

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Чайковский филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Кафедра Автоматизации, информационных и инженерных технологий

МП12.8-2022

**Методические предписания
по выполнению КУРСОВОГО ПРОЕКТА
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»**

для студентов направления подготовки

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
всех форм обучения

2022

Методические предписания по выполнению и оформлению курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» / Сост. Г.А.Горюшков – Чайковский: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022.– 54 с.

Методические предписания по выполнению и оформлению курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» на тему (по вариантам): «Проектирование регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока в системе генератор – двигатель (Г-Д)», «Проектирование регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока в системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д)», «Проектирование регулируемого электропривода с двигателем переменного тока в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД)» предназначены для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Рецензент: канд. техн.наук, доцент кафедры АИИТ Ковязин В.А.

Методические предписания по выполнению и оформлению курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» рассмотрены и одобрены на заседании кафедры автоматизации, информационных и инженерных технологий 05.12.2022 г., протокол № 14.

Методические предписания по выполнению и оформлению курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» рекомендованы методической комиссией ЧФ ПНИПУ для использования в учебном процессе (протокол № 4 от 29.12.2022 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ	5
2. ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	7
3. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	10
3.1 Тахограмма рабочей машины	10
3.2 Механическая характеристика механизма	10
3.3 Нагрузочная диаграмма механизма.....	10
3.4 Расчет мощности приводного двигателя	10
3.5 Выбор приводного двигателя и редуктора	11
3.6 Расчет и выбор управляемого преобразователя.....	13
3.7 Тахограмма работы двигателя	15
3.8 Расчет моментов сопротивления приведенных к валу механизма	15
3.9 Выбор режимов работы электропривода	16
3.10 Расчет статических механических характеристик.....	18
3.11 Проверка выбранного двигателя по нагреву	27
3.12 Расчет потерь энергии и энергетических показателей в установившихся режимах работы.....	27
4. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	34
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ	42

ВВЕДЕНИЕ

Целью курсового проекта является детальный расчет регулируемого электропривода производственной установки с двигателем постоянного и переменного тока в системах (по вариантам): Г-Д, ТП-Д, ПЧ-АД.

При выполнении курсового проекта студенты должны овладеть определенными навыками анализа данных о режимах нагрузки, построения нагрузочных диаграмм механизма, научиться правильно выбирать электрические машины и преобразовательные устройства с учетом требований технологического процесса, рассчитывать параметры и выбирать элементы заданной системы электропривода, оценивать энергетические показатели спроектированной системы.

Данный курсовой проект отражает механику электромеханических систем (по вариантам): Г-Д, ТП-Д, ПЧ-АД и электромеханические свойства двигателя и представляется в виде расчетно-пояснительной записки, включающей в себя заданные и расчетные графики, диаграммы, тип выбранного двигателя и преобразователя, характеристики системы электропривода, а также принципиальную и структурную схему спроектированной системы.

В ней приводятся все необходимые расчеты (мощности приводного двигателя по заданной тахограмме и механической характеристике механизма, выбор двигателя и преобразовательного устройства, расчет и построение механических характеристик электропривода, расчет энергетики).

Выполненный курсовой проект студент представляет руководителю для проверки. После проверки студенту сообщается о возможности допуска к защите. При наличии грубых ошибок работа возвращается студенту для их исправления или переделки работы в целом. Вариант и система электропривода задается руководителем курсового проекта.

С целью экономии времени студента при поиске сведений об основных технических данных двигателей и преобразователей в конце методических указаний приведены таблицы с этими данными.

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Исходные данные для проектирования представлены в таблице. В ней приведены варианты тахограммы, по которой работает механизм и которая составляет повторяющийся цикл работы. Здесь $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – скорости механизма в установившихся режимах; t_1, t_2, t_3 – время работы механизма с установившейся скоростью (сюда не входит время переходных процессов пуска, торможения, изменения скорости); t_1 – время паузы.

