУ ЭП на основе комплектного ТП

где  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $n_H$ ,  $M_H$  – соответственно номинальное напряжение, В, номинальный ток, А, номинальная частота вращения,  $c^{-1}$ , номинальный электромагнитный момент, Н·м.

1 Проведя прямую через точки  $(I_H; \omega_H)$ ,  $(0; \omega_0)$ , получают естественную механическую характеристику (рис. 9).

Целесообразно провести проверку  $\omega_H$  в соответствии с вышеприведенным уравнением естественной электромеханической характеристики.

При изменении напряжения на якорной цепи двигателя его характеристики перемещаются параллельно естественной (т.е. жесткость не меняется). Скорость идеального холостого хода  $\omega'_0$  при напряжении отличном от номинального, можно найти по соотношению

$$\omega'_0 = \omega_0 \frac{U}{U_H}. \quad (51)$$

2 Проведя прямую через  $\omega'_0$  параллельно естественной характеристике, получают искусственную механическую характеристику при сниженном напряжении  $U$ .

3 Характеристика при минимальном напряжении должна быть такой, чтобы при изменении в необходимых пределах момента на валу двигателя, последний не останавливался. Проведя прямую через  $I=2I_H$  параллельно естественной характеристике, находят скорости  $\omega_{0min}$ ,  $\omega_{min}$  (см. рис. 9).

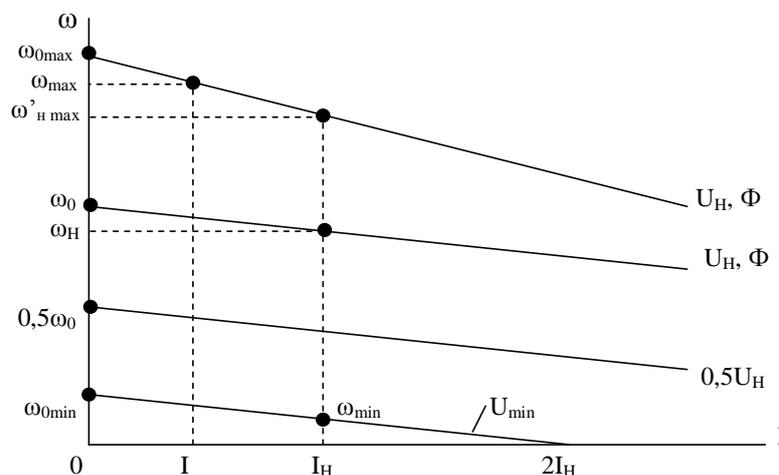


Рисунок 9 – Электромеханические характеристики двигателя при питании от сети

Минимальное напряжение

$$U_{min} = U_H \frac{\omega_{0min}}{\omega_0}. \quad (52)$$

С учетом условий нагрева при регулировании скорости ослаблением магнитного потока ток в якорной цепи не должен превышать номинального значения. Построение искусственной характеристики в данном случае можно выполнить в такой последовательности.

Определяют коэффициент  $k\Phi_H$  при ослабленном потоке:

$$K\Phi_n = \frac{U_H - I_H R_{я}}{\omega'_{max}}. \quad (53)$$

Диапазон регулирования скорости в первой зоне (изменением напряжения)

$$D_1 = \frac{\omega_H}{\omega_{min}}. \quad (54)$$

Диапазон регулирования скорости во второй зоне (изменением магнитного потока)

$$D_2 = \frac{\omega'_{max}}{\omega_H}. \quad (55)$$

Полный диапазон регулирования

$$D = D_1 D_2 = \frac{\omega'_{max}}{\omega_{min}}. \quad (56)$$

Жесткость механической характеристики при изменении напряжения

$$\beta = \frac{(K\Phi_H)^2}{r_D}. \quad (57)$$

Статизм характеристики определяется следующим образом:

$$\sigma = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} \cdot 100\%. \quad (58)$$

Построение электромеханических характеристик двигателя при питании от преобразователя в разомкнутой системе и при допущениях непрерывности тока вплоть до  $I=0$  можно осуществить по формуле

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha - IR_p}{K\Phi_n}. \quad (59)$$

Характеристики следует строить при углах управления  $\alpha_H$  (обеспечивает получение номинальной скорости  $\omega_H$  при номинальном токе нагрузки),

$\alpha = 1,5\alpha_H$  и  $\alpha = \alpha_{max}$  (обеспечивает минимальную скорость при номинальной нагрузке).

Значение  $\alpha_H$  можно найти по формуле

$$\alpha_H = \arccos \frac{K\Phi_H \omega_H + I_H R_p}{E_{d0}}. \quad (60)$$

Значение  $\alpha_H$  должно соответствовать  $\alpha'_H$ , полученному графически для кривой  $E_d(\alpha)$ . Целесообразно применить значение  $\alpha_H$ , полученное графически по регулировочной характеристике  $U_d(\alpha)$  на рис. 6.

Задаваясь токами  $I$ , находят скорости, им соответствующие, и строят электромеханическую характеристику при  $\alpha = \alpha_H$ .

Результаты расчетов целесообразно свести в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты расчетов

$\alpha$	$\alpha_H =$			$1,5\alpha_H =$			$\alpha_{max} =$		
$I$	0	$I_H$	$2I_H$	0	$I_H$	$2I_H$	0	$I_H$	$2I_H$
$\omega$									

Построение характеристики при  $\alpha = 1,5\alpha_H$  не требует пояснений. Построение характеристики при максимальном угле управления производится графически.

Для этого через точку ( $\omega_0, I = 2I_H$ ) параллельно характеристике при  $\alpha = 1,5\alpha_H$  проводится прямая до пересечения с осью скорости и таким образом находится скорость идеального холостого хода  $\omega_{min}$ . Зная эту скорость, можно найти угол, ей соответствующий:

$$\alpha_{max} = \arccos \frac{k\Phi_H \omega_{min} + I_H R_p}{E_{d0}}. \quad (61)$$

Минимальную скорость находят при номинальном токе либо аналитически, используя найденный  $\alpha_{max}$ , либо графически. Рассмотренные характеристики изображены на рис. 10. Жесткость характеристик можно определить по известному соотношению [1,5]:

$$\beta = \frac{(K\Phi_H)^2}{R_p}. \quad (62)$$

Статизм определяется следующим образом:

$$\sigma = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100\% . \quad (63)$$

Полученные характеристики, как и естественные, имеют вид прямых линий. Построенные характеристики обрабатывают с целью получения статизма, жесткости и диапазона.

Делаются выводы по результатам сравнения параметров: показатели ухудшаются при питании от преобразователя при разомкнутой системе.

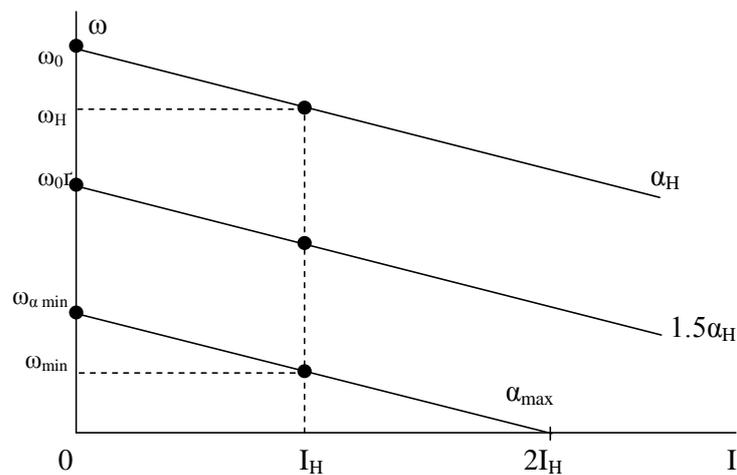


Рисунок 10 – Электромеханические характеристики двигателя при питании от ТП в разомкнутой системе регулирования

### 3.3.2 Построение электромеханической характеристики РЭП в замкнутой системе

Структурная схема РЭП приведена на рис. 11 и составляется в соответствии с функциональной схемой (см. рис.8). На рисунке приняты следующие обозначения: ЗС – задатчик скорости, ЗИ – задатчик интенсивности;  $U_3$  – напряжение задания;  $U_{y2}$  – напряжение управления во внешнем контуре, определяемое разностью между  $U_3$  и сигналом обратной связи по скорости  $k_C \omega$ , где  $k_C = k_{ТТ} k_{ПУ}$ ; НЗ2 – нелинейное звено в регуляторе скорости – зона насыщения; РС – регулятор скорости;  $K_{рс}$  – коэффициент усиления регулятора скорости,  $U_{рс}$  – выходное напряжение РС;  $U_{oc}$  – обратная связь по скорости;  $U_{y1}$  – напряжение управления во внешнем контуре; РТ – регулятор тока;  $U_{РТ}$  – выходное напряжение РТ;  $U_d$  –

напряжение на выходе ТП; Д1 – статорная часть электродвигателя; Мс - момент сопротивления ; Iд – ток двигателя; Д2 – якорная часть электродвигателя; ДТ – датчик тока ; НЗ1 – нелинейное звено в контуре тока – зона нечувствительности;  $\omega$  – угловая скорость – выходной регулируемый параметр;  $U_{ср1}$  – напряжение сравнения в контуре тока; ТГ – тахогенератор – реализует обратную связь по скорости;  $k_{ТГ}$  – коэффициент передачи по скорости; ПУ – промежуточный усилитель в цепи обратной связи по скорости или делитель напряжения;  $k\Phi_n$  – конструктивный коэффициент двигателя.

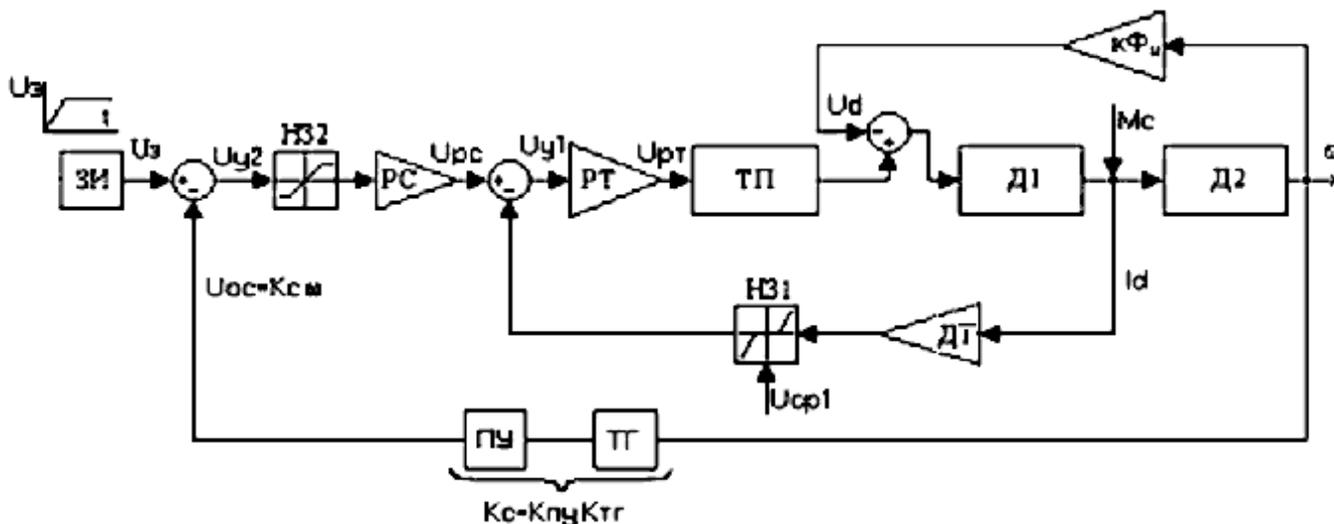


Рисунок 11 – Структурная схема двухконтурной САУ РЭП

В схеме используется отрицательная обратная связь по скорости и отрицательная обратная связь по току с отсечкой [5].

Цепь обратной связи по току выполнена нелинейной с зоной нечувствительности  $U_{ср1}$ , а входной каскад усилителя насыщается при  $U_{ср2}$ . Электромеханическая характеристика показана на рис. 12.

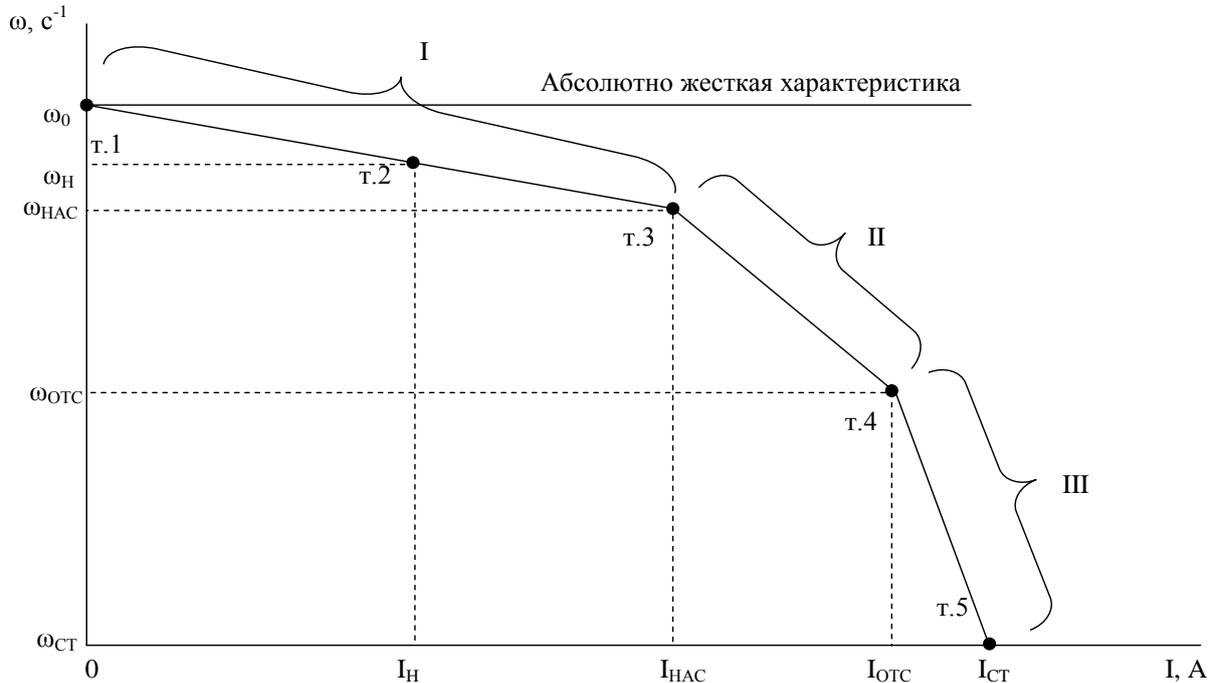
Она состоит из трех участков.

На участке I действует обратная связь по скорости. Величина сигнала  $U_{у2} < U_{ср2}$ ,  $I_{дв} < U_{ср1}$ , система находится в режиме поддержания постоянства заданной скорости.

На участке II  $I_{дв} \geq I_{нас}$ ,  $U_{у} > U_{ср2}$ ,  $I_{дв} k_T < U_{ср1}$ , перестает действовать обратная связь по скорости (ОС). Система превращается в разомкнутую. Наклон ха-

рактически заметно увеличивается.

На участке III  $I_{ДВ} \geq I_{НАС}$ ,  $U_{ДВ} > U_{СР2}$ ,  $I_{ДВ} k_T > U_{СР1}$ . Вступает в действие отрицательная обратная связь по току (ОТ), под влиянием которой формируется крутопадающая часть характеристики.



Т.1( $\omega_0; I=0$ ); Т.2( $\omega_n; I_n$ ); Т.3( $\omega_{НАС}; I_{НАС}$ ); Т.4( $\omega_{ОТС}; I_{ОТС}$ ); Т.5( $\omega_{СТ}=0; I=I_{СТ}$ );

$$\omega_n = \omega_0 - \frac{I_n R_p k_d}{1 + k_{PC} k_{PT} k_{TP} k_d k_C}; \quad \omega_{НАС} = \omega_0 - \frac{I_{НАС} R_p k_d}{1 + k_{PC} k_{PT} k_{TP} k_d k_C}; \quad \omega_{ОТС} = \omega_0 - \frac{I_{ОТС} R_p}{k \Phi_H^2}$$

Рисунок 12 – Статическая электромеханическая характеристика в замкнутой САУ ЭП при  $I_{НАС} < I_{ОТС}$

Рассмотренные процессы описываются следующими уравнениями:

$$e_{ТП} = (U_3 - k_C \omega) k_{PC} k_{PT} k_{TP} - \tag{64}$$

при  $U_{У2} < U_{СР2}$ ,  $k_T i_{Я} < U_{СР1}$ , действует ОС;

$$e_{ТП} = \underbrace{(U_3 - k_C \omega_{НАС})}_{U_{PC.НАС.}} k_{PC} k_{PT} k_{TP} - \tag{65}$$

при  $k_T i_{Я} < U_{СР1}$ ,  $U_{У2} > U_{СР2}$ , отключается ОС;

$$e_{ТП} = [(U_{PC.НАС.} - (k_T i_{Я} - U_{СР1}))] k_{PT} k_{TP} - \tag{66}$$

при  $k_T i_{Я} > U_{СР1}$ ,  $U_{У2} > U_{СР2}$ , действует ОТ.

