

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал автономного государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кафедра Общонаучных дисциплин

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«Системы управления электроприводом»

основной профессиональной образовательной программы

подготовки бакалавров по направлению

«13.03.02 Электроэнергетика и электротехника»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсовой работы (курсового проекта)

Лысьва 2021 г.

Разработчик-составитель В.Г. Лопатин

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры
Общенаучных дисциплин «30» августа 2021 г., протокол № 1

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	4
1.1. Цель выполнения курсового проекта	4
1.2. Требования к результатам работы	5
2. Задания на курсовой проект	6
3. Методические рекомендации по выполнению курсового проекта	9
3.1. Содержание курсового проекта	9
3.2. Порядок работы над проектом	9
3.3. Основные теоретические положения.....	10
3.3.1. Механические характеристики механизмов и двигателей	10
3.3.2. Выбор мощности двигателя	10
3.3.3. Функциональная схема комплектного тиристорного электропривода.....	11
3.3.4. Структурная схема САР	12
3.3.5. Расчет статических характеристик	13
3.3.6. Определение передаточных функций отдельных элементов...	17
3.3.6.1. Передаточная функция тиристорного преобразователя	17
3.3.6.2. Передаточная функция электродвигателя	18
3.3.6.3. Передаточная функция датчиков обратной связи.....	20
3.3.6.4. Передаточная функция промежуточного усилителя	20
3.3.6.5. Определение параметров корректирующего устройства..	20
3.3.7. Оценка качества регулирования по кривым переходного процесса.....	22
4. Рекомендации по содержанию и оформлению курсового проекта	23
Список рекомендуемой литературы	24
Приложение А. Пример оформления титульного листа.....	26
Приложение Б. Технические характеристики элементов электропривода	27

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

- Систематизация, закрепление, углубление и расширение теоретических и практических знаний по дисциплине Системы управления электроприводом.
- Овладение методикой научного исследования и практического экспериментирования при решении разрабатываемых в рамках курсового проекта проблем и вопросов структурно-параметрического синтеза систем управления электроприводом (СУЭП) постоянного тока с тиристорными силовыми преобразователями.
- Расширение практических навыков автоматизированного проектирования и исследования систем регулирования скорости электропривода с применением персональных компьютеров.
- Формулирование самостоятельных выводов в рамках изучаемой проблемы.
- Расширение и углубление навыков самостоятельной работы, которые включают умение ориентироваться в учебной, научной и справочной литературе (навыки информационного поиска), умение четко и ясно излагать свои мысли и результаты научных исследований

При выполнении курсового проекта по дисциплине Системы управления электроприводом предполагается решить следующие задачи:

1. Ознакомить с математическим описанием тиристорных систем управления электроприводом постоянного тока;
2. Изучить процедуры синтеза тиристорных систем регулирования скорости, базирующегося на принципах подчиненного регулирования координат электропривода;
3. Вооружить практическими навыками проектирования типовых структур управления тиристорным электроприводом постоянного тока;
4. Научить студента использовать современные методы и приемы проектирования и исследования систем управления электроприводом.

1.2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

После изучения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты:

знать:

- 1 теорию проектирования структуры СУЭП;
- 2 проблемы, возникающие при эксплуатации электропривода и варианты их решения;
- 3 ключевые понятия в области электропривода и теории автоматического управления;
- 4 методы математического описания и процедуры синтеза тиристорных систем управления электроприводом постоянного тока;
- 5 понятия анализа типовых задающих и возмущающих воздействий;

уметь:

1. выполнять расчеты параметров регуляторов СУЭП, необходимых для работы системы автоматизированного проектирования и исследования СУЭП;
2. выполнять ввод исходных данных, характеризующих структуру СУЭП, параметров объекта управления;
3. определять способы ограничения координат электропривода;
4. анализировать полученные промежуточные и итоговые результаты синтеза контуров регулирования СУЭП (значений параметров принципиальных схем регуляторов в сравнении с расчетными значениями, таблиц и графиков переходных процессов с обоснованием полученных прямых оценок качества регулирования)
5. классифицировать виды регуляторов;
6. проектировать регуляторы по желаемым характеристикам;

владеть:

- 1 приемами построения характеристик, графиков с использованием прикладного программного обеспечения;
- 2 методиками проектирования и исследования СУЭП.

2. ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Исходные данные на выполнение курсового проекта представлены в таблице.

Номер задания (вариант) определяет преподаватель

Таблица 2.1 Исходные данные

№ вари- ри- ант	Макс. мо- мент или сила сопро- тивления механизма		Момент инерции механизма или масса		Макс. число по- зициони- рования механизма	Макс. коэффи- циент относи- тельной про- должительно- сти цикла	Погреш- ность позицио- нирова- ния макс.	Макс. ско- рость пере- мещения ме- ханизма		Мини- мальное время цикла работы	Вид дви- же- ния
	F	M	J_i	m				v	ω		
	Н	Н·м	кг·м ²	кг	1/ч	ϵ_{\max}	$\delta_{\text{зад}}$	м/с	1/с	t_u	
1.		800	10		200	0,7	0,2		1	10	В
2.		400	20		100	0,7	0,2		2	10	В
3.		150	15		200	0,7	0,3		6	15	В
4.		120	30		100	0,7	0,3		10	15	В
5.		400	25		200	0,7	0,4		4	20	В
6.		120	8		100	0,8	0,4		8	25	В
7.		100	5		100	0,8	0,5		2	25	В
8.		150	10		200	0,8	0,5		3	30	В
9.		150	10		100	0,8	0,8		2	30	В
10.		250	20		200	0,8	0,8		4	40	В
11.		300	25		200	0,7	2		2	40	В
12.		300	25		100	0,7	2		4	40	В
13.		500	30		200	0,7	2		2	50	В
14.		300	30		100	0,7	2		4	60	В
15.		200	50		200	0,7	2		3	60	В
16.		330	30		150	0,7	2		4	25	В
17.	2000			200	200	0,8	0,002	0,2		10	П
18.	2000			200	100	0,8	0,002	0,4		10	П
19.	3000			300	200	0,8	0,002	0,2		15	П
20.	3000			300	100	0,8	0,002	0,4		15	П
21.	5000			500	200	0,8	0,002	0,3		20	П
22.	1000			50	200	0,7	0,01	0,2		25	П
23.	1000			50	100	0,7	0,01	0,1		25	П