Таблица 1 Исходные данные рабочей машины

Номер варианта тахограммы	ω_1	ω_2	ω_3	$t_{1,c}$	$t_{2,c}$	$t_{3,c}$	t_0, c	Номер варианта механической характеристики рабочей машины	Законы изменения момента сопротивления рабочей машины M_{ci} , H^*_{M}	Моменты инерции рабочей машины J_M в долях от момента инерции двигателя, $кг \cdot м^2$
0	10	15	5	20	10	10	75	0	1000	4,5
1	15	-2	5	30	15	15	75	1	$1600 - 40 \cdot (\omega)$	3,5
2	20	-10	-2	10	30	10	40	2	2000	7,0
3	25	20	-5	15	10	45	70	3	$600 + 50 \cdot (\omega)$	6,0
4	20	15	4	10	20	60	110	4	1500	4,5
5	15	-10	2	50	30	30	70	5	$2500 - 60 \cdot (\omega)$	4,0
6	10	-20	-3	80	75	25	95	6	$800 + 10 \cdot (\omega)$	3,0
7	25	10	-5	10	40	30	65	7	$500 + 20 \cdot (\omega)$	4,5
8	15	8	-3	15	10	5	30	8	$40 \cdot (\omega)$	5,0
9	20	-10	2	180	20	20	180	9	800	6,0

В этой же таблице приведены варианты механических характеристик рабочей машины, причем закон изменения момента сопротивления (нагрузки) механизма задан в виде уравнения. Здесь же указаны значения момента инерции механизма в долях от момента инерции выбранного приводного двигателя.

Характер момента сопротивления – реактивный, режим работы повторно-кратковременный.

Варианты тахограммы и механической характеристики рабочей машины студентам дневной и заочной формы обучения выдается руководителем работы.

Согласно заданию необходимо:

- 1) Построить тахограмму рабочей машины $\omega_1 = f(t)$ за цикл работы и определить расчетную продолжительность включения $PV\%_{\text{расч}}$.
- 2) Построить механическую характеристику $\omega_1 = f(M_{ci})$ рабочей машины.
- 3) Построить нагрузочную диаграмму $M_{ci} = f(t)$ рабочей машины.
- 4) Определить требуемую мощность двигателя.
- 5) Выбрать электродвигатель по мощности и определить передаточное отношение редуктора между двигателем и рабочей машиной.
- 6) Выбрать управляемый преобразователь.
- 7) Построить тахограмму работы двигателя $\omega_a = f(t)$.
- 8) Рассчитать приведенные к валу двигателя моменты статического сопротивления M_{ci} , рабочей машины и построить зависимость $\omega_a = f(M'_{ci})$.
- 9) Обосновать способы пуска, регулирования скорости и торможения (остановки) электропривода.
- 10) Рассчитать и построить статические механические характеристики системы электропривода, соответствующие заданным установившимся скоростям, на которых двигатель должен работать в течение цикла.
- 11) Проверить предварительно выбранный двигатель методом средних потерь.
- 12) Рассчитать энергетику спроектированной системы электропривода в установившихся режимах работы за цикл работы и за год.
- 13) Изобразить принципиальную (функциональную) и структурные схемы разомкнутой и замкнутой системы электропривода на листах формата А4 со штампом.

2. ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Выполненный курсовой проект представляется руководителю в виде расчетно-пояснительной записки и чертежей. Расчетно-пояснительная записка оформляется на ЭВМ и печатается писчей бумаге формата А4 (210x297). Изложение записки ведется от 1-го лица множественного числа (принимаем, определяем). Оформляют записку согласно ГОСТ 2.106-96. Буквенно-цифровые обозначения в схемах должны соответствовать ГОСТ 2.710-81.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать:

- Титульный лист (см. образец).
- Задание на курсовое проектирование.
- Исходные данные для проектирования.
- Аннотацию.
- Содержание.
- Введение.
- Основное содержание проекта согласно методическим указаниям
- Заключение.
- Список использованной литературы.

В пояснительной записке должен быть приведен краткий, но исчерпывающий расчет всех требуемых величин и зависимостей в системе СИ. При оформлении расчетов рекомендуется сначала писать расчетную формулу, затем - числовые значения входящих в нее величин и далее – конечный результат с указанием размерности полученной величины. Если эти числовые значения берутся из графика или какой-либо таблицы, необходимо делать на них соответствующие ссылки. Результаты аналогичных расчетов сводятся в таблицы. Каждый раз, когда в расчетную формулу будут входить величины с иными индексами или знаками, она должна приводиться, в нее подставляются соответствующие цифровые значения, дается конечный результат, а результаты аналогичных расчетов сводятся в таблицы, имеющие номер и название.