Используя приведенные зависимости, можно получить уравнения для построения электромеханической характеристики на соответствующих участках (см.

рис. 12):

при  $U_y > U_{CP2}$ ,  $k_{T1Я} < U_{CP1}$  -

$$\omega_I = \frac{U_3 k_{PC} k_{PT} k_{TP} k_D - I_{Я} R_P k_D}{1 + k_{PC} k_{PT} k_{TP} k_C k_D}; \quad (67)$$

при  $U_y < U_{CP2}$ ,  $k_{T1Я} < U_{CP1}$  -

$$\omega_{II} = \frac{U_{PC.НАС.} k_{PT} k_{TP} k_D - I_{Я} R_P}{k \Phi_H}; \quad (68)$$

при  $U_{y2} > U_{CP2}$ ,  $k_{T1Я} > U_{CP1}$  -

$$\omega_{III} = \frac{U_{PC.НАС.} k_{PT} k_{TP} k_D - I_{Я} R_P (1 + k_{TP} k_{PT} k_T)}{k \Phi_H}. \quad (69)$$

Требуемый коэффициент усиления разомкнутой системы, необходимый по соображениям заданного статизма  $\delta_3$ , определяется следующим образом:

$$k_{PC.НЕОБХ} = \frac{\Delta \omega_{P.C.}}{\Delta \omega_{3.C.}} - 1. \quad (70)$$

Перепад скорости в замкнутой системе

$$\Delta \omega_{3.C.} = \frac{\omega_H}{D} \frac{\delta_3}{1 - \delta_3}, \quad (71)$$

где  $\delta_3 = 0,05 \dots 0,1$  – заданный относительный перепад двигателя при номинальной нагрузке;  $D$  – заданный диапазон регулирования скорости.

Перепад скорости в разомкнутой системе

$$\Delta \omega_{P.C.} = I_{Я} R_P k_D. \quad (72)$$

Необходимый коэффициент обратной связи по скорости

$$K_{C.НЕОБХ} = \frac{k_{p.c.необх.}}{k_{PC} k_{PT} k_{TP} k_D}. \quad (73)$$

По полученному значению  $k_{C.необх}$  выбирается тахогенератор из приложения Д с  $k_{TG}$ , ближайшим к  $k_C$ .

$$k_{TG} = \frac{U_{TG}}{\omega_{TG}}, \quad (74)$$

где  $\omega_{TG} = \omega_H$ ;  $U_{TG}$  выясняется из паспортных данных тахогенератора.

Согласующий промежуточный усилитель  $k_{ПУ}$  в цепи ОС (см. рис. 11) рассчитывается по формуле

$$k_{oc.необх} = k_{ПУ} k_{TG}, \quad (75)$$

тогда

$$k_{ПУ} = \frac{k_{с.необх}}{k_{ТГ}}. \quad (76)$$

В реальной системе  $k_{рс.необх}$  определяется параметрами (коэффициентами усиления) звеньев системы:

$$k_{рс.необх} = k_{рс}k_{рт}k_{тп}k_{д}k_{с}, \quad (77)$$

где  $k_{рс}$ ,  $k_{рт}$  - коэффициенты усиления регулятора скорости и тока соответственно (коэффициенты усиления по контурам управления).

Из уравнения электромеханической характеристики замкнутой системы

$$\omega = \frac{U_3 k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д}}{\underbrace{1 + k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д} k_{с}}_{\omega_0}} - I_H \frac{R_p k_{д}}{\underbrace{1 + k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д} k_{с}}_{\Delta\omega}} \quad (78)$$

можно найти напряжение задания для замкнутой системы:

$$U_3 = \frac{(1 + k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д} k_{с}) + I_H R_p k_{д}}{k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д}}. \quad (79)$$

При этом получают значительную величину  $U_3 (>100В)$ , что неприемлемо для операционного усилителя, на котором выполнены регуляторы.

В этой связи для получения  $U_3 \leq \pm 10В$ , что является нормированной величиной для САУ ЭП, необходимо осуществить следующий подход.

Задаются  $U_3 \leq \pm 10В$  и из выражения электромеханической характеристики при расчетных значениях параметров, полученных ранее, –  $\omega_H, k_{тп}, k_{д}, k_{ос}, I_H, R_p = R_{я.ц}$ , находят произведение  $k_{рс}$  и  $k_{рт}$ . При этом обозначим:

$k_{рс} k_{рт} k_{тп} k_{д} k_{ос} = k_{рс.необх}$ , тогда

$$k_{рс} k_{рт} = \frac{\omega_H (1 + k_{рс.необх}) + I_H R_{я.ц} k_{д}}{U_3 k_{тп} k_{д}}. \quad (80)$$

Примем  $k_{рс} = k_{рт}$ , тогда

$$k_{рс} = k_{рт} = \sqrt{\frac{\omega_H (1 + K_{рс.необх}) + I_H R_{я.ц} k_{д}}{U_3 k_{тп} k_{д}}}. \quad (81)$$

Скорость идеального холостого хода определяется из уравнения статической характеристики для замкнутой САУ (78):

$$\omega_o = \frac{U_3 K_{pc} K_{pt} K_{тп} K_d}{1 + K_{pc} K_{pt} K_{тп} K_d K_c}. \quad (82)$$

Значение скоростей для последующих точек целесообразно определить через  $\omega_0 - \Delta\omega_n$ .

Общий вид упорной (трехэлементной) электромеханической характеристики для условий  $I_{отс} > I_{нас}$  представлен на рис. 12.

На упорной характеристике выделено пять характерных точек (Т1,Т2,Т3,Т4,Т5), каждая из которых определяется двумя координатами – значением угловой скорости  $\omega$  и заданным значением силы тока  $I$ :

Т1 ( $I = 0, \omega = \omega_0$ ) – точка идеального холостого хода.

Т2 ( $I = I_n, \omega = \omega_n$ ) – точка номинального режима.

Т3 ( $I = I_{нас}, \omega = \omega_{нас}$ ) – точка, в которой регулятор скорости переходит в режим насыщения (обратная связь по скорости прекращает свое действие).  $I_{нас} = (1,3 - 1,4)I_n$  – по выбору проектировщика.

Т4 ( $I = I_{отс}, \omega = \omega_{отс}$ ) – точка, в которой вступает в действие отсечка по току  $I_{отс} = (1,7 - 1,8)I_n$  – по выбору проектировщика. Между точками 3 и 4 обратные связи не действуют, поэтому система по своему поведению аналогична разомкнутой САУ ЭП.

Т5 ( $I = I_{ст}, \omega = \omega_{ст} = 0$ ) – точка, в которой наступает стопорный режим: двигатель работает на упор при  $I = I_{ст} = 2I_n$ , а скорость  $\omega$  равна нулю.

$\Delta\omega_n$  - просадка скорости при номинальной нагрузке,

$$\Delta\omega_n = I_n \frac{R_p K_d}{1 + K_{pc} K_{pt} K_{тп} K_c K_d}; \quad (83)$$

$\omega_n$  - номинальная скорость,

$$\omega_n = \omega_o - \Delta\omega_n.$$

Примечание. Номинальная скорость при всех способах работы привода – при питании от сети (на естественной характеристике), при питании от преобра-

зователя в разомкнутой САУ при  $\alpha_p = \alpha_n$ , при питании от преобразователя в замкнутой системе при  $U_3 = 10V$  - должна иметь одинаковое значение. При несоответствии – осуществить проверку предыдущих расчетов.

$\Delta\omega_{нас}$  - просадка скорости при токе насыщения,

$$\Delta\omega_{нас} = I_{нас} \frac{R_p K_d}{1 + K_{pc} K_{pm} K_{mn} K_c K_d}; \quad (84)$$

$\omega_{нас}$  - скорость в точке насыщения,

$$\omega_{нас} = \omega_0 - \Delta\omega_{нас};$$

$\Delta\omega_{отс}$  - просадка скорости при наступлении токовой отсечки для замкнутой системы,

$$\Delta\omega_{отс} = \frac{I_{отс} R_p K_d}{K\Phi_n}; \quad (85)$$

значение скорости в момент включения отсечки

$$\omega_{отс} = \omega_{0pc} - \Delta\omega_{отс},$$

где  $\Delta\omega_{отс}$  - скорость идеального холостого хода в разомкнутой системе (она определена выше при построении электромеханической характеристики в разомкнутой системе).

Проверка правильности выборов параметров системы при построении якорной характеристики осуществляется путем расчета фактического тока стопорения по следующему выражению:

$$I_{ст.рас} = \frac{(U_{рс.нас} + U_{ср}) K_{pm} K_{mn} K_d - \omega_{ст}}{K_c K_m K_{mn} K_d + R_p K_d}, \quad (86)$$

где  $\omega_{ст} = 0$ ;  $I_{ст.рас} \approx 2I_n$ . Ошибка в расчетах – не более 5%.

Строится электромеханическая характеристика в замкнутой системе для  $\omega_{min}$ , соответствующей  $U_{min}$ .

По  $\omega_{min}$  и  $\omega_{max}$  определяется фактический диапазон регулирования:

$$D_{з.с} = \frac{\omega_n}{\omega_{min з.с}} > D_3 \quad (87)$$

где  $D_3$  – заданный диапазон регулирования в исходных данных.

Определяем статизм системы:

$$\sigma_{pac} = \frac{\omega_o - \omega_n}{\omega_o} \cdot 100\% < \sigma \text{ (десятые доли \%)} \quad (88)$$

Жесткость характеристики

$$\beta_{з.с} = \frac{(k\Phi_n)^2}{R} \gg \beta_{p.c} \quad (89)$$

Далее производится сравнение параметров регулирования во всех вариантах питания электродвигателя.

### 3.3.3 Расчет входного контура (здатчика интенсивности)

Для получения постоянного динамического тока якоря в переходных режимах система управления электропривода должна обеспечить постоянное ускорение двигателя. Это легко достигается с помощью задатчика интенсивности (рис.13).

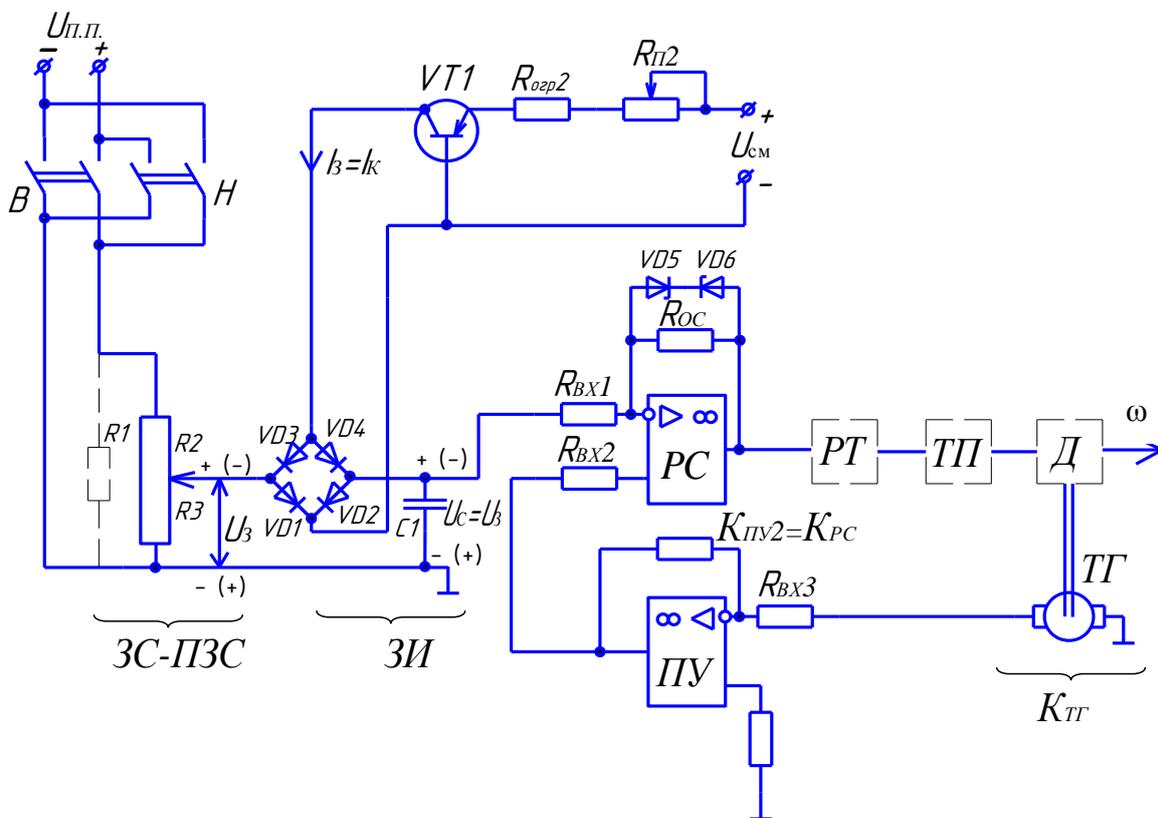


Рисунок 13 – Электрическая схема входного каскада САУ РЭП (ЭИ)

Принцип работы задатчика заключается в следующем. Входное постоянное напряжение, пропорциональное заданной скорости привода, заряжает конденса-

тор С, в цепи которого установлен транзистор VT1, регламентирующий зарядный ток конденсатора. При любой полярности входного напряжения требуемая полярность напряжения на электродах транзистора обеспечивается диодами моста UZ. Благодаря включению транзистора по схеме с общей базой его коллекторные характеристики идут почти параллельно оси абсцисс и зарядный ток конденсатора С остается постоянным вплоть до очень малого значения напряжения на переходе «коллектор-база». Величина зарядного тока регулируется током смещения через эмиттерный переход. При этом напряжение на конденсаторе изменяется во времени согласно уравнению

$$U_C = \frac{I}{C} I_3 t_{\text{зар}} = U, \quad (90)$$

где  $U_C$  - напряжение на конденсаторе, В;  $C$  - емкость зарядного (накопительного) конденсатора, мкФ;  $I_3$  - сила тока заряда конденсатора, А;  $U_3$  - напряжение задания, В.

Время интегрирования, нарастания входного сигнала

$$U_3 t_{\text{ИНТ}} = \frac{\Delta\omega}{\varepsilon},$$

где  $\Delta\omega = \omega_H$  - нарастание угловой скорости при разгоне от 0 до  $\omega_H$ ;  $\varepsilon$  - допустимое угловое ускорение.

Параметры ( $C$  и  $U_H$ ) зарядного конденсатора находятся из уравнения экспоненты:

$$U_3 = U_{\text{эмах}} \left( 1 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{T}} \right) = U_{\text{эмах}} - U_{\text{эмах}} e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{RC}}, \quad (91)$$

где  $R = R_{\text{орг}} + R_{\text{п2}}$ .

$$e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{RC}} = \frac{U_{\text{3MAX}} - U_3}{U_{\text{3MAX}}} = 0,01; \quad (92)$$

$$e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{RC}} = 0,01; \quad e^{-x} = 0,01; \quad x = \ln 0,01 = -4,6; \quad (93)$$

при  $t_{\text{зар}} = 0,01$  с получаем:

$$-4,6 = -\frac{0,01}{RC}; \quad RC = \frac{0,01}{4,6} = 0,002; \quad C = \frac{0,002}{R} = \frac{0,002}{1000} = 2,1 \cdot 10^{-6} = 2,1 \text{ мкФ}. \quad (94)$$

Таким образом, в ЗИ происходит формирование  $U_3$ , линейно возрастающего до номинального значения за время  $t_{\text{ИНТ}} = 0,74$  с (темп нарастания  $U_3$ ).

Величина зарядного тока – тока коллектора

$$U_3 = U_C = \frac{I_K t_{umm}}{C}; \quad (95)$$

$$I_K = \frac{U_3 C}{t_{umm}} = \frac{210 \cdot 0,16 \cdot 10^{-3}}{0,74} = 45 \cdot 10^{-3} \text{ мА}. \quad (96)$$

Принимается VT1 соответствующего типа с  $U_{\Pi} \geq U_3 = 10\text{В}$ .

Характер нарастания задающего напряжения в проектируемом задатчике интенсивности представлен на рис. 14.