№ вари-ри-ант	Макс. мо-мент или сила сопро-тивления механизма		Момент инерции механизма или масса		Макс. число по-зициони-рования механизма	Макс. коэффи-циент относи-тельной про-должительно-сти цикла	Погреш-ность позицио-нирова-ния макс.	Макс. ско-рость пере-мещения ме-ханизма		Мини-мальное время цикла работы	Вид дви-же-ния
	F	M	J_i	m				v	ω		
	Н	Н·м	кг·м ²	кг	1/ч	ϵ_{\max}	$\delta_{\text{зад}}$	м/с	1/с	t_u	
24.		1000	14		200	0,7	0,2		3	10	В
25.		700	22		100	0,7	0,2		5	10	В
26.		350	12		200	0,7	0,3		8	15	В
27.		220	20		100	0,7	0,3		12	15	В
28.	1200			50	100	0,7	0,01	0,2		25	П
29.	1700			100	200	0,7	0,01	0,3		30	П
30.	2200			100	100	0,7	0,01	0,5		30	П
31.	2200			150	200	0,7	0,01	0,5		40	П
32.	1500			100	200	0,7	0,01	0,2		30	П
33.	2000			100	100	0,7	0,01	0,2		30	П
34.	2000			150	200	0,7	0,01	0,15		40	П

Примечание: Вид движения В – вращательное, П – поступательное

При расчете мощности электродвигателя принять наиболее неблагоприятный режим работы. Разработать электропривод следящей системы, обеспечивающей заданную точность слежения механизма при максимальной скорости задающего сигнал и максимальном моменте сопротивления.

Датчики положения механизма выбрать, исходя их требуемой точности.

В расчетах принять КПД редуктора равным 40 % для червячной передачи.

По исходным данным, приведенным в таблице 2.1, необходимо:

1) выбрать тип и рассчитать требуемую мощность электродвигателя с учетом переходных процессов при пуске, торможении и изменении режимов работы двигателя;

2) в соответствии с исходными данными (мощностью, диапазоном регулирования скорости и другими параметрами) выбрать тип преобразователя [4, 5];

3) разработать принципиальную схему силовой части электропривода;

4) по техническим характеристикам комплектующих электропривода [см. табл. П1 – П4] и принципиальной схеме, рассчитать передаточные функции всех элементов электропривода (электродвигателя, преобразователя и т.д.) и составить его структурную схему;

5) исследовать устойчивость и качество переходных процессов.

Электропривод должен обеспечить плавное регулирование скорости механизма.

Статистическая погрешность поддержания заданной скорости при изменении момента сопротивления заданном диапазоне не должна превышать заданной скорости во всем диапазоне регулирования.

Режим работы механизма – повторно-кратковременный. Расчет мощности двигателя произвести при его работе с максимальным коэффициентом относительной продолжительности включения (ε_{\max}) и минимальном времени цикла $t_{\text{ц min}}$.

Относительная продолжительность включения определяется по выражению (рис.1.1).

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_0}{t_u}$$
$$t_p = t_{p1} + t_{p2} = 2t_{p2}$$

где t_{p1} – время работы при $M_c = M_{c \max}$;

t_{p2} – время работы при $M_c = M_{c \min}$;

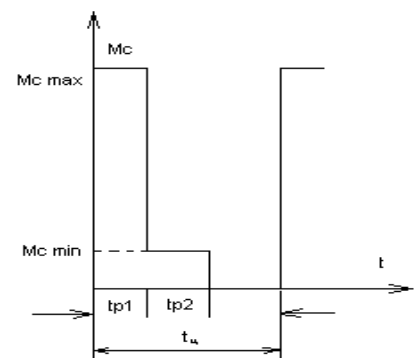


Рисунок 1.1

В нереверсивных приводах должно быть предусмотрено динамическое торможение.

Исследование качества переходного процесса произвести при ступенчатом изменении управляющего воздействия задания скорости ($0 \dots 1$) ω_n при подаче на вход номинального напряжения задания – 10 В.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Таблица 3.1 Виды работ и сроки выполнения

Этап	Содержание	Сроки
1.	Ознакомление с заданием на курсовой проект и требованиями к его выполнению	Первое практическое занятие в семестре, в котором предусмотрено написание курсового проекта
2.	Подбор литературы и согласование с научным руководителем. Выбор элементов электропривода и определение функциональной схемы.	В течение 3-х недель с начала занятий в семестре
3.	Выполнение расчётной части курсового проекта. Синтез и анализ регуляторов САР.	4-6 недель.
4.	Оформление и передача готового курсового проекта на проверку научному руководителю	Не позднее 6-ти недель до начала сессии.
5.	Проверка курсовой работы	1-2 недели после сдачи работы научному руководителю
6.	Доработка курсового проекта в случае необходимости и подготовка к его защите.	1-2 недели после сдачи работы научному руководителю
7.	Защита курсовой работы	Не позднее 4-х недель до начала сессии

3.2. ПОРЯДОК РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ

3.2.1 Произвести анализ исходных данных и разработать функциональную схему системы автоматического регулирования (САР).

3.2.2. Выбрать тип электропривода и рассчитать мощность электродвигателя.

3.2.3 Разработать принципиальную схему силовой части электродвигателя.

3.2.4 Разработать структурную схему.

3.2.5 Произвести расчет и построить статические характеристики отдельных регуляторов и всей САР в целом.

3.2.6 Произвести анализ устойчивости некорректированной САР. Произвести синтез САР с заданными показателями качества методом подчиненного регулирования [16, стр. 17 - 20].

3.2.7 Рассчитать и дать анализ вида переходного процесса.

3.2.8 Разработать релейно-контакторную схему подключения САР к промышленной сети, произвести расчет ее элементов.