Расчетные формулы и другие материалы, взятые из литературных источников, следует давать со ссылкой на источник (номер, под которым этот

источник значится в перечне использованной литературы, в квадратных скобках), соблюдая требования ГОСТ.

Принятые решения должны быть обоснованы. Пояснения нужно давать кратко, с соблюдением технической терминологии и ссылками на соответствующие расчеты, таблицы, графики, структурные схемы, диаграммы.

Кроме того, пояснительная записка должна содержать принципиальные электрические и структурные схемы, графики, диаграммы, рисунки с подписями. Графики и диаграммы выполняются или в специализированных программных пакетах или на миллиметровке того же формата, что и листы пояснительной записки. Кривые на графиках можно изображать цветными чернилами, карандашами и т.п. Рисунки, схемы, графики должны иметь нумерацию и название.

Задание, пояснительная записка, схемы, графики и диаграммы должны быть сброшюрованы. Титульный лист оформляется согласно образцу. Нумерация страниц расчетно-пояснительной записки сквозная, включая листы с рисунками, схемами, диаграммами. На титульном листе его номер не проставляется. Условные обозначения элементов схем на чертежах и рисунках пояснительной записки должны соответствовать ГОСТ 2.702-2011. Рекомендуется выполнить чертеж с применением ЭВМ.

Графическая часть проекта представляется на листах формата А4 (210x297 мм) со штампом. Разрешается использовать миллиметровку соответствующего формата. На чертежах необходимо изобразить:

В тексте пояснительной записки должны обязательно присутствовать следующие графики:

1) Заданная тахограмма работы механизма за цикл $\omega_{mi} = f(t)$;

2) Механическая характеристика рабочей машины $M_{см.м} = f(\omega_{mi})$;

3) Нагрузочная диаграмма рабочей машины $M_{см.м} = f(t)$;

4) Тахограмма работы двигателя $\omega_{mi} = f(t)$;

5) Зависимость момента сопротивления, приведенного к валу двигателя, от угловой скорости вращения двигателя $\omega_d = f(M'_{ci})$;

6) Статические механические характеристики, на которых работает двигатель в течение цикла. На фоне механических характеристик построить зависимость момента сопротивления, приведенного к валу двигателя, от угловой скорости вращения двигателя (см. п. 5) и обозначить точки статических режимов работы.

7) Для системы ТП-Д в отдельных осях построить механические характеристики с учетом зоны прерывистых токов.

8) Для системы Г-Д в отдельных осях построить механическую характеристику гонного асинхронного двигателя и кривую намагничивания генератора с указанием токов возбуждения необходимых для получения необходимых напряжений.

9) Для системы ПЧ-АД в отдельных осях построить статические механические характеристики для различных законов частотного управления.

В качестве графического материала подготовить на формате А4 с основной надписью следующие схемы:

1) Принципиальную (функциональную) схему разомкнутой проектируемой системы электропривода;

2) Принципиальную (функциональную) схему замкнутой проектируемой системы электропривода;

3) Структурную схему модели разомкнутой проектируемой системы электропривода;

4) Структурную схему модели замкнутой проектируемой системы электропривода.

3. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1 Тахограмма рабочей машины

К п. 1. Тахограмма рабочей машины $\omega_i = f(t)$ строится по данным табл. 1. В ней указаны три установившиеся скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и время t_1, t_2, t_3 работы с этими скоростями, а также время паузы t_0 .

Расчетное ПВ%_{расч} определяется как:

$$ПВ\%_{расч} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \cdot 100\%$$

3.2 Механическая характеристика механизма

К п. 2. Поскольку механическая характеристика рабочей машины $\omega_i = f(M_{ci})$ задана уравнением в таблице, то при ее построении (в том числе и в 3-м квадранте) в уравнение подставляется абсолютное значение скорости.

3.3 Нагрузочная диаграмма механизма

К п. 3. Нагрузочная диаграмма рабочей машины $M_{ci} = f(t)$ строится на основании ее тахограммы и механической характеристики. Для каждой из трех установившихся скоростей по механической характеристике рабочей машины определяются моменты сопротивления. Нагрузочная диаграмма получается путем замены на тахограмме скорости соответствующим ей моментом сопротивления M_{ci} .