### 3.3.4 Расчет и выбор нелинейных звеньев контуров скорости и тока

Выбор РС и зоны насыщения НЗ2 осуществляется в соответствии с рис. 15. Статическая характеристика НЗ2 приведена на рис. 16, где даны расчетные формулы для выбора стабистора/стабилитрона. Выбор стабилитрона осуществляется по большему значению  $U_{\text{пр}}$  из приложения К. Вольтамперная характеристика (ВАХ) стабилитрона VD представлена на рис. 17.

$U_{\text{ВХ}} = U_3 - k_C \omega$  – входное напряжение на НЗ2, определяется разностью между напряжением задания и сигналом обратной связи по скорости.

$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{СР2}} = U_3 - k_C \omega_{\text{НАС}}$  – то же напряжение, но при скорости насыщения, когда происходит пробой стабистора VD1,2, а регулятор входит в зону насыщения и обратная связь по скорости перестает функционировать.

По значению  $U_{\text{СР2}} = U_{\text{ПР}}$  выбирается по справочнику стабистор с  $U_{\text{пр}} \leq 1 \text{ В}$ .

$U_{\text{ВЫХ.РС}} = U_{\text{РС.НАС}} = (U_3 - k_C \omega_{\text{НАС}}) k_{\text{РС}}$  – напряжение на выходе регулятора скорости при  $\omega_{\text{НАС}}$ .

Реализация регулятора тока  $K_{\text{РТ}}$  и зоны нечувствительности в контуре тока НЗ1 осуществляется в соответствии со схемой на рис. 18. Статическая характеристика зоны нечувствительности представлена на рис. 19.

Значение коэффициента обратной связи по току  $K_{\text{T}}$

$$K_{\text{T}} = \frac{U_{\text{РС.НАС}}}{I_{\text{СТ}} - I_{\text{ОТС}}}, \quad (97)$$

где  $I_{\text{СТ}}$  – ток стопорения, А;  $I_{\text{ОТС}}$  – ток отсечки, А;  $U_{\text{РС.НАС}}$  – напряжение на выходе регулятора скорости в режиме насыщения, В.

Сигнал обратной связи по току определяется разностью

$$U_{OT} = K_T I_{CT} - U_{CP1},$$

где  $U_{CP1}$  - напряжение сравнения в НЗ1 – пробой стабилитрона VD3,4, В.

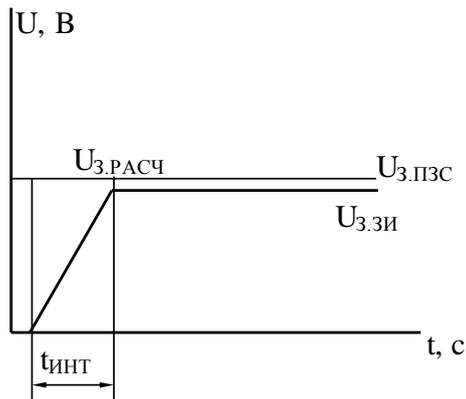


Рисунок 14 – Характер формирования  $U_3$  на ЗС и ЗИ

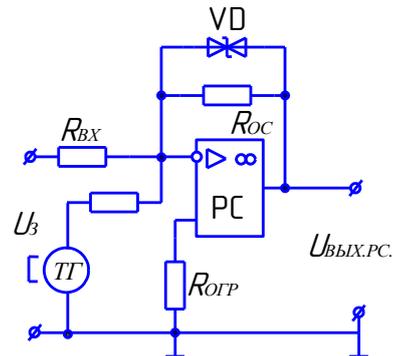


Рисунок 15 – Схема НЗ2 и РС

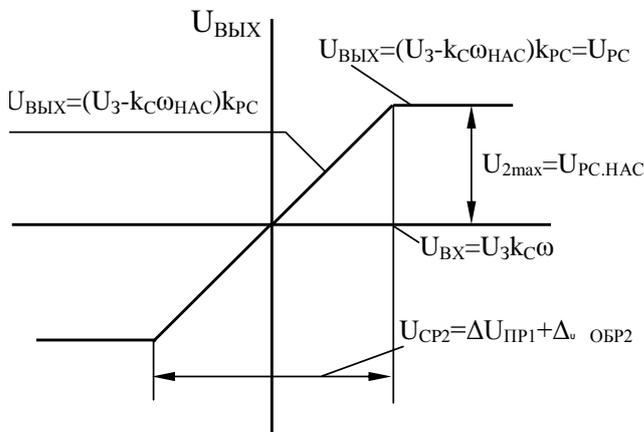


Рисунок 16 – Статическая характеристика НЗ2 и РС

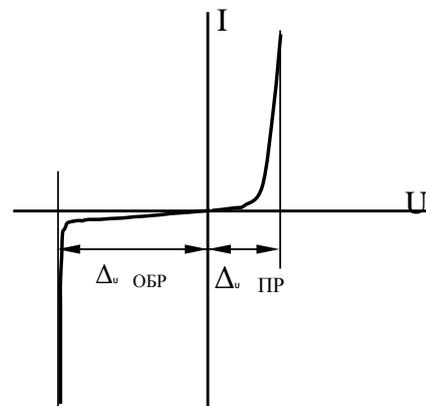


Рисунок 17 – ВАХ стабилитрона

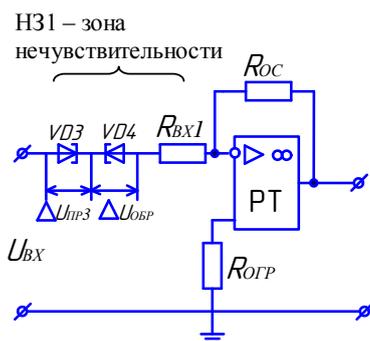


Рисунок 18 – Схема регулятора тока и НЗ1

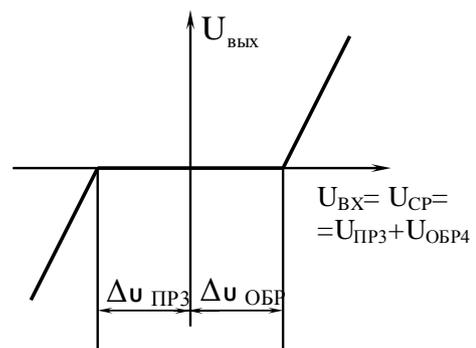


Рисунок 19 – Характеристика НЗ1 на РТ

Это напряжение должно уравниваться напряжением задания на вход контура тока, которое равно  $U_{PC.HAC}$ . Тогда напряжение сравнения

$$U_{CPI} = K_T I_{CT} U_{PC.HAC} \quad (98)$$

Реализация узла токоограничения по переменному току показана на рис. 20.

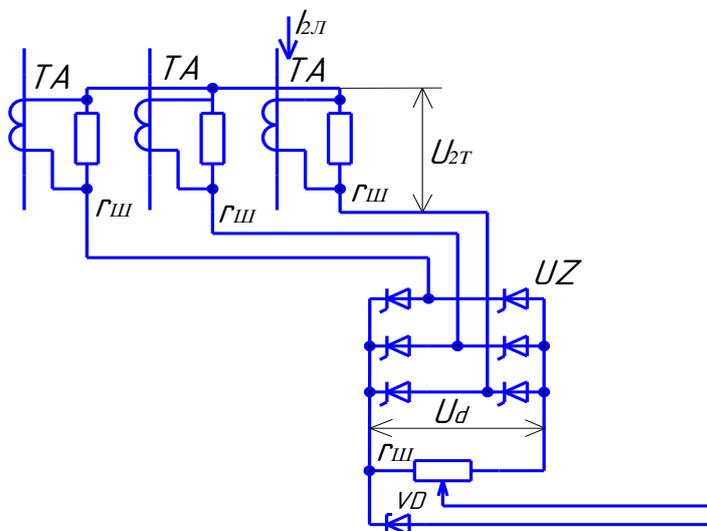


Рисунок 20 – Принципиальная схема узла токоограничения по переменному току

В серийных тиристорных преобразователях в узлах токоограничения датчиком тока обычно служат три трансформатора тока ТА с мостовым трёхфазным выпрямителем UZ, в качестве элемента сравнения напряжения  $U_{CPI}$  – стабилитрон VD (см. рис. 20).

При трехфазной мостовой схеме тиристорного выпрямителя ток в линиях вычисляется по формуле

$$I_{2л} = I_{я.д} \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (99)$$

где  $I_{я.д}$  - номинальный ток якоря двигателя, А.

Для трехфазной схемы с нулевым проводом

$$I_{2л} = I_{я.д} \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (100)$$

Коэффициент передачи трансформатора тока можно приближенно определить как отношение номинальных значений токов в линии и вторичного:

$$K_{TP} = \frac{I_{2л}}{I_{1л}}, \quad (101)$$

$$K_{TA} = \frac{I_{2л}}{I_{2ТА}}, \quad (102)$$

где  $I_{2ТА}$  чаще всего равно 5 А.

Вторичные обмотки трансформаторов тока шунтируются резисторами  $r_{ш}$ , сопротивление которых для выбранного типа трансформатора должно быть не более допустимого, обычно приводимого в каталогах. Падение напряжения на  $r_{ш}$  определяет фазное напряжение на входе выпрямительного моста UZ (см. рис. 20):

$$I_{2T} = \frac{I_{2л}}{K_{TA}} r_{ш}. \quad (103)$$

В эту формулу следует подставлять значение  $K_{TA}$  выбранного трансформатора, а не подсчитанное по формуле.

В режиме стопорения напряжение на выходе выпрямительного моста UZ, если пренебречь потерей напряжения от перекрытия анодных токов,

$$U_{d.ст} = 2,34 \frac{I_{2СТ}}{I_{2л}} U_{2T} - 2\Delta U_{d.ст}, \quad (104)$$

где  $\Delta U_{d.ст}$  - падение напряжения на одном вентиле выпрямителя при  $I_{я}=I_{СТ}$ , А;  $I_{2СТ}$  – ток в линиях питания ТП в режиме стопорения двигателя, А.

Сопротивление потенциометра  $r_{ПТ}$  выбирается для тока, несколько меньшего, чем длительно допустимый для выпрямителя UZ [10,11].

Узел токоограничения начинает работать после того, как ток якоря превысит значение  $I_{СР}$ , при котором напряжение на выходе выпрямителя UZ

$$U_{d.ср} = 2,34 \frac{I_{ср}}{I_{я.н}} U_{2T} - 2\Delta U_{d.ср}, \quad (105)$$

где  $\Delta U_{d.ср}$  - падение напряжения на вентиле выпрямителя при  $I_{я}=I_{СР}$ , В.

Значение  $\Delta U_{d.ср}$  является одной из величин, по которым выбирается из каталога стабилитрон VD (см. рис. 20); второй величиной будет максимальный ток во входной цепи полупроводникового или операционного усилителя.

Реализация схемы токоограничения по постоянному току, когда датчиком тока является шунт, представлена на рис. 21.

Сигнал обратной связи по току определяется разностью  $U_{OT}=K_m I_{к}-U_{СР1}$ , где  $U_{СР1}$  - напряжение сравнения в НЗ1 – напряжение пробоя стабилитрона VD. Он должен уравниваться напряжением задания на вход контура тока, которое

равно  $U_3$ . Тогда напряжение сравнения

$$U_{CP1} = K_m I_k - U_3. \quad (106)$$

Значение коэффициента обратной связи по току  $K_T$

$$K_T = \frac{U_k}{I_k}, \quad (107)$$

где  $I_k$  – критический ток, ток отсечки, А;  $U_k$  – напряжение на ТП, соответствующее критическому току, В. Стабилитрон VD на рис. 21 выбирается из каталога (приложение И) по величине максимального тока во входной цепи операционного усилителя и используется в качестве элемента сравнения напряжения  $U_{CP1}$ .

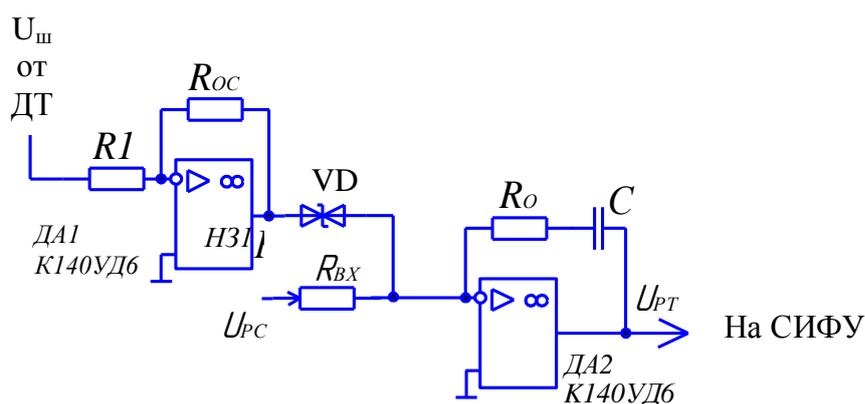


Рисунок 21 – Реализация схемы токоогораничения по постоянному току

На рис. 20 и 21 приняты следующие обозначения: ТА - трансформатор тока с коэффициентом трансформации  $K_{ТА}$ ; UZ - выпрямительный мост;  $R_{oc}$  - резистор обратной связи усилителя ДА1; R1 - входной резистор; VD - стабилитроны, реализующие напряжение сравнения  $U_{CP1}$ ; ДА1,2 - полупроводниковый усилитель, на котором реализуется регулятор тока типа ПИ-регулятора;  $R_{вх}$  - входной резистор.

### 3.3.5 Расчет регулятора положения и выбор датчика [8,15]

В следящем электроприводе при исследовании динамики необходимо выбрать датчик положения и регулятор в III контуре – регулятор положения, а также определить напряжение задания для СЭП  $U_{3,СЭП}$  и передаточную функцию редуктора.

Передаточной функцией датчика положения целесообразно задаться, приняв его в качестве усилительного звена с коэффициентом преобразования

$$K_{ДП} = U_{ДП} / l \quad (108)$$

в соответствии с приложением Е.

Передаточная функция редуктора  $W_p(p)$  является передаточной функцией интегрирующего звена

$$W_p(p) = K_p / p, \quad (109)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи редуктора,  $K_p = 1/U_p$ ;  $U_p$  – передаточное число редуктора.

Регулятор положения целесообразно выбирать с пропорциональным законом регулирования

$$W_{РП}(p) = K_{РП}. \quad (110)$$

Его значение выбирается из выражения статической погрешности:

$$\sigma_{ст.СЭП} = l_3 / 1 + K_V, \quad (111)$$

где  $l_3$  – заданное значение линейного перемещения рабочего органа; коэффициент

передачи по скорости -  $K_V = \prod_{i=1}^n K_i$ , где  $\prod_{i=1}^n K_i = K_{РС} K_{РТ} K_{РП} K_{ТП} K_{Д} K_{Р} K_{ДП}$ .

Отсюда

$$K_{РП} = \frac{l_3 - \sigma_{ст.СЭП}}{\sigma_{ст.СЭП}} / K_{РС} K_{РТ} K_{ТП} K_{Д} K_{Р} K_{ДП}. \quad (112)$$

Напряжение задания для СЭП определится из соотношений:

$$U_{з.СЭП} = \frac{U_{з.РЭП}}{K_{РП}} \quad (113)$$

или 
$$U_{з.СЭП} = \frac{U_{з.РЭП}}{K_{РП}} - K_{ДП} l_3. \quad (114)$$

### 3.4 Динамика САУ РЭП (СЭП)

Целью исследования динамики является определение качества регулирования параметров  $i(t)$ ,  $\varphi(t)$  в переходных процессах, возникающих при изменении:

- задающего напряжения  $U=10$  В при отсутствии нагрузки - пуск вхолостую ( $I_{ДВ}=I_{ХХ}=(0.1 \dots 0.15)I_{Н}$ );

- приложенной нагрузки - наброс нагрузки ( $I_{ДВ}=I_H$ );
- снятии нагрузки ( $I_{ДВ}=I_{ХХ}$ );
- снижении в два раза  $U_3$  - в режиме генераторного торможения.

Оценка качества регулирования и устойчивости осуществляется прямым способом по кривой переходных режимов.

Для построения этих кривых [ $i(t)$ ,  $w(t)$ ,  $\varphi(t)$ ] необходимо выполнить следующие этапы [4,6].

### **3.4.1 Структурная оптимизация САУ ЭП**

Оптимизация контуров управления САУ ЭП осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в приложении К и в работе [20].

Расчет осуществляется в соответствии с идеей технического оптимума для астатических систем 1-го порядка (систем однократного интегрирования). Сущность его сводится к предварительному определению структуры регуляторов тока и скорости, исходя из оптимального аperiodического процесса для скорости с соотношением постоянных времени интегрирующих звеньев в желаемой передаточной функции разомкнутой САУ РЭП, равным:  $T_{и}/T_{ап}=2$ .

В результате оптимизации получают передаточные функции регуляторов изменяемой части, в качестве которых выступают регулятор тока (как правило, ПИ – регулятор) и регулятор скорости (как правило, П – регулятор).