3.3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.3.1 Механические характеристики механизмов и двигателей

Определяющим фактором при выборе типа регулируемого электропривода является соответствие механических характеристик производственного механизма и электропривода. Механические характеристики производственного механизма $M_c = f(\omega)$ можно разделить на следующие основные группы:

1) не зависящие от скорости, $M_c = \text{const}$, $P_c = M_c \omega$ (механизмы подачи металло-режущих станков, подъемные конвейеры с постоянной массой перемещаемого материала);

2) нелинейно – спадающие $P_c = \text{const}$, $M_c = \frac{1}{c\omega}$ (механизмы главного движения металлорежущих станков);

3) линейно – возрастающие $M_c = c\omega$;

4) нелинейно – возрастающие (параболические) $M_c = c\omega^2$ (вентиляторы, центробежные насосы),

где M_c – статический момент сопротивления;

P_c – мощность, расходуемая на преодоление статического сопротивления;

ω – скорость вращения механизма;

c – постоянный коэффициент.

Механические характеристики электродвигателей могут быть абсолютно жесткими, мягкими и абсолютно мягкими. Электродвигатель должен быть подобран с такой механической характеристикой, чтобы электропривод обладал статической устойчивостью.

3.3.2 Выбор мощности двигателя

Если момент сопротивления M_c не зависит от скорости, то мощность двигателя выбирается по выражению

$$P_{ДВ} \geq \frac{M_{c \max} \cdot \omega_{\max}}{\eta_{ред}} \text{ – для вращательного движения};$$

$$P_{ДВ} \geq \frac{F \cdot v}{\eta_{ред}} \text{ – для поступательного движения}$$

Примечание. При решении в системе СИ маховый момент GD^2 из каталогов и справочников необходимо перевести в момент инерции J , воспользовавшись формулой

$$J_{ос} = \frac{GD^2}{4}.$$

После выбора преобразователя, типа и мощности двигателя в соответствии с принципом работы разрабатывается и обосновывается упрощенная принципиальная схема. Реализация условий, заданных в исходных данных, требует создания замкнутых систем автоматического регулирования. Например, следящая система (рис. 3.1) замкнута по положению рабочего органа механизма с помощью датчика положения и по току с помощью датчика тока. Примеры, принципы построения и синтез замкнутых систем электропривода приведены в [1, 2, 7], синтез САР методами подчиненного регулирования – в [15, 16].

Следующим этапом проектирования является изучение принципа работы отдельных элементов системы (в основном это относится к преобразователю) и составление передаточных функций всех звеньев электропривода. Производится выбор датчиков обратной связи.

С принципом работы тиристорных преобразователей, магнитных усилителей можно ознакомиться в [4]. Там же приведены их основные технические характеристики. Датчики угла поворота, линейного перемещения, применяемые в современной промышленности, описаны в [11, 12, 13].

Выпускаемые промышленностью комплектные тиристорные электроприводы можно представить в виде функциональной схемы изображения на рис. 3.1.

3.3.3. Функциональная схема комплектного тиристорного электропривода

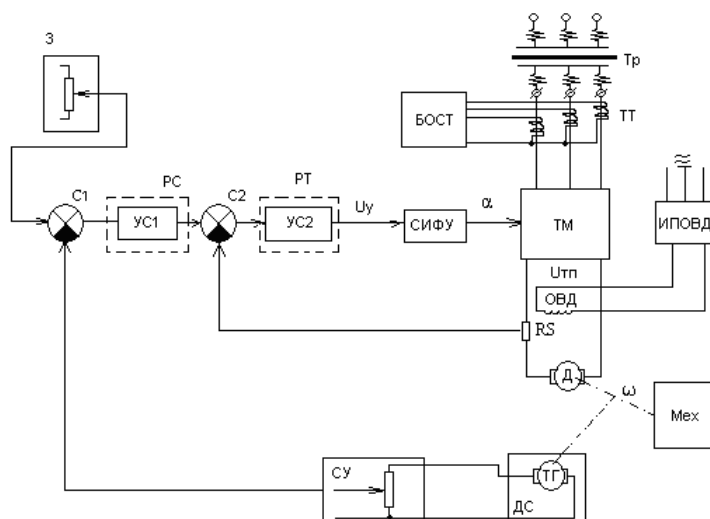


Рисунок 3.1 Функциональная схема комплектного тиристорного электропривода

На функциональной схеме используются обозначения:

- З – блок задания;
- С1, С2 – сумматоры;
- УС1, УС2 – усилители;
- РС, РТ – регуляторы скорости тока;
- СИФУ – система импульсно-фазового управления;
- RS – шунт;
- БОСТ – блок обратной связи по току;
- СУ – согласующее устройство;
- Тр – сетевой трансформатор;
- ТТ – трансформаторы тока;
- ТМ – тиристорный мост;
- Д – двигатель;
- ОВД – обмотка возбуждения двигателя;
- ИПОВД – источник питания обмотки возбуждения двигателя;
- ω – скорость вращения вала двигателя;
- ТГ – тахогенератор;
- ДС – датчик скорости;
- Мех – механизм (в комплект электропривода не входит).

Описание работы конкретного типа комплектного электропривода и комплектной системы автоматического регулирования дано в [4, 5].

3.3.4 Структурная схема САР

Типичная структурная схема следящей САР положения, построенная по схеме подчиненного регулирования, представлена на рис. 3.2. Суть подчиненного регулирования заключается в том, что САР состоит из нескольких замкнутых контуров, находящихся один внутри другого, причем регулятор внешнего контура вырабатывает сигнал задания для внутреннего контура. В данном случае – трехконтурная САР положения. Внутренний контур регулирует ток якоря $I_{я}$ двигателя Д, в него входит регулятор тока – РТ, тиристорный преобразователь – ТП, датчик тока. Для контура тока внешним является контур регулирования скорости. Скорость ω измеряется датчиком скорости ДС, его сигнал сравнивается с заданным значением на сумматоре С2, регулятор скорости РС вырабатывает сигнал задания для контура тока и подает на сумматор С3. третий замкнутый контур включает в себя два внутренних и регулирует положение рабочего органа механизма – М. Угол поворота меха-

низма U или его положение S контролируется датчиком положения ДП. Заданное положение определяется величиной задающего напряжения $U_{зп}$, оно сравнивается с сигналом с датчиком положения на сумматоре С1, результирующий сигнал поступает на регулятор положения РП, который вырабатывает сигнал управления для контура скорости. Возмущающим воздействием является изменяющийся момент сопротивления ΔM_c . Структурная схема двигателя при постоянном потоке возбуждения обведена пунктирной линией. K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты передачи элементов структурной схемы двигателя, T – постоянная времени якорной цепи двигателя.