### **3.4.2 Составление структурной схемы в соответствии с полученным порядком астатизма**

Системы управления электроприводом включают регулируемый электропривод (РЭП) и следящий электропривод (СЭП), который реализуется из РЭП при организации обратной связи по положению.

РЭП используется для реализации электроприводов главного движения в металлорежущих станках, СЭП - для реализации электроприводов подач режущего инструмента или стола с обрабатываемой деталью.

Основными параметрами РЭП, для которых рассчитываются переходные процессы, является сила тока  $i(t)$  в 1-м контуре и угловая скорость  $\omega(t)$  или частота вращения  $n(t)$  во 2-м контуре. В СЭП переходной процесс строится для положения рабочего органа – углового  $\varphi(t)$  или линейного  $l(t)$  перемещения (в 3-м контуре).

Для РЭП основным регулирующим параметром является угловая скорость  $\omega$ , подчиненным - сила тока  $i$ . Для СЭП основным параметром является положение рабочего органа  $\varphi$  или  $l$ , подчиненным –  $\omega$  и  $i$ .

Структурная схема РЭП представлена на рис. 22, а структурная схема СЭП - на рис. 23.

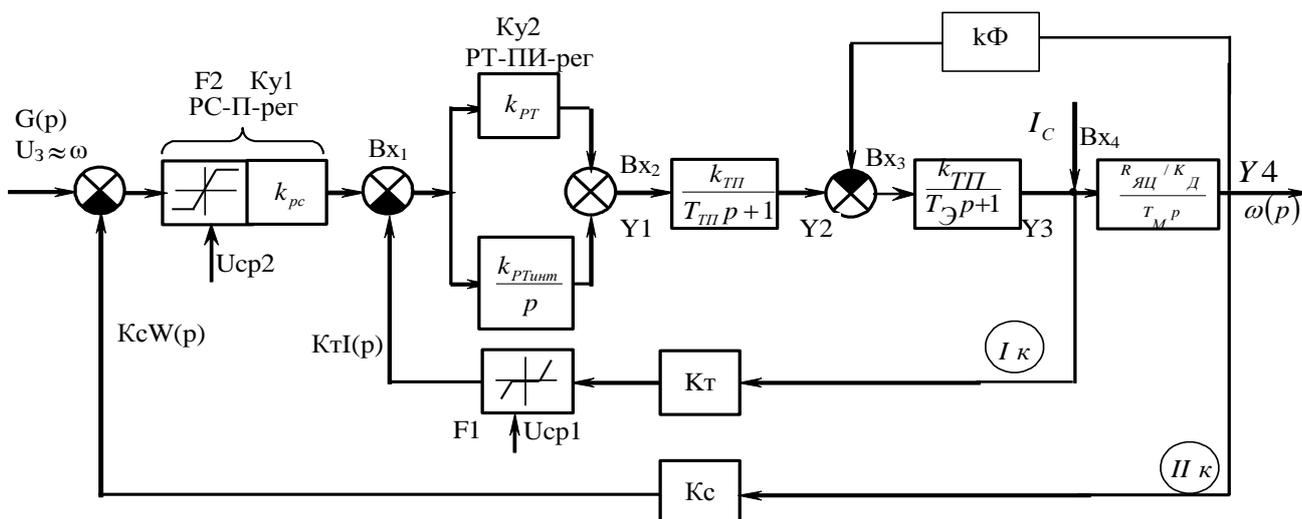


Рисунок 22 – Двухконтурная структурная схема РЭП

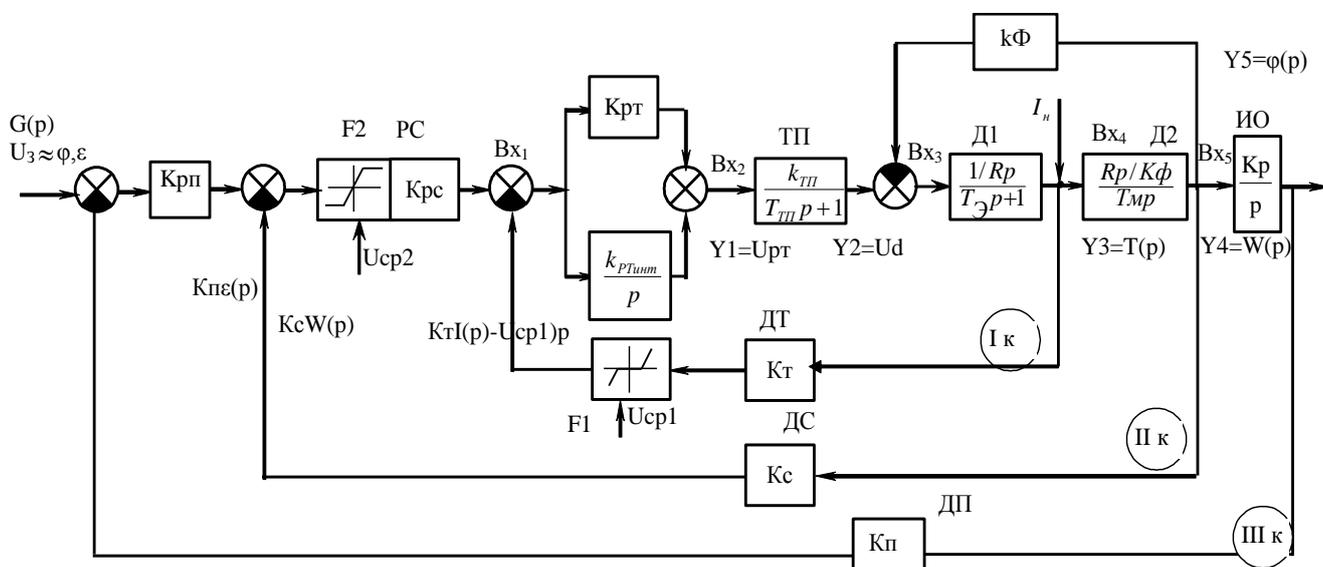


Рисунок 23 – Трехконтурная структурная схема СЭП

На рис. 22 и 23 приняты следующие обозначения:  $Vx_i$  – входные сигналы,  $y_i$

– выходные сигналы динамических звеньев;  $I_k, P_k, \Pi_k$  – контуры регулирования соответственно: контур тока и скорости - зона нечувствительности и зона насыщения соответственно;  $K_T, K_C, K_P$  – коэффициенты преобразования измерительных преобразователей в контурах тока, скорости и положения соответственно; РТ - регулятор тока пропорционально-интегральный; РС – регулятор скорости пропорциональный; РП – регулятор положения пропорциональный.

На приведенных структурных схемах выделяются и идентифицируются динамические звенья, содержащие  $P$  в знаменателе передаточной функции. В соответствии с этим обозначаются входные ( $V_{x_i}$ ) и выходные ( $y_i$ ) сигналы на этих звеньях. РЭП содержит по четыре входных и выходных сигнала, СЭП – по пять.

### 3.4.3 Расчет переходных процессов в РЭП [ $\omega(t), i(t)$ ] и в СЭП [ $\omega(t), \varphi(t)$ или $l(t)$ ]

Переходный процесс по определенному параметру представляет собой графическое решение дифференциального уравнения, описывающего движение исследуемой системы по соответствующей координате. В этой связи переходные процессы по току и скорости в регулируемом электроприводе могут рассчитываться на основе решения соответствующих дифференциальных уравнений, составленных на основе электрического баланса (для силы тока) и уравнения моментов (для скорости) [1-4]:

$$E_{ТП} = E_d + i_{я} R_{я.ц} + E_3 = k\Phi\omega + iR_{я.ц} + L_{я} \frac{i}{dt}. \quad (115)$$

Переходя к приращениям и учитывая, что  $L_{я} = T_{э} R_{я}$ , после соответствующих преобразований получаем:

$$D_i = \left( \frac{E_{ТП}}{R_{я.ц}} - \frac{k\Phi\omega}{R_{я.ц}} - i_{я} \right) \frac{Dt}{T_{э}}, \quad (116)$$

$$M_{ДВ} = M_{СТ} + M_{Д}, \quad (117)$$

$$k\Phi i_{я} = k\Phi I_{СТ} + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (118)$$

После некоторых преобразований, находим:

$$\Delta\omega = \frac{i_{я} - I_{CT}}{J} k\Phi\Delta t, \quad (119)$$

где  $J$  – момент инерции привода,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .

Выражения (115) и (118) представляют собой дифференциальные уравнения в приращениях для силы тока и угловой скорости соответственно. Решение этих выражений позволяет получить кривые изменения силы тока  $i(t)$  и угловой скорости во времени  $\omega(t)$ .

В выражении (116) важным параметром является ЭДС преобразователя  $E_{тп}$ , величина которой и ее поведение определяется действием соответствующих обратных связей по току и скорости (64), (65), (66).

Изменение  $E_{тп}$  определяет характер переходного процесса.

#### **3.4.4 Составление дифференциальных уравнений в форме Коши и уравнений связи**

Математической основой расчета является система дифференциальных уравнений, описывающих САУ ЭП, записанных в форме Коши [4, 20]:

$$\begin{cases} Y'1 = \int I(Y1, \dots, Yn, x), \\ Y'n = n \int n(Y1, \dots, Yn, x) \end{cases} \quad (120)$$

при  $Y_1(0) = \tilde{Y}, Y_2(0) = \tilde{Y}_2 \dots Yn(0) = \tilde{Y}n$ , где  $Y'1, Y'2, \dots, Y'n$  – координаты САУ;  $n$  – порядок системы дифференциальных уравнений;  $x$  – аргумент (время).

Система дифференциальных уравнений составляется на основе структурной схемы (см. рис. 23). На структурной схеме входные и выходные параметры звеньев, в знаменателе передаточных функций которых содержится оператор дифференцирования  $P$ , обозначают через  $X_{вх}$  и  $Y$  с числовыми индексами.

Входным параметрам присваивается индекс, на единицу больший индекса предыдущего выходного параметра. Выходным параметрам в качестве индекса присваивается степень оператора в знаменателе передаточной функции, начиная с первого звена. В последующих звеньях индекс увеличивается на величину степени оператора  $P$ .

Нелинейные звенья Н31 и Н32 в соответствующих контурах представляют-

ся в виде функции

$$Y=F(x). \quad (121)$$

В результате система дифференциальных уравнений для рассматриваемой структуры имеет вид, показанный в табл. 6.

Таблица 6 – Структура дифференциальных уравнений

$W(p)_i$	Дифференциальные уравнения
$K_i/p$	$PY_i=K_iVx_i$
$K_i/1+T_{ip}$	$PY_i=(K_iVx_i-y_i)/T_i$
$B_1+B_0P$	$PY_i=(\beta Vx_i-T_i y_i+1)/T_{i+2}^2$
$1+T_i p+T_{i+1}^2 P^2$	$P y_{i+1}=y_i \beta Vx_i; \beta_1=b_0/T_{i+1}^2; \beta_2=b_1-b_2$

Входные параметры  $Vx_i$  описываются следующими алгебраическими уравнениями:

$$Vx_1=F_1[K_{PC}(U_3-K_C Y_{II})]-F_2[K_T(Y_3-I_C)]; \quad (122)$$

$$Vx_2=K_{PT}Vx_1+Y; \quad (123)$$

$$Vx_3=Y_2-k\Phi Y_{II}; \quad (124)$$

$$Vx_4=Y_3-I_C. \quad (125)$$

Приведенные системы дифференциальных и алгебраических уравнений полностью описывают динамику САУ ЭП и используются в расчетах переходных процессов  $\omega(t)$  в астатической системе 1-го порядка.

Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП детально изложена в работе [20], необходимо следовать ей.

### 3.4.5 Составление таблицы исходных данных для моделирования динамики САУ ЭП

Таблица исходных данных (табл. 7) составляется по результатам предыдущих расчетов и содержит все данные для моделирования динамики РЭП, используя прикладные программные средства (MATHLAB Simulink, «РЭП–СЭП»).

На рис. 24 представлены кривые переходных процессов силы тока  $i(t)$  и угловой скорости  $\omega(t)$  в регулируемом электроприводе в различных режимах при пуске без нагрузки ( $i_{\text{дин}}, I_{\text{X.X}}, W_{\text{X.X}}$ ), при набросе нагрузки, при снятии нагрузки ( $i_{\text{X.X}}, W_{\text{X.X}}$ ), при торможении ( $i_{\text{T}}, i$ ). Кривые переходных процессов обрабатываются с целью определения временных (время пуска – длительность переходных процессов при пуске  $t_{\text{п.п}}=(3...4)T_{\text{м}}$ , длительность переходных процессов при набросе и торможении) и точностных ( $\delta_{\text{дин}}, \delta_{\text{СТ}}$ ) показателей. Отрицательные значения силы тока при пуске и торможении вызываются режимом генераторного торможения.

Таблица 7 - Исходные данные для расчетов астатической САУ РЭП

№	Параметр	Единица	Иденти-	Наименование
1	$t_{\text{п.п}}$	-	T	Время переходного процесса $T=(3...4)T_{\text{м}}$
2	$K_{\text{РС}}$	-	$K_{\text{РС}}$	$K_{\text{ПУ2}}$
3	$K_{\text{РТ}}$	-	$K_{\text{РТ}}$	$K_{\text{ПУ1}}$
4	$K_{\text{РТ.ИНТ}}$	-	$K_{\text{РТ.ИНТ}}$	Коэффициент передачи интегрирующей части регулятора тока
5	$K_{\text{ТП}}$	-	$K_{\text{ТП}}$	Коэффициент передачи ТП
6	$T_{\text{ТП}}$	-	$T_{\text{ТП}}$	Постоянная времени ТП
7	$K_{\text{Д1}}$	1/Ом	$K_{\text{Д1}}$	Коэффициент передачи Д1 - $K_{\text{Д1}}=1/R_{\text{ЯЦ}}$
8	$T_{\text{Э}}$	с	$T_{\text{Я}}$	Электромагнитная постоянная
9	$K_{\text{Д2}}$	В/рад	$K_{\text{Д2}}$	Коэффициент передачи Д2 - $K_{\text{Д2}}= R_{\text{ЯЦ}}/K_{\text{Фн}}$
10	C	Вс	$K_{\text{Фн}}$	Коэффициент ЭДС
11	$K_{\text{T}}$	В/А	$K_{\text{РТ}}$	Коэффициент обратной связи по току
12	$K_{\text{С}}$	В/с <sup>-1</sup>	$K_{\text{ОС.НЕОБХ}}$	Коэффициент обратной связи по скорости
13	$U_3$	В	$U_3$	Напряжение задания $\leq 10$ В
14	$I_{\text{с}}$	А	$I_{\text{с}}$	Статический ток нагрузки (0,1-0,15) $I_{\text{н}}$
15	$U_{\text{РТ.ИНТ}}=U_1$	В	$U_{\text{РТ}}$	Выходное напряжение с интегрирующей части ПИ-регулятора
16	$E_{\text{п}}=U_2$	В	$E_{\text{п}}$	ЭДС ТП
17	$I=U_3$	А	$i$	Сила тока
18	$\omega=U_4$	с <sup>-1</sup>	$\omega$	Угловая скорость
19	$U_{\text{СР1}}$	В	$U_{\text{СР1}}$	Напряжение сравнения в НЗ1
20	$U_{\text{СР2}}$	В	$U_{\text{СР2}}$	Напряжение сравнения в НЗ2

При расчете переходных процессов в СЭП в таблицу исходных данных добавляются следующие параметры:

$K_{рп}$  – коэффициент усиления регулятора положения;

$K_{п}$  – коэффициент усиления обратной связи по положению;

$U_{з,сэп}$  – напряжение задания для СЭП.