Для систем регулирования скорости контур регулирования положения отсутствует.

3.3.5 Расчет статических характеристик

Расчет статических характеристик производится на основании параметров отдельных элементов структурной схемы электропривода.

Статическая точность поддержания заданной скорости движения электропривода определяется уравнением

$$\Delta\omega_3 = \frac{\Delta\omega_p}{1+K}, \quad (3.1)$$

где $\Delta\omega_3$ – статическая точность замкнутой системы, %;

$\Delta\omega_p$ – статистическая точность разомкнутой системы, %;

K – статический коэффициент усиления разомкнутой системы.

Исходя из заданной точности разомкнутой системы, по уравнению рассчитывается необходимый коэффициент усиления разомкнутой системы.

Статическая ошибка разомкнутой системы

$$\Delta\omega_p = \frac{\Delta M_c}{\beta}.$$

Статическая ошибка разомкнутой системы в относительных единицах на нижней скорости

$$\Delta\omega_p = \frac{\Delta\omega_p \cdot D}{\omega_{\min}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

где D – диапазон регулирования скорости;

$\Delta\omega_p$ – перепад скорости двигателя, вызванный изменением момента сопротивления на валу, %;

ΔM_c – возможный перепад момента сопротивления, приведенный к валу двигателя;

$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta\omega}$ – жесткость механической характеристики системы.

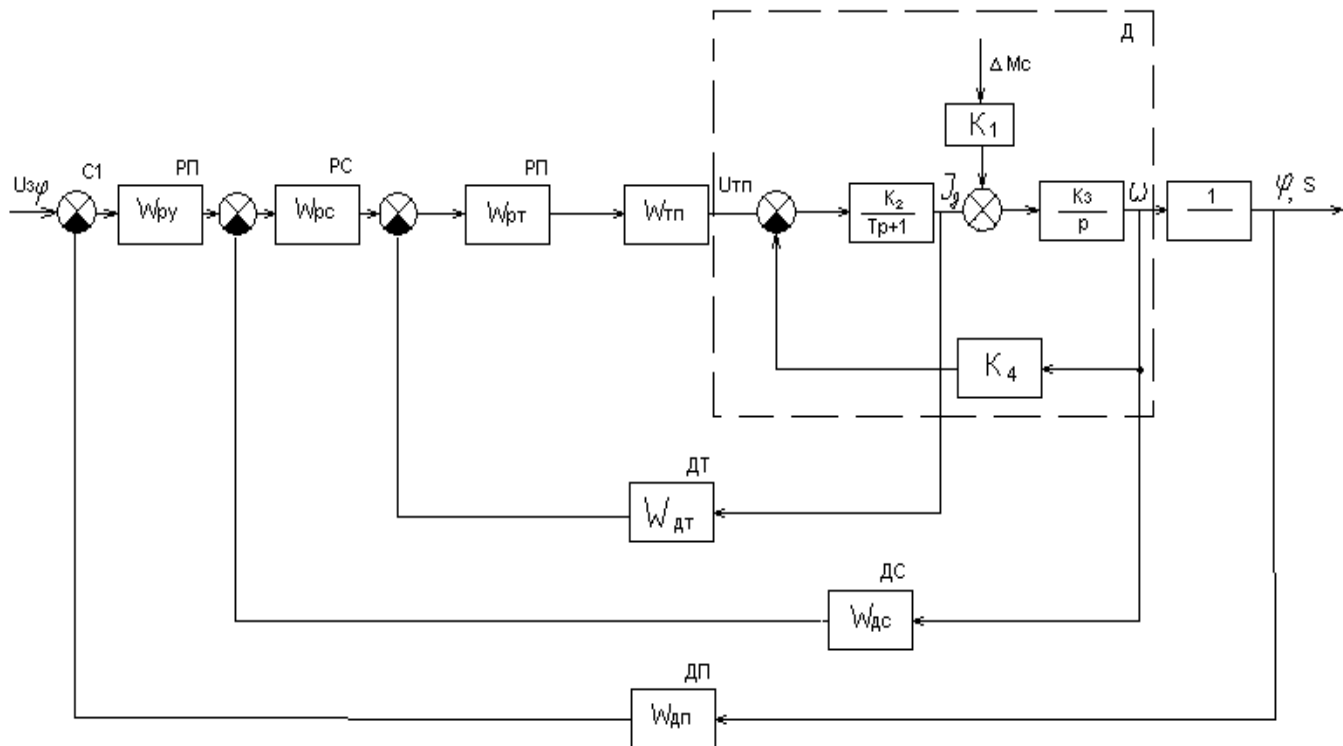


Рисунок 3.2 Типичная структурная схема следящей САР положения механизма, построенной по системе подчиненного регулирования

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$\beta = \frac{(k\Phi)^2}{R_{яц}}, \quad (3.3)$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – магнитный поток возбуждения;

$R_{яц}$ – сопротивление якорной цепи.

В системах позиционирования статическая ошибка, приведенная к валу двигателя, определяется из выражений:

1) для вращательного движения

$$\delta_{cm} = \frac{M_c}{i_p \cdot K_{PC} \cdot \beta} \leq \delta_{зад}, \quad (3.4)$$

где K_{PC} – коэффициент усиления разомкнутой системы;
 i_p – передаточное отношение редуктора;
 $\delta_{зад}$ – заданная погрешность позиционирования;
 M_c – приведенный момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;

2) для поступательного движения

$$\delta_{cm} = \frac{F \cdot \rho}{K_{PC} \cdot \beta} \leq \delta_{зад}, \quad (3.5)$$

где $\delta_{зад}$ – заданная погрешность позиционирования, м;

$$\rho = \frac{V_{y \max}}{\omega_{y \max}} \text{ – приведенный радиус, м/рад;}$$

$V_{y \max}$ – максимальная установившаяся скорость движения механизма, м/с;

$\omega_{y \max}$ – максимальная угловая скорость двигателя, рад/с.

В следящих системах необходимо учитывать также скоростную ошибку $\delta_{ск}$, которая рассчитывается при максимальной установившейся скорости слежения ω_y или V_y .

Ошибка слежения при установившемся поступательном движении механизма с максимальной скоростью

$$\delta_{ск} = \frac{V_{y \max}}{K_y}, \text{ м}$$

где $V_{y \max}$ – максимальная скорость движения механизма, м/с.