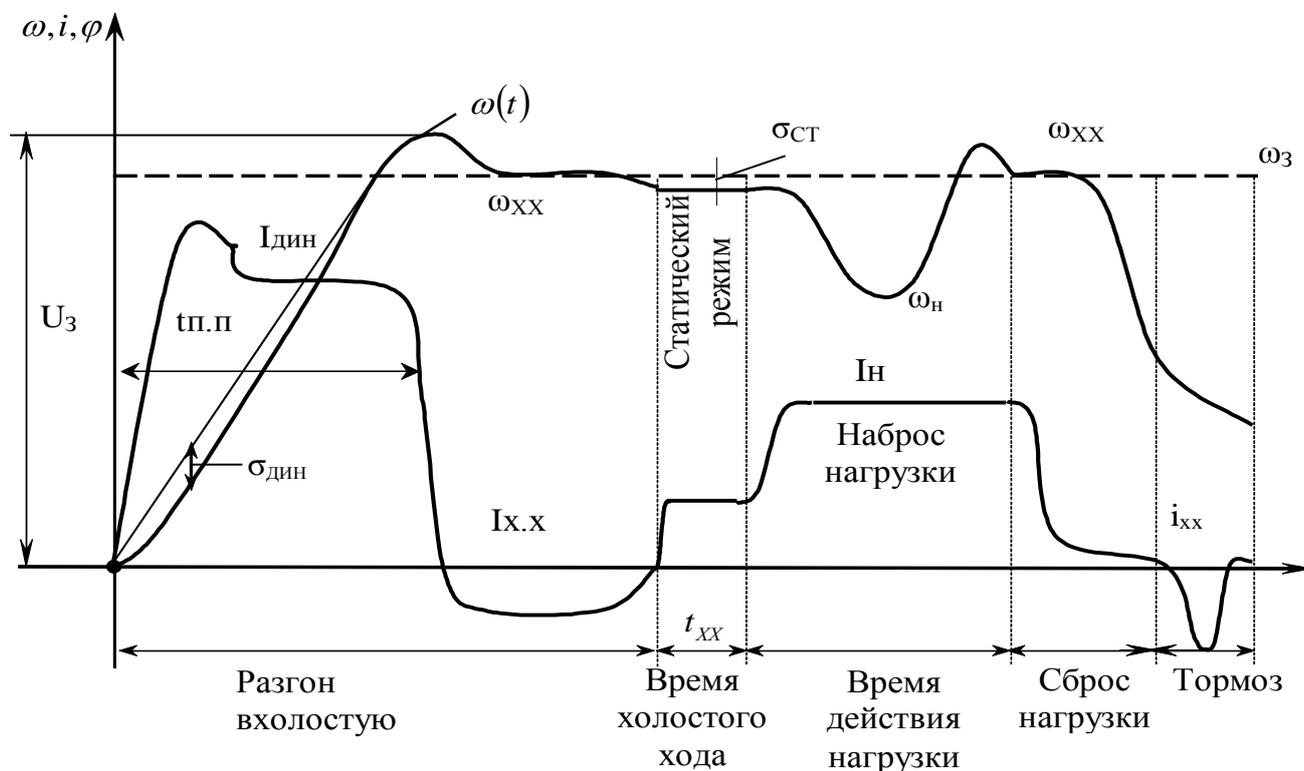


Рисунок 24 – Характер переходных процессов по току и скорости в астатической САУ РЭП

По полученным расчетным данным (табличным распечаткам) осуществляется построение кривых переходных процессов по току  $i(t)$ , скорости  $\omega(t)$  и положению  $l(t)$  для СЭП (рис. 25).

На рис. 25 представлены кривая переходного процесса в следящем электроприводе по угловой скорости  $\omega(t)$  и кривая переходного процесса по положению  $L(t)$ . Кривые обрабатываются с целью определения временного ( $t_{п.п}$ ) и точностного ( $\delta_{сэп}$ ) показателей качества регулирования.

Кривые переходных процессов обрабатываются известным способом с целью определения временных и точностных оценок качества регулирования.

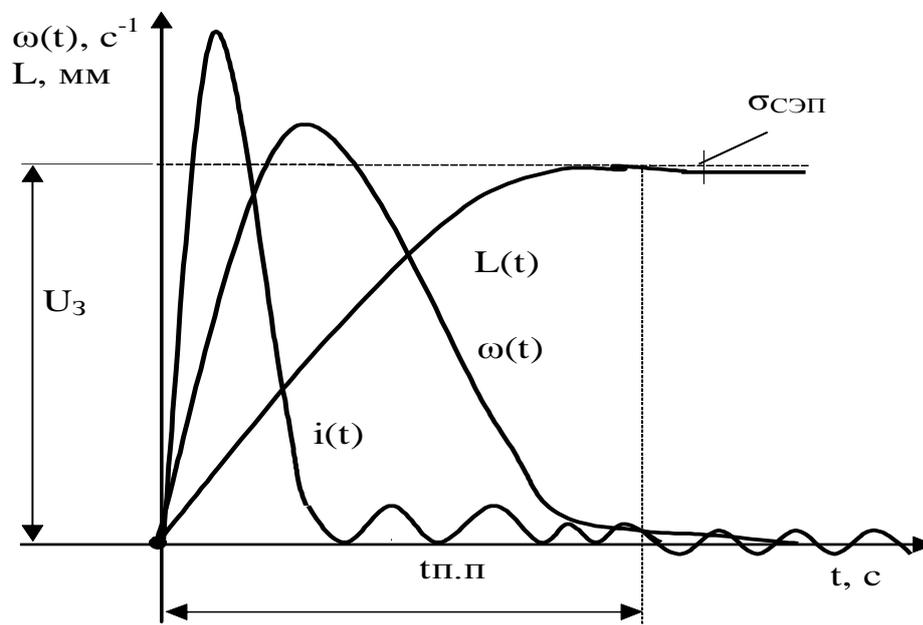


Рисунок 25 – Характер переходных процессов по скорости и по положению в СЭП

Расчеты с применением программы «РЭП–СЭП» (priv3.exe) производятся в соответствии с алгоритмом, представленном в табл.8.

### 3.4.6 Оценка качества регулирования в различных режимах работы

Полученные кривые переходного процесса в РЭП ( $\omega(t)$  и  $i(t)$ ) и в СЭП ( $\omega(t)$  и  $l(t)$ ) (см. рис. 24 и 25) обрабатывают по известной из курса ТАУ методике [12].

Таблица 8 – Алгоритм пользования программой «РЭП–СЭП» (priv3.exe)

Клавиша	Назначение	Вид экрана	
		до выполнения	после выполнения
1	2	3	4
1 Priv3.exe Enter	Загрузка программы priv3.exe	ОС DOS	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП
2 Enter	Начало расчета переходного процесса в регулируемом электроприводе	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП <input type="checkbox"/> Запуск программы Просмотр графика Просмотр таблицы Печать графика Печать таблицы Выход

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
3 Enter Деулин Б.Н АПП00-1 Enter	Ввод имени пользователя, запуск программы	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП <input type="checkbox"/> Запуск программы Просмотр графика Просмотр таблицы Печать графика Печать таблицы Выход	Рисунок
4 Enter, ...	Ввод времени пере- ходного процесса	Рисунок	$T_{кон}$ 10.000
Аналогично п.4 вводятся все коэффициенты			
5 F5	Расчет переходного процесса	Рисунок с введен- ными значениями коэффициентов	<input type="checkbox"/> Ждите <input type="checkbox"/> pppppppp Графики $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ $y(1)=\text{Число1}$ $y(2)=\text{Число2}$ $y(3)=\text{Число3}$ $y(3)=\text{Число3}$
6 Любая клавиша	Возврат в основное меню	Графики $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ $y(1)=\text{Число1}$ $y(2)=\text{Число2}$ $y(3)=\text{Число3}$ $y(3)=\text{Число3}$	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП
7 Enter	Продолжение работы с РЭП	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП <input type="checkbox"/> Запуск программы Просмотр графика Просмотр таблицы Печать графика Печать таблицы Выход
8 Enter	Просмотр графика с сохранением его в файле GRAPH.CAU	<input type="checkbox"/> Запуск программы	<input type="checkbox"/> Просмотр графика Содержимое фай- ла graph.cau, со- зданного про- граммой
9 Esc или F10	Возврат в основное меню	Содержимое файла graph.cau, создан- ного программой	<input type="checkbox"/> РЭП <input type="checkbox"/> СЭП
Аналогично пп. 7-9 можно просмотреть таблицу			
Аналогично пп. 2-9 производится расчет переходного процесса для сле- дующего электропривода (СЭП)			

Исходя из заданных значений  $\sigma_{СТ}$  определяют допустимый диапазон колебаний  $2\Delta \leq \sigma_{СТ}$  и строят этот диапазон. Временной показатель – длительность переходного процесса  $t_{п.п}$  (в пусковом режиме, в режиме наброса нагрузки и ее снятия, в режиме торможения) определяют из графических построений. Проверяют соотношения:

$$t_{п.п} = (3 \dots 4) T_M; \quad \sigma_{СТ} \leq \sigma_{Зад}.$$

Для РЭП обычно оценивают погрешности по скорости, для СЭП - погрешность по положению рабочего органа.

### **3.5 Проектирование средств сопряжения ЭП и системы управления**

#### **3.5.1 Выбор импульсных (цифровых) датчиков скорости, положения**

Выбор импульсных или цифровых датчиков скорости и положения для осуществления передачи информации о регулируемом параметре в микропроцессорную систему производится в соответствии с табл. Е.2.

#### **3.5.2 Выбор средств сопряжения измерительных преобразователей (ИП) с микропроцессорной системой (МПС)**

Сигналы в САУ ЭП являются аналоговыми и имеют различную форму. ЭВМ, напротив, оперирует с сигналами строго определенными формой и уровнем. В связи с этим встает задача сопряжения, например, САУ РЭП с ЭВМ (рис. 26).

Из ЭВМ код задания передается на регистр-защелку, который поддерживает его постоянным на время преобразования в сигнал управления  $\alpha_p$ . Преобразование осуществляет ЦАП. Далее сигнал поступает на регулятор тока и тиристорный преобразователь, управляющие скоростью двигателя. Скорость двигателя определяется датчиком импульсов, который преобразует скорость вращения ротора двигателя в последовательность импульсов. Количество импульсов данного сигнала подсчитывается счетчиком импульсов, который преобразует его в код  $N_{oc}$  и передает на регистр-защелку и далее в ЭВМ. Все операции записи-чтения синхронизи-

зируются ЭВМ. Полный цикл вычисления производится за время  $T_0$  – период дискретности системы. Регистры-защелки выбираем из серии К555: К555ИР20 – 8-ми разрядный регистр-защелка отображения данных, выходные буферные усилители которого имеют третье Z-состояние.

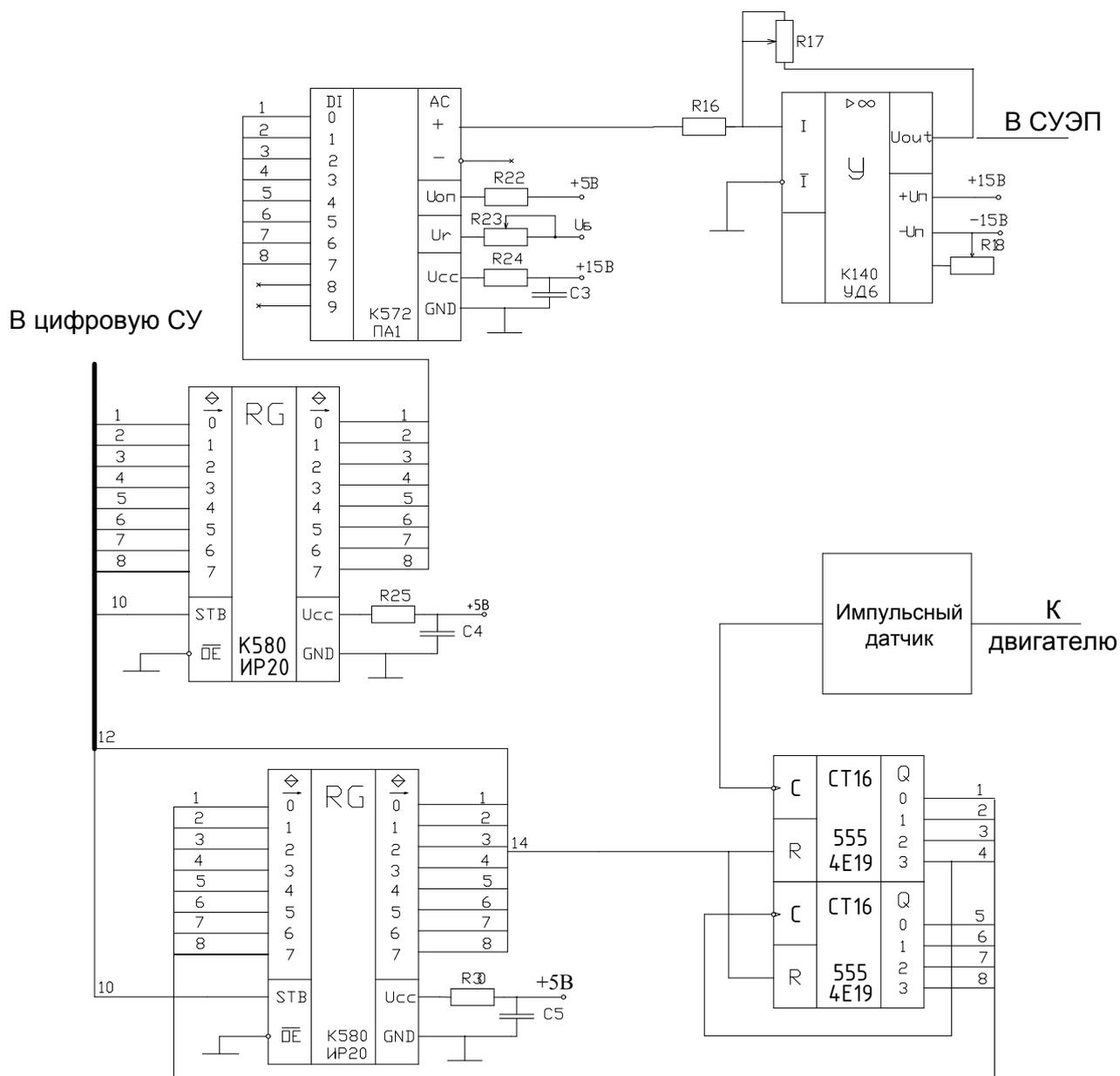


Рисунок 26 – Пример реализации схемы сопряжения РЭП с цифровой системой управления

Разрядность цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) определится:

$$N_{\text{ЦАП}} = \log_2 \left( \frac{2\omega_3}{\sigma_{\text{РЕП}}} \right), \quad (126)$$

где  $\omega_3$  - заданное значение скорости (в относительных единицах);  $\sigma_{\text{РЕП}}$  - заданная статическая погрешность регулирования скорости.

Согласно рассчитанному значению разрядности выбирается интегральный ЦАП.

Для связи микропроцессорной системы с объектом управления применяют цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, которые выбирают в соответствии с приложением Е [20].

Для формирования последовательности импульсов, число которых прямо пропорционально зависит от скорости вращения ротора двигателя, можно использовать датчик импульсов ВЕ-190 с частотой импульсов 600 импульсов на один оборот.

Количество импульсов подсчитывается двумя счетчиками импульсов К555ИЕ19, работающими совместно (при выборе кодового датчика достаточно выбрать регистры). Питание К555ИЕ19 производится от напряжения 5 В. Подсчитанное количество импульсов за период дискретности  $T_o$  счетчик преобразует в код  $N_{oc}$  и передает на регистр-защелку и далее в ЭВМ. Счетчик обнуляется сигналом с ЭВМ, поданным на вход R.

### 3.6 Заключение

В заключении необходимо выполнить следующее:

- 1 Подтвердить выполнение поставленной задачи проектирования.
- 2 Подчеркнуть принятую систему питания спроектированного ЭП и систему управления этим приводом, указать виды обратных связей.
- 3 Привести значения полученного диапазона регулирования, динамической и статической точности, длительности переходных процессов, сравнив их с заданными параметрами.
- 4 Объяснить полученные виды переходных процессов в САУ ЭП.
- 5 Пояснить способ сопряжения аналоговой САУ ЭП с цифровой системой управления локального уровня.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- 1 Зимин Е.Н. Автоматическое управление ЭП / Зимин Е.Н., Яковлев В.И. - М.: Высш.шк., 1979. - 317 с.
- 2 Анхимюк В.Л. Проектирование САУ ЭП / Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф. - М.:Высш.шк.,1986.-442с.
- 3 Коцегуб П.Х. Синтез вентильных приводов постоянного тока. -Донецк: ДПИ, 1983. - 180 с.
- 4 Башарин А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода / Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Келлерман В.Г. - Л.: Энергия, 1972. - 440 с.
- 5 Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов металлообработки. - Киев; Одесса: Вища шк., 1984. - 312 с.
- 6 Михайлов О.П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1989. - 230 с.
- 7 Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 185 с.
- 8 Справочник по преобразовательной технике / Под ред. И.М. Чиженко. - Киев: Техника, 1978.- 370 с.
- 9 Справочник по проектированию силовых и осветительных установок / Под ред. Я.М. Большама и др. - М.: Металлургия, 1974. - 727 с.
- 10 В помощь радиолюбителю: Сборник. - Вып. 109 / Сост. И.Н. Алексеева. - М.: Патриот, 1991.-80 с.
- 11 В помощь радиолюбителю: Сборник. - Вып. 110 / Сост. И.Н. Алексеева. - М.: Патриот, 1991. - 62 с.
- 12 Проектирование систем автоматического управления электроприводами: Учеб. пособие для вузов. - Минск: Высшейш.шк. 1986. – 230 с.
- 13 Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / Под ред. Е.А.Санковского.- Минск: Высшейш.шк., 1973. - 584 с.
- 14 Шварцбург Л.Э. Информационно-измерительные системы приводов металлорежущих станков. - М.: Станки, 1991. - 181 с.