Ошибка слежения при установившемся вращательном движении механизма с максимальной скоростью

$$\delta_{ск} = \frac{\omega_{y \max}}{K_y}, \text{ рад}$$

где $\omega_{y \max}$ – максимальная скорость вращения механизма, рад/с.

Суммарная ошибка в следящих системах не должна превышать заданной.

$$\delta_{зад} \geq \delta_{cm} + \delta_{ск}, \quad (3.6)$$

По уравнениям (3.6), (3.4) и (3.5) рассчитывается общий коэффициент усиления системы K , а по нему – необходимый коэффициент усиления промежуточного усилителя.

При расчете жесткости механических характеристик в выражении (3.3) в сопротивление якорной цепи $R_{яц}$ помимо сопротивления цепи якоря двигателя $R_{яд}$ должно включаться и сопротивление тиристорного преобразователя.

Для мостовых схем выпрямления

$$R_{\Sigma} = \frac{m \cdot X_{TP}}{2 \cdot \pi} + 2 \cdot R_{TP} + R_{CD} + 2 \cdot R_{уд} + R_{я}$$

$$R_{яц} = R_{яд} + 2R_{TP}(R_{ТОР}) + 2R_{УР} + 2R_{\delta} + R_{К}, \text{ Ом} \quad (3.7)$$

для однополупериодных схем

$$R_{яц} = R_{яд} + R_{TP}(R_{ТОР}) + R_{УР} + R_{\delta} + R_{К}, \text{ Ом} \quad (3.8)$$

где $R_{яц}$ – полное сопротивление якорной цепи;

$R_{яд}$ – сопротивление якоря двигателя;

$$R_{яд} = 1.24 \cdot (R_{я} + R_{д.п.} + R_{КО}) + R_{щ};$$

$R_{я}$, $R_{д.п.}$, $R_{КО}$ – соответственно сопротивление якорной, дополнительной и компенсационной обмоток;

$R_{щ}$ – сопротивление щеточного контакта.

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{ян}} = \frac{2}{I_{ян}}, \text{ Ом};$$

$R_{УР}$ – сопротивление уравнительного реактора;

$R_{ТОР}$ – сопротивление токоограничительного реактора;

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{КЗ} U_H}{P_H^2} - \text{приведенное активное сопротивление трансформатора,}$$

где $\Delta P_{КЗ}$ – потери в опыте короткого замыкания, Вт;

U_H – номинальное линейное напряжение вторичной обмотки, В;

P_H – номинальная мощность трансформатора, Вт;

$$R_{\delta} = \frac{(0,2 \div 0,3) U_T}{I_{ТН}} - \text{динамическое сопротивление тиристора,}$$

где U_T – классификационное падение напряжения на тиристоре;

$I_{ТН}$ – среднее значение тока через тиристор при номинальном моменте сопротивления на двигателе, при одной параллельной ветви и трехфазном выпрямлении;

$$I_{ТН} = \frac{I_H}{3};$$

$$R_K = \frac{X_\alpha m}{2\pi} - \text{коммутационное сопротивление тиристора,}$$

где m – число фаз преобразователя (для мостовой трехфазной схемы $m = 6$);

$$X_\alpha = \sqrt{Z_{TP}^2 - R_{TP}^2} - \text{приведенное индуктивное сопротивление обмоток трансформатора;}$$

$$Z_{TP} = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot P_H} - \text{полное приведенное сопротивление обмоток трансформатора,}$$

где $U_K, \%$ – напряжение короткого замыкания в процентах.

3.3.6 Определение передаточных функций отдельных звеньев электропривода

3.3.6.1 Передаточная функция тиристорного преобразователя

Передаточная функция $W_{ТП}$ тиристорного моста ТМ вместе с системой импульсно-фазового управления СИФУ аппроксимируется, как правило, апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени T_m в пределах от 0,006 до 0,01 с [1, 2, 3, 5], что обусловлено дискретностью подачи отпирающих импульсов и особенностью работы управляемого тиристорного выпрямителя (тиристорного преобразователя)

$$W_{ТП}(p) = \frac{U_{ТП}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП}p + 1},$$

где $U_{ТП}$ – выходное напряжение тиристорного преобразователя;

U_y – напряжение, подаваемое на вход СИФУ тиристорного преобразователя;

$K_{ТП}$ – коэффициент передачи тиристорного преобразователя.

Следует отметить, что коэффициент передачи тиристорного преобразователя не является величиной постоянной и изменяется в зависимости от величины управляющего напряжения.

Регулировочная характеристика тиристорного преобразователя представлена на рис. 3.3.

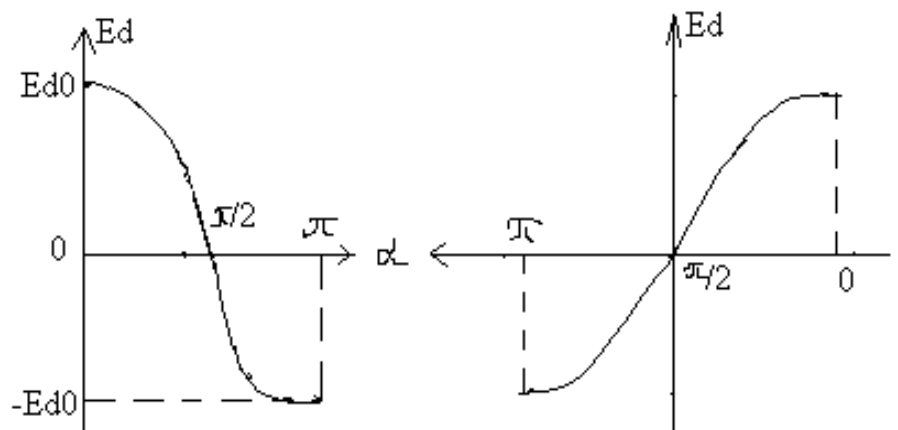


Рисунок 3.3 Регулировочная характеристика тиристорного преобразователя

$\frac{Ed\alpha}{Edo}$ - относительное значение ЭДС преобразователя, $Ed\alpha$ и Edo для каждого преобразователя различны и могут быть определены по выражению:

$$Ed\alpha = Edo \cdot \cos \alpha ,$$

где Edo – среднее значение ЭДС преобразователя при $\alpha = 0$;

$Ed\alpha$ – текущее действующее значение ЭДС, соответствующее заданному углу регулирования.