- 15 Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. - М.: Энергия, 1983. - 616 с.
- 16 Электротехнический справочник /Под ред. П.Г. Груднинского и др. - М.: Энергия, 1972. - Т.2, кн.2. - 815 с.
- 17 Тихомиров В.М. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ. - М.: Машиностроение, 1980. -350 с.
- 18 Остром К. Системы управления с ЭВМ / Остром К., Витенмарк Б. - М.: Мир, 1987. - 250с.
- 19 Файнштейн В.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. - М.: Машиностроение, 1986. - 78с.
- 20 Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Автоматизированный электропривод» (для студентов специальности 7.092501)/Сост. О.В. Субботин. - Краматорск: ДГМА, 2006. – 32 с.

## Приложение А

### Образец титульного листа и штампа

#### А.1 Титульный лист пояснительной записки курсового проекта

Министерство образования и науки Украины  
ДГМА  
Кафедра АПП

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к курсовому проекту по дисциплине  
"Автоматизированный электропривод"  
Вариант №

Выполнил:

ст. гр.

Проверил:

\_\_\_\_\_ Ф.И.О.

\_\_\_\_\_ Ф.И.О.

Краматорск 2010

#### А.2 Образец штампа пояснительной записки

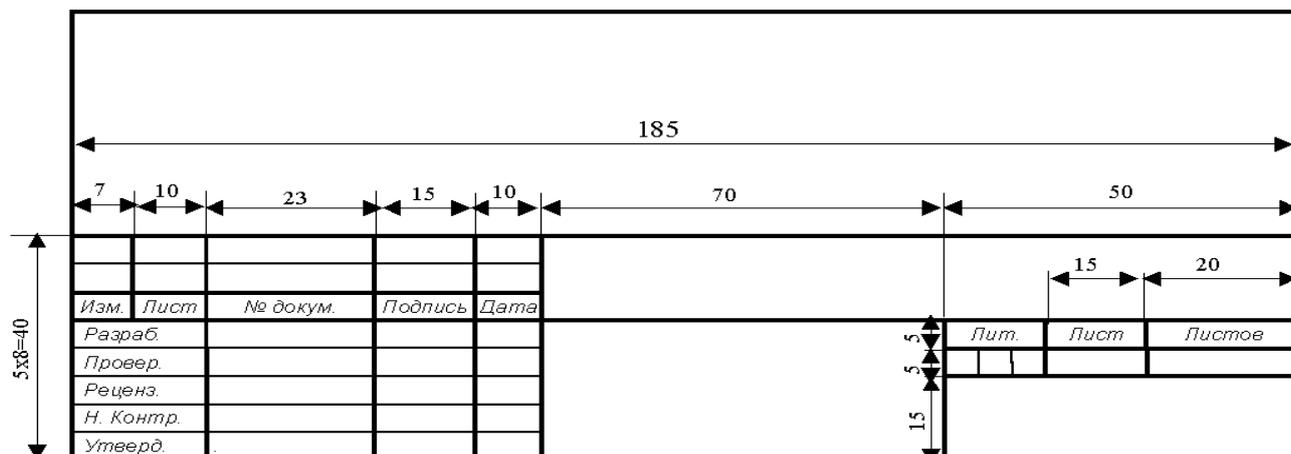


Рисунок А.1 – Основная надпись для текстовых документов по форме 2

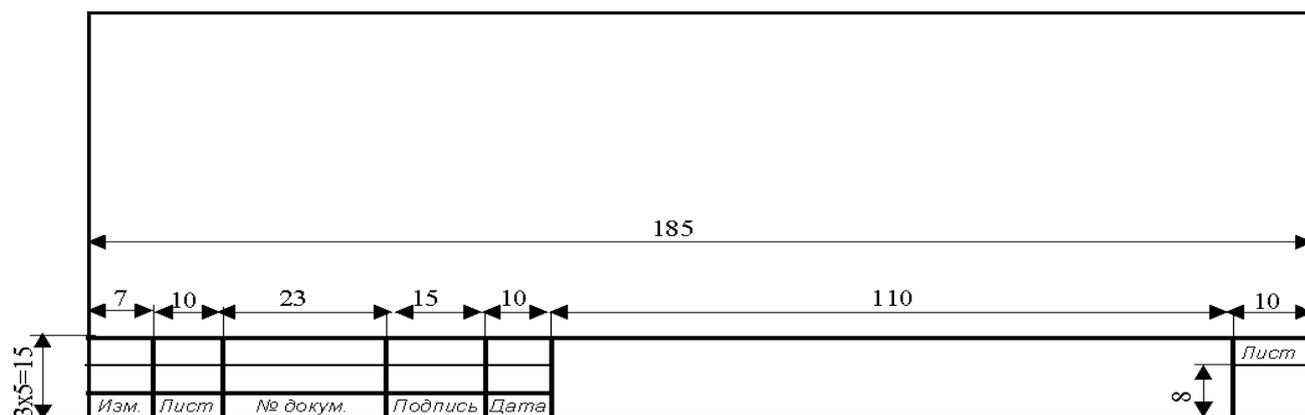


Рисунок А.2 – Основная надпись для текстовых документов, чертежей и схем по форме 2а

## Приложение Б (справочное)

Технические характеристики электродвигателей постоянного тока типа ПН [15]

Тип электро- двигателя	Номинальные			Частота вращения, об/мин		КПД, %	Максимальная мощность возбуждения, Вт	Сопротивление при 15 <sup>0</sup> С, Ом		Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>			
	мощность, кВт	напряжение якоря, В	сила тока якоря, А	номинальная	максимальная			якоря	дополнительных полюсов				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
2ПН-180М	15,0	220	76,50	1500	4000	85,5	660	0,084	0,056	0,2			
		440	38,1	1500	3500	86,0		0,338	0,221				
	26,0	220	130,0	2240	3500	88,0	745	0,038	0,025				
440		64,5	2240	3500	88,5	0,15		0,092					
2ПН-180L	37,0	220	185,0	3000	3500	89,0	580	0,022	0,015	0,229			
		440	91,8	3150	3500	89,5		0,084	0,056				
	7,1	220	37,6	750	2500	80,0	786	0,26	0,183				
440		18,7	750	1850	80,5	1,06		0,67					
2ПН-200М	10,0	220	52,5	1000	3000	83,5	595	0,168	0,11	0,25			
		440	26,0	1000	2500	83,5		0,585	0,462				
	18,5	220	93,50	1500	3500	87,0	800	0,065	0,044				
440		47,0	1600	3500	87,5	0,26		0,183					
2ПН-200L	30,0	440	74,6	2200	3500	89,0	1045	0,136	0,084	0,3			
		440	104,0	3000	3500	90,5		0,065	0,044				
	8,5	220	44,5	800	2500	82,0	670	0,188	0,116				
440		22,2	800	1850	82,0	0,796		0,506					
2ПН-225М	13,0	220	67,0	1120	3000	85,0	690	0,106	0,061	0,525			
		440	33,4	1000	2500	84,5		0,485	0,303				
	22,0	220	111,0	1500	1500	87,5	870	0,047	0,029				
440		55,6	1500	3500	87,5	0,246		0,13					
2ПН-100L	36,0	220	181,0	2200	3500	88,5	1149	0,026	0,016	0,012			
		440	89,7	2200	3500	89,5		0,106	0,061				
	60,0	440	149,0	3150	3500	90,5	1000	0,047	0,029				
440		184,0	3150	3500	91,5	—		—					
2ПН-100L	11,0	220	57,0	800	2500	84,0	92	0,125	0,08	0,012			
		440	28,3	750	1850	83,5		0,565	0,393				
	16,0	220	82,0	1000	3000	86,0	124	0,083	0,053				
440		41,0	1000	2500	86,0	0,343		0,224					
2ПН-180М	30,0	220	150,0	1500	3500	88,5	173	0,031	0,02	0,2			
		440	74,5	1600	3500	89,5		0,185	0,08				
	53,0	440	131,0	2360	3500	90,5	—	0,055	0,037				
440		184,0	3150	3500	91,5	0,031		0,02					
2ПН-100L	7,5	220	40	500	1500	77,0	1000	—	—	0,525			
	11	220	58	600	1800	79,0							
	15	220	80	750	2500	80,5							
	22	220	94	1000	2500	82,5							
2ПН-100L	0,42	220	2,75	750	1500	61,5	92	7,87	6,2	0,012			
	0,63	220	3,88	1060	2000	67,0					124	2,2	1,57
	1,10	220	6,81	1500	4300	74,0							
	1,70	220	9,29	2200	4000	78,0					1,17	0,853	
2,20	220	11,80	3150	4000	81,0	0,52	0,51						
2ПН-180М	12,0	220	61,4	3350	3500	87,5	173	0,038	0,025	0,2			
		440	30,2	3000	3500	88,5		0,181	0,122				

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2ПН-112М	0,60	220 440	3,9 2,0	800 750	2500 1850	60,5 59,0	157	5,07 23,6	4,5 19,8	0,014	
	0,85	220 440	5,3 2,7	950 1060	3500 2500	64,0 65,0			3,85 13,7		3,08 12,7
	1,50	220 440	8,80 4,3	1500 1600	4000 3750	70,0 72,0	202	1,77 405	1,55 5,26		
	2,5	220 440	13,8 6,9	2200 2360	4000 4000	76,0 76,5	236	0,788 3,12	0,682 2,69		
	3,60	220 440	19,3 9,7	3000 3000	4000 4000	79,0 79,0	284	0,42 1,77	0,356 1,55		
2ПН-112L	0,80	220 440	5,06 2,52	750 750	2500 1850	63,5 63,0	156	3,68 17,2	3,42 13,9	0,017	
	1,25	220 440	7,45 3,75	1000 1000	3500 2500	68,0 68,0	181	2,34 9,55	2,04 8,34		
	2,20	220 440	12,30 6,10	1500 1600	4000 3750	75,0 76,0	218	0,968 3,68	0,848 3,42		
	3,40	220 440	18,30 9,00	2240 2240	4000 4000	79,0 79,5	293	0,413 1,73	0,411 1,51		
	5,30	220 440	27,70 13,60	3000 3000	4000 4000	81,5 81,5	380	0,242 0,968	0,195 0,848		
2ПН-132М	1,60	220 440	9,40 4,70	750 750	2500 1850	68,5 69,0	274	1,88 8,45	1,39 4,96	0,038	
	2,50	220 440	14,20 7,20	1000 1000	3000 2500	73,5 73,0			1,08 4,54		0,763 3,26
	4,00	220 440	21,80 10,90	1500 1500	4000 3750	79,0 79,0	290	0,564 2,28	0,336 1,44		
	7,00	220 440	36,70 18,40	2240 2240	4000 4000	83,0 83,0	352	0,226 0,906	0,166 0,692		
	10,5	220 440	54,70 27,10	3000 3000	4000 4000	84,5 85,0	367	0,14 0,564	0,094 0,336		
2ПБ-180L	4,2	220 440	22,2 11,0	750 750	2500 1850	81,5 82,0	260	0,378 1,69	0,263 0,981	0,229	
	5,6	220 440	29,2 14,4	1000 1000	3000 2500	84,0 84,5			0,260,99		0,183 0,644
	8,5	220 440	43,0 21,6	1600 1500	3500 3500	87,5 87,5			0,094 0,44		0,067 0,326
	11,0	220 440	55,6 27,4	2200 2200	3500 3500	89,0 89,5	196	0,065 0,26	0,044 0,183		
2ПБ-200L	6,0	220 440	31,7 15,7	800 800	2500 1850	84,5 84,5	248	0,22 0,925	0,15 0,652	0,3	
	8,0	220 440	40,6 20,4	950 1060	3000 2500	87,5 87,0			0,125 0,565		0,08 0,393
	11,0	220 440	56,2 27,6	1500 1500	3500 3500	88,5 89,0			0,083 0,286		0,053 0,168
	15,0	220 440	75,0 37,5	2360 2360	3500 3500	89,5 90,0			0,031 0,125		0,02 0,08
2ПН-90М	0,17	220	1,32	750	1500	48,5	60	27,2	16,2	0,004	
	0,25	229	1,71	1120	2000	57,0			15,47		11,2
	0,37	220	2,44	1500	4300	61,5			10,61		6,66
	0,71	220	4,26	2360	4000	74,0	77	3,99	2,55		
	1,00	220	5,85	3000	4000	72,0	100	2,52	1,47		

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2ПН-90L	0,22	220	1,53	800	1500	54,5	66	17,5	13,13	0,005
	0,34	220	2,20	1000	2000	60,0		12,2	7,96	
	0,55	220	3,32	1500	4300	67,5	85	5,44	3,89	
	0,90	220	5,06	2120	4000	73,0	108	2,85	1,731	
	1,30	220	7,20	3150	4000	78,0		1,3	0,932	
2ПН-100M	0,37	220	2,50	750	1500	59,5	78	11,78	6,7	0,011
	0,50	220	3,10	1000	2000	66,0		7,05	4,62	
	0,75	220	4,35	1500	4300	71,5	102	3,4	2,05	
	1,20	220	6,75	2200	4000	76,5		1,792	0,93	
	2,00	220	11,0	3000	4000	79,0	130	0,805	0,57	
2ПН-132L	1,9	220	10,9	750	2500	72,0	266	1,28	1,00	0,047
		440	5,5	750	1850	70,5		6,42	4,45	
	3,0	220	16,9	1000	3000	75,5	363	0,88	0,64	
		440	8,3	1000	2500	76,5		3,38	2,16	
	5,5	220	30,40	1500	4000	80,5	411	0,322	0,27	
440		14,6	1600	3750	81,5	1,28		1,00		
8,5	220	44,2	2200	4000	84,0	482	0,167	0,124		
	440	21,9	2240	4000	84,5		0,67	0,445		
2ПН-160M	3,0	220	16,6	750	2500	76,5	280	0,732	0,485	0,084
		440	8,3	750	1850	76,0		3,15	2,21	
	4,5	220	24,2	1000	3000	79,5	340	0,411	0,304	
		440	12,1	950	2500	79,0		1,78	1,44	
	7,5	220	39,20	1500	4000	83,0	448	0,183	0,135	
440		19,4	1500	3750	84,0	0,732		0,485		
13,0	220	66,5	2120	4000	85,5	596	0,081	0,056		
	440	33,0	2360	4000	86,5		0,279	0,175		
18,0	220	92,0	3150	4000	87,0	690	0,037	0,024		
	440	45,5	3150	4000	87,5		0,145	0,101		
2ПН-160L	4,0	220	21,8	800	2500	78,5	314	0,486	0,389	0,104
		440	10,9	750	1850	78,5		2,02	1,8	
	6,3	220	33,4	1000	3000	81,5	410	0,278	0,196	
		440	16,6	1060	2500	82,0		0,985	0,842	
	11,0	220	56,00	1500	4000	85,5	564	0,096	0,073	
440		28,0	1600	3750	85,5	0,385		0,364		
16,0	220	80,5	2360	4000	86,5	730	0,044	0,031		
	440	40,0	2360	4000	87,5		0,171	0,131		
24,0	220	120,0	3150	4000	88,0	494	0,024	0,017		
	440	59,5	3150	4000	89,0		0,096	0,073		
2ПН-180M	5,6	220	30,0	750	2500	79,0	494	0,338	0,221	0,2
		440	15,0	750	1850	79,4		1,5	0,825	
	8,0	220	41,7	1060	3000	83,0		0,181	0,122	
		440	21,0	1000	2500	82,0		0,902	0,54	