Отношение $Ed\alpha$ к Edo носит косинусоидальный характер в зависимости от α , а изменение угла α линейно зависит от управляющего напряжения, поэтому в системе управления тиристорного преобразователя предусматривается устройство, преобразующее косинусоидальную зависимость в зависимость, представленную на рис. 3.3.

$$U_y^* = \frac{U_y}{U_{yH}} ,$$

где U_y^* – относительное значение напряжения управления;

U_y – заданное напряжение управления;

U_{yH} – величина напряжения задания, соответствующая номинальному значению выходного напряжения тиристорного преобразователя.

3.3.6.2 Передаточная функция электродвигателя

Передаточную функцию электродвигателя постоянного тока при управлении изменением напряжения на обмотке якоря в зависимости от соотношения электромагнитной T_α и электромеханической T_M постоянных времени можно представить в виде колебательного звена, апериодического звена второго порядка или в виде звена первого порядка

$$W_D(p) = \frac{K_D}{T_\alpha T_M p^2 + T_M p + 1} . \quad (3.9)$$

Если $4 T_\alpha > T_M$, то $W_D(p) = \frac{K_D}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$,

при этом $T = \sqrt{T_\alpha T_M}$, $\xi = \sqrt{\frac{T_\alpha}{4T_M}}$ (3.10)

Если $4 T_{\partial} < T_M$, то $W_D(p) = \frac{K_D}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$, при этом $T_1 T_2 = T_{\text{я}} T_M$; $T_1 + T_2 = T_{\text{я}} + T_M$.

Если $4 T_{\text{я}} \ll T_M$, то $W_D(p) \approx \frac{K_D}{T_{\text{ЭМ}} + 1}$.

Постоянные времени $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{ЭМ}}$ определяются следующим образом:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{яЦ}}}{R_{\text{яЦ}}}, \text{ с,}$$

где $L_{\text{яЦ}} = L_{\text{ТР}}(L_{\text{ТОР}}) + L_{\text{я.д.}} + L_{\text{УР}}$,

$R_{\text{яЦ}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи (определяется согласно выражению (3.7) и (3.8));

$L_{\text{ТР}} = \frac{\chi_{\alpha}}{\omega}$ – приведенная индуктивность трансформатора;

ω – угловая частота питающей сети;

$$L_{\text{я.д.}} = \gamma \frac{U_{\text{я}}}{p \cdot \omega_H \cdot I_{\text{яН}}},$$

$L_{\text{я.д.}}$ – индуктивность якоря двигателя;

$\gamma = 0,6$ – для некомпенсированных машин;

$L_{\text{УР}}$ – индуктивность уравнительного реактора.

$$T_M = \frac{J_{\text{ПР}} R_{\text{яЦ}}}{(k \cdot \Phi)^2},$$

где $J_{\text{ПР}}$ – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции механических элементов привода

$J_{\text{ПР}} = 1,2 \cdot J_{\text{д}} + J_{\text{м}} / (i^2 \cdot \eta_{\text{ПР}})$ – для вращательного движения;

$J_{\text{ПР}} = 1,2 J_{\text{д}} + \frac{mV^2}{\omega_{\text{ДВ}}^2}$ – для поступательного движения.

Передачный коэффициент двигателя постоянного тока при регулировании скорости изменением подводимого к якорю напряжения

$$K_D = \frac{1}{k \cdot \Phi_H},$$

$$k \Phi_H = \frac{U_H - I_{\text{яН}} R_{\text{яД}}}{\omega_H}.$$

3.3.6.3 Передаточная функция датчиков обратной связи

Передаточную функцию тахогенератора можно представить в виде безинерционного линейного элемента [1, 2], тогда

$$W_{ТГ}(p) = K_{ТГ} = \frac{U_{н.ТГ}}{\omega_{н.ТГ}}, \text{ В}\cdot\text{с},$$

где $U_{н.ТГ}$ и $\omega_{н.ТГ}$ – номинальные напряжение и угловая скорость тахогенератора.

Если датчик скорости импульсный и на выходе его стоит сглаживающий фильтр, то в зависимости от схемы фильтра передаточная функция датчика может описываться звеном первого или второго порядка с постоянными времени, определяемыми по параметрам схемы фильтра.

Передаточные функции датчиков обратной связи по положению определяются также в зависимости от типа датчика и его фильтра.

3.3.6.4 Передаточная функция промежуточного усилителя

В современных тиристорных приводах постоянного тока для улучшения статических и динамических характеристик системы в промежуточные усилители вводятся различные корректирующие цепи, благодаря чему обеспечивается регулирование необходимых динамических свойств системы ([3], гл.5; [1], пример 4-13; [2] §5-5). При этом следует учесть, что одним из перспективных направлений развития современного вентильного электропривода считается создание унифицированных блоков управления, в которых в качестве усилителя используются операционные усилители постоянного тока.

Этим усилителям придаются свойства различных звеньев: пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) действия ([3], §5-5).

3.3.6.5 Определение параметров корректирующего устройства

Как было указано выше, в тиристорных приводах постоянного тока синтез корректирующего устройства часто осуществляется путем придания промежуточному усилителю свойств пропорционально-интегрально-дифференциального звена

рис. 3.4 ([1], пример 5-5; [3], §5-5), которое имеет следующий вид передаточной функции

$$W(p) = \frac{(T_B p + 1)(T_C p + 1)}{(T_a p + 1)(T_d p + 1)} \cdot K_{PY}, \quad (3.11)$$

где $T_B = C_2 R_2$, $T_C = C_1 R_1$, $T_a = (R_1 + R_3) C_2$, $T_d = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$.

Реализация такой передаточной функции на операционном усилителе представлена на рис. 3.4.