## Приложение В (справочное)

### Технические характеристики электродвигателя постоянного тока серии ПБСТ

Тип электродвигателя	P <sub>н</sub> , кВт	I, А	η, %	J, кг м <sup>2</sup>	Обмоточные данные					
					Число полюсов 2Р	Число парал. ветвей 2а	Сопротивление обмотки якоря при 15 <sup>0</sup> С, Ом	Число витков в обмотке якоря	Число витков в обмотке добав. полюсов (на полюс)	Сопротивление обмотки доб. полюсов при 15 <sup>0</sup> С, Ом
ПБСТ, 220 В, 3000 об/мин										
ПБСТ – 22	1,0	5,4	82	0,014	4	2	1,18	585	92	0,73
ПБСТ – 23	1,35	7,0	85	0,017	4	2	0,705	420	65	0,475
ПБСТ – 32	2,1	10,6	91,5	0,026	4	2	0,42	345	54	0,245
ПБСТ – 33	2,9	14,5	89,5	0,028	4	2	0,26	253	40	0,12
ПБСТ – 42	3,5	17,8	88	0,045	4	2	0,19	250	39	0,0972
ПБСТ – 43	4,8	24,5	88,5	0,056	4	2	0,14	200	31	0,0535
ПБСТ – 52	6,0	30,3	89	0,1	4	2	0,09	189	30	0,052
ПБСТ – 53	8,0	40,0	90	0,11	4	2	0,055	135	21	0,0208
ПБСТ, 220 В, 2200 об/мин										
ПБСТ – 22	0,8	4,4	78,5	0,014	4	2	2,2	756	117	1,07
ПБСТ – 23	1,1	5,8	81,5	0,017	4	2	1,0	504	79	0,84
ПБСТ – 32	1,6	8,2	85,5	0,026	4	2	0,715	460	71	0,32
ПБСТ – 33	2,3	11,7	86,5	0,028	4	2	0,55	345	54	0,232
ПБСТ – 42	2,5	13,2	84	0,045	4	2	0,49	400	62	0,24
ПБСТ – 43	3,5	18	87,5	0,056	4	2	0,254	275	43	0,143
ПБСТ – 52	4,8	24,5	90	0,1	4	2	0,193	270	42	0,078
ПБСТ – 53	6,0	30	89	0,11	4	2	0,112	189	30	0,065
ПБСТ – 62	8,0	40	89,5	0,16	4	2	0,063	175	27	0,0325
ПБСТ – 63	10	50,5	90	0,2	4	2	0,049	145	23	0,0312
ПБСТ, 220 В, 1500 об/мин										
ПБСТ – 42	2,1	11,5	83,1	0,045	4	2	0,925	550	85	0,395
ПБСТ – 43	3,0	16	85,5	0,056	4	2	0,595	400	62	0,208
ПБСТ – 52	4,0	21	86,5	0,056	4	2	0,325	351	55	0,12
ПБСТ – 53	5,3	27,6	87,3	0,11	4	2	0,23	270	42	0,0917
ПБСТ – 62	7,3	37	85	0,16	4	2	0,142	261	40	0,054
ПБСТ – 63	10,0	60	80	0,2	4	2	0,096	203	32	0,0431

## Приложение Г (справочное)

### Технические характеристики согласующих трансформаторов

Тип трансформатора	Мощность трансформатора, Р, кВт	Габаритные размеры, мм			Сечение сердечника, см <sup>2</sup>	Первичная обмотка		Вторичная обмотка			Масса, кг		U <sub>кз</sub>	U <sub>ка</sub>	Потери в меди P <sub>кз</sub> , Вт
		длина	высота	ширина		Напряжение U <sub>1</sub> , В	Число витков	Напряжение U <sub>2</sub> , В	Число витков	размер провода, мм	меди	стали			
ТТ – 6	6	372	360	295	41,8	380/220	177	208±7	84	1,81x5,5	19,1	–	4	не более 5	240
ТТ – 8	8	374	402	390	50	380/220	143	260±8	68	1,81x6,9	21	–	3,2	не более 5	250
ТТ – 11	11	380	410	404	58,2	380/220	126	460±12	60	3,28x5,1	27	63	3	не более 5	330
ТТ – 19	19	400	554	408	75,3	380/220	101	260±8	48	2x(2,6x5,9)	41,6	–	2,1	не более 5	400
ТТ – 14	14	394	458	406	63	380/220	118	208±7	56	3,28x6,9	32,9	80	2,8	не более 5	390
ТТ – 25	25	436	560	415	90	380/220	99	400±12	47	2x(3,28x5,9)	50,9	–	2,0	не более 5	500
ТТ – 32	32	466	574	415	89	380/220	82	180	39	2x(3,28x6,9)	54,9	–	1,98	не более 5	635

## Приложение Д (справочное)

### Технические характеристики тахогенераторов

Серия, тип	Напряжение возбуждения $U_v$ , В	Максимальная скорость вращения $\omega$ , об/мин	Коэффициент преобразования, В/с <sup>-1</sup>	Сопротивление обмотки якоря $R_{я}$ , Ом	Нагрузка (не более)	Сопротивление обмотки возбуждения $R_v$ , Ом	Момент инерции якоря	Частота, Гц	Сопротивление выходной обмотки, Ом	Длина, мм	Высота, мм	Масса, кг
ТГ – 1	110	1100	0,955	430	–		0,7	–	–	134	89	1,86
ТГ – 2	110	2400	0,19	115	–		0,14	–	–	–	–	0,8
ТД – 101	110	1000	0,2	330	0,15	80	0,063	–	–	102	55	0,7
ТД – 102	110	1500	0,48	330	0,1	390	0,063	–	–	102	55	0,7
ТД – 103	110	1500	0,955	710	0,08	710	0,2	–	–	102	55	–
ТД – 201	110	1000	1,24	780	0,1	780	0,24	–	–	102	55	–
СЛ – 161	110	2000	0,19	170	0,1	1770	0,053	–	–	104	55	0,5
СЛ – 261	110	2000	0,24	51	0,1	1400	0,2	–	–	118	74	1,26
ТГИ – 1	–	7000	0,057	–	–	–	–	–	–	–	–	0,15
ТГ – С4	55	3000	–	–	0,022	–	–	–	–	–	–	0,92
МЗТ – 8/55	55	1900	–	–	0,08	–	–	–	–	247	153	13
ЭТ – 4	110	1900	–	–	0,12	–	–	–	–	247	153	13
ЭТ – 7	110	1900	–	–	0,21	–	–	–	–	247	153	13
АТ – 231	110	4000	0,072	–	–	430	–	400	2300	124	74	2,1
АТ – 261	110	4000	0,06	–	–	340	0,017	400	1900	116	74	1,3
ТГ – 4	110	6000	0,096	–	–	–	–	400	–	117	82	1,5
Т7 – 5А	110	9000	0,011	–	–	–	–	400	–	82	55	0,28
АТ – 161	110	4000	0,096	–	–	–	–	400	–	–	–	0,9

## Приложение Е (справочное)

### Технические характеристики измерительных преобразователей положения

Таблица Е.1 - Технические характеристики индуктосинов

Модель	Вид конструкции	Шаг, мм (град)	Частота, Гц	Напряжение питания, В	Коэффициент передачи	Точность
ПИЛП – А2	Линейный	2±0,003	10000±500	0,4±0,1	0,005	3 – 4 мкм
ПИКП1 – А3	Круговой	2°±40'	10000±500	0,6±0,1	0,004	5 – 15
ПЛИ – Н	Линейный	2	–	–	–	Кл. 3,4,5
ПУИ – 18	Круговой	2°	–	–	–	Кл. 3,4

Таблица Е.2 - Технические характеристики фотоэлектрических измерительных преобразователей

Модель	Вид конструкции	Тип	Диапазон перемещения, мм	Разрешающая способность, имп/об (мм, разрядов)	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Класс точности
ВЕ – 5 IB	Круговой	Импульсный	–	1000...5000	100x86	1,6	3;4
ВЕ – 190	— \\ —	— \\ —	–	600...7000	–	1,0	2;3;4
ВЕ – 193	— \\ —	— \\ —	–	100	–	0,75	2
ВЕ – 178	— \\ —	— \\ —	–	600...2500	56x96	0,67	2;3;4
ВЕ – 162	Линейный	— \\ —	250	0,03...0,04 мм	430x80x20	1,24	2
ППК – 15	Круговой	Кодовый	–	15 разрядов	70x168	0,85	2;3

Таблица Е.3 - Технические характеристики вращающихся трансформаторов

Модель	Вид конструкции	Частота, Гц	Напряжение питания, В	Выходное напряжение, В	Число пар полюсов	Ток потребления, мА
ВТМ – 1	Контакт.	400, 900	26	26	1	43
БСКТ – 256	Бесконтакт.	10000	80	18	1	50
БКТ – 1065	-	10000	80	18	5	12
БКСТ - 6465	-	400	27, 36, 40	8,5; 27	32; 1,7	12, 50, 170

## Приложение Ж (справочное)

### Технические характеристики цифровых и аналоговых преобразователей ЦАП и АЦП

Таблица Ж.1 - Характеристики интегральных ЦАП

Тип	Число разрядов	Время установления, мкс	Абсолютная погрешность, %	Опорное напряжение, В	Напряжение источника питания, В	Ток потребления, А
К572ПА1	10	5	±3	±17	5...17	2,0
К572ПА2	12	15	±5	±15	5±5%	2,0
К594ПА1	12	3,5	–	10+3	5...15, 15±10%	25,0 35,0
К1108ПА1	12	0,4	±0,3	2,2...10,5	5±5% – 15±10%	15,0 46,0
К1118ПА2А	10	0,03	±2	– 30	+5,0±5%	15,0

Таблица Ж.2 - Характеристики интегральных АЦП

Тип	Число разрядов	Время установления, мкс	Абсолютная погрешность, %	Диапазон входного напряжения, В	Опорное напряжение, В	Напряжение источника питания, В	Ток потребления, А
К57211В1	12	110...170	±3	0...-	±15	5±5%	3
К1107ПВ1	6	0,1	±0,1	-2...0	-0,075 ... 0 -1,9...-2,1	5±1% -6±1%	30 150
К1108ПВ1	10	0,9	±8	-0,1...4,2	4,096	+5±5% -5,2±3%	50
К1113ПВ1	10	30	±4	-5...+5 0...10	10	5±5% -15	10 20

**Приложение И (справочное)**  
Технические характеристики электронных компонентов

Таблица И.1 - Ряды Е номинальных емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов

Индекс ряда	Номинальные значения (единицы, десятки, сотни ом, килоом, мегаом, пикофард, микрофард, фард)						Допустимое отклонение от номинальных значений, %
	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
<b>Е6</b>	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±20
<b>Е12</b>	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±10
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	±10
<b>Е24</b>	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±5
	1,1	1,6	2,7	3,6	5,1	7,5	±5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	±5
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	±5

Примечание. Конкретные значения сопротивления или емкости получают умножением соответствующих чисел рядов  $10^n$  или  $10^{-n}$ .

Таблица И.2 - Основные параметры выпрямительных диодов

Тип диода	Максимально допустимый прямой ток, А	Максимально допустимое обратное напряжение, В	Постоянное прямое напряжение, В
КД102А	0,1	250	1
КД102Б	0,1	300	1
КД103А	0,1	50	1
КД103Б	0,1	50	1,2
КД105А	0,3	200	1
КД105Б	0,3	400	1
КД105В	0,3	600	1
КД105Г	0,3	800	1
2Д201А	5	100	1
2Д201Б	10	100	1
2Д201В	5	200	1
2Д201Г	10	200	1
КД202А	3,5	50	0,9
КД202С	3,5	600	0,9
КД203А	10	600	1
КД203Д	10	1000	1
КД204А	0,4	400	1,4
КД204Б	0,6	200	1,4
КД204В	1	50	1,4
КД205А	0,5	300	1
КД205Л	0,5	700	1
КД206А	10	400	1,2
КД206Б	10	500	1,2
КД206В	10	600	1,2
КД208А	1,5	100	1
2Д210А	10	800	1
2Д210В	10	1000	1
2Д213А	10	200	1,2
2Д213Б	10	200	1,2

Таблица И.3 - Основные параметры стабилизаторов

Тип	Напряжение стабилизации, В	Ток стабилизации, мА		Макс. допустимый прямой ток, мА	Дифф. сопротивление, Ом
		мин.	макс.		
КС133А	3,3	3	81	50	65
КС139А	3,9	3	70	50	60
КС147А	4,7	3	58	50	56
КС156А	5,6	3	55	50	46
КС162А	6,2	3	22	-	35
КС168А	6,8	3	45	50	28
КС175А	7,5	3	18	-	16
КС182А	8,2	3	17	-	14
КС191А	9,1	3	15	-	18
КС196А	9,6	3	20	-	18
КС210Б	10	3	14	-	22
КС211Б	11	5	33	-	15
2С212В	12	0,5	12	-	24
КС213Б	13	0,5	10	-	25
2С215Ж	15	0,5	8,3	50	70
2С220Ж	20	0,5	6,2	50	70
КС433А	3,3	3	191	-	25
КС447А	4,7	3	159	-	18
КС482А	8,2	1	96	50	25
КС510А	10	1	79	50	25
КС512А	1,2	1	67	50	25
КС515А	15	1	53	50	25

Таблица И.4 - Параметры силовых диодов

Параметр	Силовые диоды							
	ВЛ10	ВЛ25	ВЛ50	ВЛ100	ВЛ200	ВЛ320	ВЛ500	ВЛ1000
Предельный ток $I_n$ , А	10	25	50	100	200	320	500	1000
Ударный ток $I_{уд}$ , А	900	1450	3200	6000	9000	10500	10500	15000
$S_i^2 dt$ , А <sup>2</sup> с	410	1100	5200	25600	41000	35000	55000	75000
Действующее значение тока, А	16	39	78	160	320	500	785	1720
Прямое падение напряжения, В	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Динамическое сопротивление, Ом	0,01	0,004	0,002	0,0013	0,0007	0,0004	0,0003	0,0002
Обратный ток, мА	1	2	3	3	3	5	5	10
Допустимое напряжение на диоде, В	от 600 до 2000							

Таблица И.5 - Параметры операционных усилителей общего применения

Параметры	Типы операционных усилителей											
	140УД 9	140УД 14А	140УД 20Б	К544 УД1Б	КМ544 УД1А	К533 УД2	КР140 УД1Б	КР140 УД2А	КР140 УД5Б	КР140 УД6	КР140 УД7	КР140 УД8А
Коэффициент усиления $K_u, 10^3$	35	50	50	20	50	20	2... 8	35	1	70	50	50
Входные токи $I_{вх}, мкА$	0,35	2	0,2	0,01	0,1	1,5	8	0,7	10	0,3	0,2	02
Разность входных токов, $мкА$	0,1	0,2	0,5	001	0,02	0,5	2,5	0,2	5	0,1	0,05	0,15
Коэффициент Конвп, дБ	80	85	70	60	100	60	60	80	60	80	70	60
Максимальный выходной ток, $мА$	22	20	20	-	-	-	2,5	10	3	25	20	20
Максимальное выходное напряжение, В	10	13	11,5	10	10	10	6	10	6	11	11,5	10
Максимальное входное напряжение, В	7	10	15	10	10	10	1,2	10	3	1,5	12	10
Максимальное входное синфазное напряжение, В	6	13,5	15	-	-	-	6	5	6	11	11	12
Напряжение источника питания, В	12,6	15	15	15	15	15	12,6	12,6	12,6	15	15	15
Ток потребления, $мА$	8	0,6	2,8	3,5	5	6	10	16	12	2,8	2,8	5
Минимальное сопротивление нагрузки, $кОм$	0,45	0,6	1,55	2	2	1,5	5	1	2	0,5	0,55	0,5
Напряжение смещения нуля, $мВ$	5	2	5	-	-	-	7	9	5	5	4	20
$\Delta U_{св}/\Delta T, мкВ/К$	$\pm 20$	$\pm 10$	$\pm 1,3$	-	-	-	$\pm 60$	$\pm 20$	$\pm 60$	$\pm 20$	$\pm 6$	$\pm 50$
$\Delta I_{вх}/\Delta T, нА/К$	$\pm 20$	$\pm 10$	0,5	-	-	-	$\pm 50$	$\pm 20$	$\pm 6$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 20$

Таблица И.6 - Основные параметры транзисторов

Параметры	Типы транзисторов																	
	КТ203Б	КТ312В	ГТ320Б	КТ343А	ГТ403А	КТ501Б	КТ601А	КТ814Б КТ815Б	КТ816 КТ817	КТ818Б	КТ903А	КТ912Б	КТ301Д	КТ315Б	КТ342Б	КТ208А	КТ3117	КТ819Г
Тип проводимости	p-n-p	n-p-n	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p	n-p-n	p-n-p n-p-n	p-n-p n-p-n	p-n-p	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n	p-n-p	n-p-n	n-p-n
Напряжение коллектор-эмиттер, В	30	20	15	17	45	15	100	40	25	40	60	70	30	20	25	20	50	80
Напряжение база-эмиттер, В	15	4	3	4	20	10	2	5	5	15	4	3	4	20	10	2	5	5
Ток коллектора (максимальный), мА	10	30	150	50	1250	300	30	1500	3000	10000	3000	20000	10	100	50	150	400	10000
Импульсный ток, мА	50	60	300	150	-	500	-	3000	6000	15000	10000	-	20	-	300	300	800	15000
Напряжение насыщения коллектор – эмиттер, В	1	0,8	1,7	0,3	0,5	0,4	-	0,2	0,33	2	2,5	2,5	3	0,4	0,1	0,3	0,6	2
Напряжение насыщения база-эмиттер, В	1	1,1	0,45	0,95	0,8	1,5	-	0,9	0,92	3	3	3	2,5	1,1	0,9	1,5	1,2	3
Статический коэффициент передачи тока ( $\beta$ )	30-150	50-280	50-160	30-70	20-60	40-120	16-300	40-70	25-40	15-20	15-70	20-100	20-60	20-90	25-100	20-60	40-100	15
Допустимая мощность рассеивания, Вт	0,15	0,225	0,200	0,150	0,2	0,35	0,25	10	25	60	30	30	0,042	0,15	0,05	0,2	0,3	60
Емкость коллекторного перехода, пФ	10	3,5	8	6	-	50	15	40	60	50	50	50	10	7	8	35	15	35
Обратный ток коллектора, мкА	1	5	4	1	50	-	50	400	200	1000	2000	5000	10	1	1	2	10	1000
Обратный ток эмиттера, мкА	1	0,1	2	100	50	-	50	-	-	1000	5000	2500	50	30	10	-	-	-

Таблица И.7 - Основные параметры тиристоров низкочастотных

Тип прибора	Электрические и временные параметры									
	И <sub>ср</sub> , А	И <sub>удар</sub> , А	U <sub>обр</sub> , В	$\Delta U$ , В	I <sub>вкл</sub> , мА	I <sub>уд</sub> , мА	I <sub>у</sub> , мА	U <sub>у</sub> , В	I <sub>обр</sub> , мА	di/dt, А/мкс
T112-10-12	10	150	1200	1,85	100	70	40	3	2,5	100
T132-16-13	16	220	1300	2,2	150	90	120	4	9	100
T222-20-12	20	300	1200	1,75	130	80	60	3	3	100
2T132-25-20	25	330	2000	2,2	150	90	120	3	9	125
T142-32-20	32	380	2000	2,1	150	90	120	4	9	125
T131-40-10	40	750	1000	1,9	400	300	250	3,5	10	125
T232-50-80	50	800	800	1,75	150	90	110	3,5	5	125
T141-63-9	63	1200	900	1,95	210	120	180	4	20	125
T242-80-8	80	1350	800	1,65	210	120	150	4	6	125
T151-100-13	100	3000	1300	1,6	800	300	300	4	15	70
ТЛ2-160-6	160	3500	600	1,9	-	-	250	3	20	70
2ТЛ171-200-8	200	4300	800	2,05	-	-	250	5	18	100
ТЛ271-250-6	250	8000	600	1,8	-	-	400	6	40	125
ТЛ271-320-11	320	9000	1100	1,62	-	-	250	3	40	125

Таблица И.8 - Основные параметры тиристоров быстродействующих

Тип прибора	Электрические и временные параметры									
	И <sub>ср</sub> , А	I удар, А	U обр, В	$\Delta U$ , В	I <sub>вкл</sub> , мА	U <sub>у</sub> , В	f, Гц	I <sub>обр</sub> , мА	di/dt, А/мкс	di/dt, В/мкс
T425-10	25	700	1000	3,5	400	2	630	20	100	100
T440-12	40	900	1200	1,95	500	2,5	630	20	100	100
T450-9	50	1700	1700	2,35	750	2,5	630	30	100	100
ТБ151-50-5	50	1000	500	2,5	120	2,5	630	20	400	200
ТБ151-63-12	63	1100	1200	2,15	120	2,5	630	20	400	200
ТБ251-80-14	80	1600	1400	2,2	150	2,5	1000	20	1250	500
ТБ251-100-14	100	2000	1400	1,8	150	2,5	1000	20	1250	500
ТБ261-125-14	125	3500	1400	2,2	150	2,5	1000	25	1000	500
ТБ171-160-12	160	4000	1200	2,0	250	2,5	1000	40	800	500
ТБ353-1000-20	1000	18000	2000	2,3	240	4	1000	180	1250	320

**Примечания:** 1. Числовой ряд величин токов силовых тиристоров: 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 630, 800, 1000, 1250.  
2. Величина обратного напряжения (U обр) на тиристорах может быть от 400 до 2000В, в зависимости от класса тиристора.

## Приложение К

### Пример структурной оптимизации САУ ЭП

Структурная оптимизация основана на использовании желаемых передаточных функций (ПФ), последовательной коррекции:

$$W_{ж}(p) = W_{изм}(p) W_{н}(p).$$

В связи с этим реальная передаточная функция системы определяется произведением величины неизменяемой части на передаточную функцию изменяемой части системы. Для того чтобы передаточная функция реальной системы равнялась желаемой, необходимо оперировать изменяемой частью, в качестве которой выступает регулятор с изменяемыми параметрами и структурой. Неизменяемая часть определяется передаточной функцией тиристорного преобразователя и двигателя.

Тогда для определения структуры и параметров регулятора, в соответствии с теорией последовательной коррекции, необходимо желаемую ПФ разделить на ПФ неизменяемой части:

$$W_{изм}(p) = W_{р}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_{н}(p)}.$$

Структурная схема двухконтурной САУ ЭП (для регулируемого привода) представлена на рис. К.1.

В такой системе необходимо определить ПФ изменяемой части в контуре тока  $W_{рТ}(p)$  и ПФ изменяемой части во контуре скорости  $W_{рС}(p)$ :

Для решения задачи синтеза определяют выражения желаемых передаточных функций для первого и второго контура.

Принято, что желаемая передаточная функция  $W_{ж}(p)$  состоит из двух идеальных звеньев: интегрирующего и апериодического:

$$W_{ж}(p) = W_{н}(p) W_{ан}(p) = \frac{k_{н}}{T_{н} p} \frac{k_{\alpha}}{T_{\alpha} p + 1}.$$

Отношение  $a = T_{и}/T_{\alpha}$  определяет вид переходного процесса. По выбранному желаемому переходному процессу оцениваются оптимальные параметры регулирования САУ ЭП.

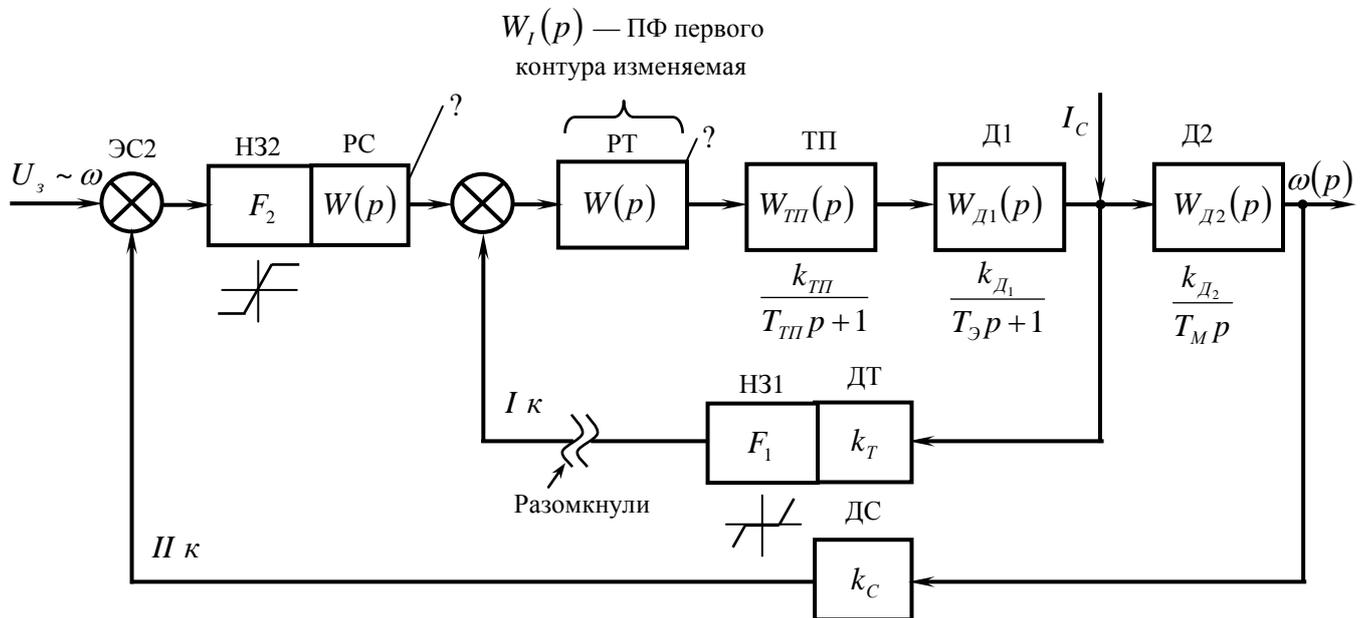


Рисунок К.1 – Структурная схема регулируемого привода

Разновидности желаемых передаточных функций для различного вида переходных процессов представлены в табл.К.1. В таблице указаны оптимальные ПФ разомкнутых контуров регулирования в соответствии с желаемым переходным процессом в контуре.

Таблица К.1 - Желаемые передаточные функции разомкнутых контуров управления для различного вида переходных процессов

Вид переходного процесса	$\alpha$	$I \kappa$	$II \kappa$	$III \kappa$
1 Экспоненциальный	4	$\frac{1}{4T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{8T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{16T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$
2 Аперриодический	2	$\frac{1}{2T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{8T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$
3 Колебательный	1	$\frac{1}{T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{2T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{4T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$

Таким образом, методика оптимизации будет следующей:

- 1 Составляется структурная схема двухконтурной САУ ЭП.
- 2 На схеме выделяются изменяемые и неизменяемые части. Изменяемая часть представлена регуляторами, структура которых может меняться. Неизменяемые части представлены реальными звеньями системы.

- 3 Выбирается вид желаемого оптимального переходного процесса:
  - для регулируемого привода — аperiodический переходный процесс;
  - для следящего электропривода — монотонный (экспоненциальный переходный процесс).
- 4 Выбирают вид желаемой передаточной функции по виду переходного процесса и по виду привода.
- 5 Оптимизацию начинают с внутреннего контура в соответствии с принципом последовательной коррекции.
- 6 В результате преобразований получают передаточную функцию изменяемой части, в качестве которой выступают регуляторы типовой структуры — как правило ПИ, П или И регуляторы.

Рассмотрим пример оптимизации двухконтурной системы АЭП.

Оптимизация внутреннего контура ( $I \kappa$ ) (*синтез регулятора тока*).

$$W_{Ж I PA3}(p) = W_{PA3 PI}(p) = W_{PT}(p) \cdot W_{TP}(p) \cdot W_{DI}(p) \cdot W_{DT}(p),$$

где  $W_{PT}(p)$  - неизвестная передаточная функция регулятора тока;  $W_{Ж I PA3}(p)$  - желаемая передаточная функция первого контура, разомкнутого;  $W_{PA3 PI}(p)$  - передаточная функция, состоящая из реальных звеньев в разомкнутой системе;  $W_{DT}(p)$  - передаточная функция датчика тока.

Исходя из принципа последовательной коррекции, находим передаточную функцию регулятора тока (изменяемая часть):

$$W_{ИЗМ.ч}(p) = W_{PT}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{TP}(p)W_{DI}(p)W_{DT}(p)}.$$

Находим желаемую передаточную функцию для аperiodического процесса:

$$W_{ИЗМ.ч}(p) = \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}{k_{TP} \frac{k_{DI}}{T_{\mu}p+1} \frac{k_{DT}}{T_{\Theta}p+1}}},$$

где  $k_{DT} = 1$ ;  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{TP} = 0,01 \dots 0,005$ ;  $T_{\gamma} = T_{\Theta} = \frac{L_{\gamma}}{R_{\gamma}}$ .

Принимаем:  $k_{дт} = 1$ ,  $k_T = k_{дт}$ .

$$W_{изм.ч}(p) = \frac{T_{\text{э}}p + 1}{2T_{\mu}pk_{тп}k_{д1}} = \frac{T_1p + 1}{T_2p},$$

где  $\frac{T_1p + 1}{T_2p}$  - пропорционально-интегрирующий (ПИ) регулятор.

Пусть  $T_{\text{э}} = T_1$ , а  $2T_{\mu}pk_{тп}k_{д1} = T_2$ , тогда

$$W_{изм.ч}(p) = k_T \Delta x + k_{тп} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt,$$

где  $k_T \Delta x$  - пропорциональная часть (П),  $k_{тп} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt$  - интегрирующая часть (И).

Таким образом, регулятор тока – это ПИ-регулятор, который расположен до точки приложения нагрузки. Первый контур реализован на астатической системе первого порядка (с однократным интегрированием).

Оптимизация внешнего контура (*синтез регулятора скорости*).

Передаточную функцию замкнутого первого контура  $W_{1зс}$  (рис. К.2) находим по известным правилам для нахождения передаточных функций замкнутых систем.

$$W_{1кз}(p) = \frac{W_{ж1}(p)}{1 + W_{ж1}(p)W_{дт}(p)},$$

$$W_{1кз}(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1} = \frac{1}{2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p + 1} \approx \frac{1}{2T_{\mu}p + 1}.$$

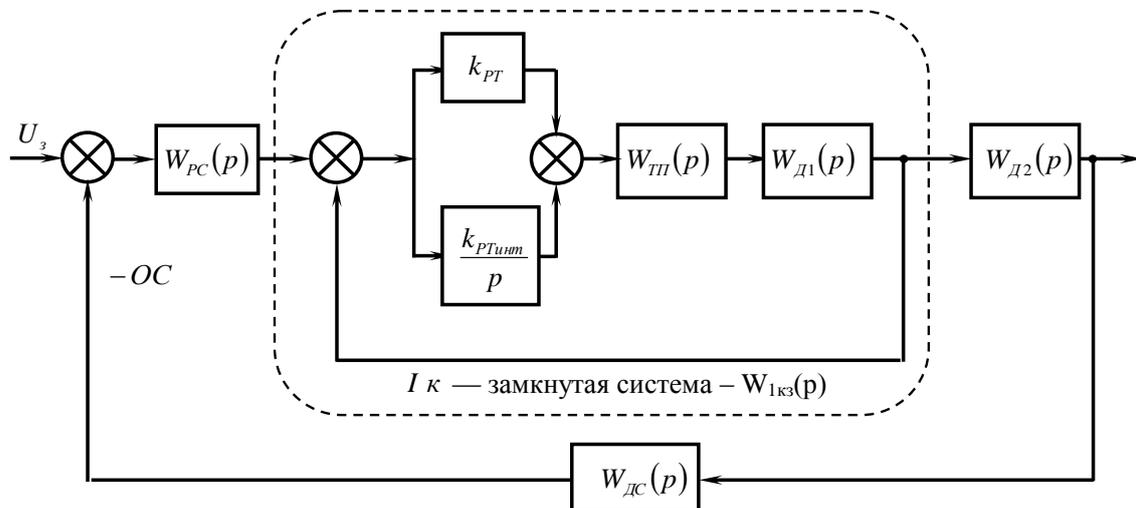


Рисунок К.2 – Структурная схема контура скорости

Синтез неизвестной неизменяемой части (регулятора скорости) производим в соответствии с методикой для контура тока (рис. К.3).

$$W_{ЖП\text{ раз}}(p) = W_{П\text{ раз}}(p) = W_{PC}(p)W_{I\text{ кз}}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p),$$

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{ЖП\text{ анериод. раз. сист}}(p)}{W_{I\text{ кз}}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p)} = \frac{W_{ЖП\text{ анериод. раз. сист}}(p)}{W_{I\text{ кз}}(p)W_{Д2}(p)I},$$

где принимается, что  $W_{ДС}(p) = 1$ .

$$W_{PC}(p) = \frac{I}{\frac{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}{1} \cdot \frac{k_{Д2}}{2T_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{T_M p}} = \frac{T_M p}{4T_\mu p k_{Д2}} = \frac{T_1}{T_2} = k',$$

где  $T_\mu = T_{ТП}$ ;  $T_M = \frac{JR}{(k\Phi)^2}$ ;  $T_1 = T_M$ ;  $T_2 = 4T_\mu k_{Д2}$ .

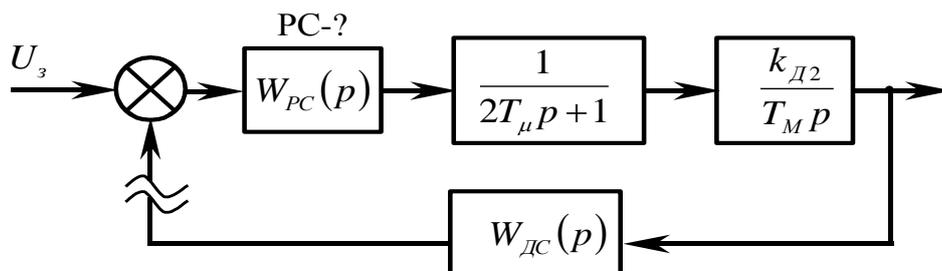


Рисунок К.3 – Оптимизация контура скорости

Таким образом, в процессе синтеза контура скорости мы получили структуру П регулятора.

Оптимизация или синтез контура положения для трехконтурной системы производится аналогично.

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання курсового проекту

з дисципліни

„Автоматизований електропривод”

(для студентів спеціальності 151

«Автоматизація та КІТ»)

Укладач Олег Володимирович Суботін

Редактор Н.О. Хахіна

Підписано до друку Формат 60x84 1/16.

Папір газетний. Ризогр.друк. Зам.№

Тираж Ум.друк.арк. Обл.-вид.арк.

Видавець і виготовник „Донбаська державна машинобудівна академія”

84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб’єктів видавничої справи

серія ДК№1633 від 24.12.03