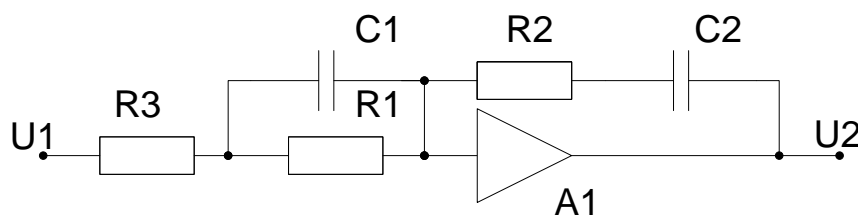


Рисунок 3.4

Определение параметров корректирующего устройства можно провести аналитическим методом, исходя из условия, что постоянные времени T_B и T_C должны компенсировать постоянные времени двигателя постоянного тока [7, 13]. Если двигатель является колебательным звеном (см. уравнение (3.9)), то $T_B = T_C = T$.

Постоянные времени корректирующего устройства можно определить из его параметров:

$$T_B = R_2 C_2; \quad T_C = R_1 C_1; \quad T_d = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} C_1.$$

Если передаточная функция двигателя описывается уравнением (3.10), то $T_B = T_1$, а $T_C = T_2$. Постоянные времени T_a и T_d в этом случае можно определить из следующих соотношений: $T_a = T_1/\alpha$, $T_d = T_2 \alpha$.

Таким образом, уравнение (3.11) можно представить в следующем виде

$$W(p) = \frac{(T_B p + 1)(T_C p + 1)}{\left(\frac{T_1}{\alpha} p + 1\right)(T_2 \alpha \cdot p + 1)} \cdot k_p,$$

где k_p – коэффициент усиления разомкнутой системы.

Введением интегрально-дифференцирующего звена осуществляется подавление средних частот, чем достигается получение требуемой частотной характеристики ПУ. Безразмерный характер α определяет степень подавления средних частот; изменяя его, можно добиться устойчивости скорректированной системы (чем больше коэффициент усиления разомкнутой системы, тем меньше должно быть α). Ориентировочно $\alpha = 0,2 \div 0,001$.

Реализация интегрально-дифференцирующего звена может быть осуществлена и другим способом ([10], табл.1, 10).

Устойчивость САР может быть определена по логарифмическим частотным характеристикам.

Синтез САР может быть произведен с использованием вычислительной техники. В этом случае расчетные программы и полученные графики должны входить в содержание курсового проекта.

3.3.7 Оценка качества регулирования по кривым переходного процесса

Для оценки качества регулирования в переходных режимах необходимо построить кривые переходного процесса при ступенчатом управляющем воздействии (пуск на минимальную скорость) и скачкообразном набросе нагрузки от $M_C = 0,25M_{C_{\max}}$ до $M_C = M_{C_{\max}}$ при минимальной скорости (т.е. по возмущающему воздействию).

Ориентировочный порядок построения переходного процесса может быть следующим:

- 1) преобразовать структурную схему для изучения динамики по управляющему воздействию, а затем по возмущающему воздействию;
- 2) пользуясь передаточной функцией САР или ее логарифмическими частотными характеристиками, построить вещественную частотную характеристику;
- 3) разбить вещественную частотную характеристику на трапеции и методом h-функций построить переходный процесс;
- 4) по кривой переходного процесса дать оценку качества переходного процесса, для чего определить время регулирования (длительность переходного про-

цесса), величину регулирования, вид переходного процесса (колебательный, апериодический), время достижения первого максимума, время нарастания и достижения первый раз заданной величины, число колебаний и т.д.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Объем курсового проекта (без списка использованных источников и приложений) должен составлять 25-35 страниц. Титульный лист курсового проекта приведён в приложении А. Текст должен оформляться на компьютере, размер шрифта не более 14 пт, но не менее 12 пт, Times New Roman, межстрочный полуторный интервал, или рукописным способом черной или синей пастой.

Страницы должны иметь поля, мм: 30 - левое; 10 - правое; 20 -верхнее; 20 -нижнее. Текст должен выравниваться по ширине. В тексте должны быть расставлены переносы.

Пояснительная записка должна быть выполнена на бумаге формата А4 по ГОСТ 7.32-2001 (графики и схемы можно выполнять на формате А4). В пояснительной записке отражаются:

- все проведённые расчеты;
- принципиальные и структурные схемы электропривода, выполненные в соответствии с требованиями ЕСКД;
- обоснование выбора того или иного типа преобразователя, электродвигателя и т.д.;
- графики переходных процессов;
- список использованных источников.

Перечень рекомендуемой литературы

Печатная учебно-методическая литература

№ п/п	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке
1. Основная литература		
1	Системы управления электроприводов. Конспект для студентов Лысьвенского филиала ПГТУ / В.П. Казанцев. - Пермь : ПГТУ, 2003. - 168 с.	69
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1	Ключев, В.И. Теория электропривода : учебник для вузов / В.И. Ключев. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 2001. - 704 с. : ил.	30
2	Москаленко, В.В. Электрический привод : учеб. пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / В.В. Москаленко. - М. : Мастерство, 2000. - 368 с.	74
3	Кацман, М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу : учеб. пособие для студ. сред. спец. учеб. заведений / М.М. Кацман. - 2-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 215 с. : ил.	24
2.2. Периодические издания		
1	Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность: научно-технический журнал/ Учредитель ОАО «Электрозавод». – Архив номеров в фонде ОНБ ЛФ ПНИПУ 2012-2017 гг.	
2	Электрооборудование: эксплуатация и ремонт / Учредитель ООО «ИЕДЕПЕНДЕНТ МАСС МЕДИА» - Архив номеров 2018-2021 г.	
3	Электрик Международный Электротехнический Журнал/Учредитель ДП «Издательство Радиоматор» Киев,, «Радиоматор». Архив номеров 2018 г.	
4	Информационно-аналитический журнал Электроэнергетика: сегодня, завтра. ООО «Издательский Дом « Деловая Пресса», ИП ЛевлюхЮ.А.Архив номеров 2019 -2021 г.	
2.3. Нормативно-технические издания		
	Не используется	
3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины		
	Не используется	
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента		
	Не используется	

Электронная учебно-методическая литература

Вид литературы	Наименование разработки	Ссылка на информационный ресурс	Доступность ЭБС (сеть Интернет / локальная сеть; авторизованный / свободный доступ)
Основная литература	Лыков, А.Н. Системы управления электроприводами: монография / А.Н. Лыков; Перм. гос. техн. ун-т. – Электрон. версия учебного пособия. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009. – 148 с	https://elib.pstu.ru/docview.?fDocumentId=462	сеть Интернет /авторизованный
Основная литература	Казанцев В. П. Системы управления электроприводом : учебно-метдическое пособие / В. П. Казанцев. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018.	https://elib.pstu.ru/docview/4335	сеть Интернет /авторизованный
Периодические издания	Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления [Текст]: научный рецензируемый журнал. Архив номеров 2010-2021 гг.	http://vestnik.pstu.ru/elinf/about/inf/	<i>Сеть Интернет /авторизованный</i>
Методические указания для студентов по освоению дисциплины		\\mserv\elcat\Электронные пособия	<i>Локальная сеть/свободный</i>
Методические указания для студентов по освоению дисциплины		\\mserv\elcat\Электронные пособия	<i>Локальная сеть/свободный</i>
Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента		\\mserv\elcat\Электронные пособия	<i>Локальная сеть/свободный</i>

Перечень ресурсов сети Интернет

1. www.glossary.ru (множество глоссариев)
2. www.lib.ua-ru.net (студенческая электронная библиотека веда)
3. www.public.ru (Публичная Интернет-библиотека. Специализация: отечественная периодика)

Приложение А. Пример оформления титульного листа



Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации
Лысьвенский филиал

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
"Пермский национальный исследовательский политехнический университет"

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

По дисциплине «Системы управления электроприводом»
тема: «Разработка автоматизированного электропривода системы
позиционирования»

Вариант № __

Выполнил студент _____
подпись, дата

И.О. Фамилия

Группа _____

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Руководитель (должность, ученая степень, звание) _____
подпись, дата

В.Г. Лопатин

Лысьва 20__

Приложение Б. Технические характеристики элементов электропривода

Таблица П1. Технические характеристики двигателей постоянного тока

Наименование параметра	2ПБ90ЛГ с НВ	ПБСТ- 22	2ПН180 МУХЛ4	ПБСТ- 62	2ПН160 МГУХЛ 4 с НВ	ПБСТ- 32 с НВ	ПБСТ- 43МУХ Л4 с НВ	ПБСТ- 23	ПБСТ- 22	ПБСТ- 32 с ПаpВ	Д814	П62М
Частота вращения номинальная, n_n , об/мин	2240	1500	750	1500	2120	1500	1000	1500	2200	2200	550	1500
Напряжение якоря, Уя, В	220	220	110	220	220	220	220	220	110	220	220	220
Мощность номинальная, Рн, кВт	0,53	0,6	5,4	7,2	13	1,2	1,9	0,85	0,85	1,5	38,5	0,55
Номинальный ток, А	3,09	3,4	55	36	50	6,5	10,5	4,75	9,6	8	96	3,32
Номинальный момент, Н·м	2,26	39	50	46,8	59	7,8	18,5	5,52	3,8	6	–	–
Частота вращения максимальная n_{max} , об/мин	4000	3750	3000	3600	4000	3750	3000	3750	4000	4000	1700	4300
КПД, %	73	76	78,5	90	85,5	79,8	80	77	78	79,5	78	67,5
Индуктивность якоря, Ля, мГн	108		2,73								12	–
Момент инерции, кг·м ²	0,005	0,012	0,2	–	0,3	0,025	0,0575	–				0,05
Число полюсов, 2р	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		2
Сопротивление якоря, Ря, Ом	4,26	3,43	0,084	0,152	0,081	0,3385	0,98	2,34	0,44	0,55	0,0129	10,8
Сопротивление доп. пол., Рд, Ом	2,84	2,18	0,056	0,064	0,056		0,676	1,6	0,31	0,416	–	–
Сопротивление обмотки возбу- ждения, Ров, Ом									240	600	35,2	525
Сопротивление щеток, Рщ, Ом											0,08	0,08
Маховый момент, GD ² , кгс·м ²				1,03				0,055	0,048	0,1		

Таблица П2. Технические характеристики тиристорного преобразователя

Наименование параметра	ТЕ4- 160/230	ПТОР 230-10	ПТТР 230-50	ПТТР 230-10	ПТОР- 115-10	ПТТР 230-40	ПТТР 230-25	ПТОМ -115- 32(50)	ПТТР 230-15	ЭТРП- 1
Напряжение питания Ун, В	380	380	380	380	220	380	380	380	380	220
Напряжение номинальное выпрямленное Ун, В	230	230	230	230	115	230	230	115	230	110
Ток номинальный In, А	160	10	50	10	10	40	25	32(50)	15	10
Ток максимальный допустимый I max. доп, А	360	50	100	20	50	50	50	50	60	20
Мощность длительная, Рдлит, кВт	36,8	2,4	18,5	2,4	1,15	10	10	7	4,5	1,5

Таблица П3. Технические характеристики трансформаторов

Наименование параметра	ТТ 5	ТТ 5	ТТ25	ТТ 6	ТТ8	ТСП-63/0,7
Мощность номинальная P_n , кВА	1	5	25	6	8	58
Напряжение первичной обмотки $U_{в.н}$, В	380	380	380	380	380	380
Напряжение вторичной обмотки $U_{н.н}$, В	220	104/208 /416	104/208 /416	104/208 /416	208	118/236
Мощность холостого хода $\Delta P_{х.х}$, Вт	200	200	200	60	75	330
Мощность короткого замыкания $\Delta P_{к.з}$, Вт	180	180	580	180	220	1900
Ток номинальный I_n , А	10	10	38	9,13	12,15	88
Напряжение короткого замыкания U_k , %	5	10	10	10	10	5,5
Ток холостого хода $I_{х.х}$, А	$0,20 \cdot I_n$	$0,15 \cdot I_n$	$0,15 \cdot I_n$	$0,15 \cdot I_n$	$0,15 \cdot I_n$	$0,06 \cdot I_n$
Кпд, %	92					

Таблица П4. Технические характеристики тахогенераторов

Наименование параметра	ПП-1	ТС-1М	ПТ-1
Напряжение номинальное, U_n , В	230	100	230
Частота вращения номинальная, n_n об/мин	1500	3000	3000
Мощность номинальная, P_n , Вт	15	5	15
Ток номинальный, I_n , А	0,0652		
Сопротивление якоря, $R_я$, Ом	123	200	34
Сопротивление обмотки возбуждения $R_в$, Ом	46		46
Напряжение обмотки возбуждения, $U_в$, В	55		55