3.4 Расчет мощности приводного двигателя

К п. 4. Для определения требуемой мощности двигателя по нагрузочной диаграмме механизма сначала находится средний статический момент сопротивления:

$$M_{с.р} = \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + M_3 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{\sum M_{см.i} \cdot t_i}{t_{ц}},$$

а затем требуемый номинальный момент двигателя $M_n = (1,1 \div 1,3) \cdot M_{с.р}$.

где 1,1÷1,3 – коэффициенты, учитывающие дополнительную нагрузку двигателя в переходных режимах из-за появления динамических моментов.

Требуемая расчетная мощность двигателя:

$$P_{\text{расч}} = M_n \cdot \omega_{\text{осн}} ,$$

где $\omega_{\text{осн}}$ – основная скорость, на которой двигатель должен работать. За $\omega_{\text{осн}}$ рекомендуется принимать максимальную скорость при однозонном регулировании или меньшую (но не самую малую) при двухзонном регулировании, например при ослаблении магнитного потока в системе Г-Д или ТП-Д. Двухзонное регулирование целесообразно применять в тех случаях, когда $M_{\text{сг}}$ уменьшается с ростом скорости.

Найденную расчетную мощность следует пересчитать на номинальную ПВ%= 40% по формуле:

$$P_{40\%} = P_{\text{расч}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%_{\text{расч}}}{40\%}}$$

3.5 Выбор приводного двигателя и редуктора

К п. 5. По найденному значению мощности P выбирается двигатель повторно-кратковременного режима серии Д для системы Г-Д и ТП-Д и серии 4АС, МТКФ или МТКМ для системы ПЧ-АД согласно условию:

$$P_n \geq P \text{ при ПВ}\%=40\%.$$

По найденному значению мощности, пересчитанной на стандартный ПВ% выбирается несколько двигателей (не менее 2-ух) одного типа с различными номинальными скоростями (быстроходный и тихоходный) но примерно одинаковой мощности (не более ± 5 кВт).

Студент самостоятельно принимает решение о величине напряжения двигателя (на 220 или 440 В) в случае систем Г-Д и ТП-Д. Основные технические данные двигателей независимого возбуждения серии Д приведены в таблице П1, а данные к.з. асинхронных двигателей серии 4АС и серии МТКМ и МТКФ и 4МТ приведены соответственно в таблицах П2, П3 и П4.

В связи с тем, что для механизмов циклического действия, работающих в интенсивных пуско-тормозных режимах, величина передаточного числа редуктора существенно влияет на быстродействие, потери энергии, габариты и т.п., при выполнении курсового проекта следует выбирать величину передаточного числа, а

соответственно и номинальную скорость двигателя на основе технико-экономического сравнения нескольких вариантов. Такое сравнение выполняется следующим образом. По найденному значению мощности, пересчитанной на номинальную ПВ%, выбирается несколько двигателей одного типа с различными номинальными скоростями, но примерно одинаковой мощности и одной и той же ПВ в %. Для каждого выбранного двигателя рассчитывается расчетное передаточное число редуктора ($i_p = \omega_n / \omega_{оч}$).

Расчетное передаточное число редуктора округляется в меньшую сторону до ближайшего табличного значения. По расчетному передаточному числу и мощности двигателя выбирается редуктор (таблица П.16).

В курсовом проекте, учитывая его учебный характер, рекомендуется выбирать цилиндрические горизонтальные одноступенчатые редукторы типа ЦОН технические данные, которых приведены в таблице П.16.

Для облегчения работы ниже приведен пример выбора редуктора.

Расчетная мощность редуктора типа ЦОН $P_{расч} = P_{нд} * K_з$,

где $P_{нд}$ – номинальная мощность, передаваемая с вала двигателя; $K_з$ - коэффициент, принимаемый равный 2,2 при среднем режиме работы, 1,7 при тяжелом и 1,3 при весьма тяжелом.

Расчетная мощность $P_{расч}$ сравнивается с табличным значением для соответствующей скорости двигателя (быстроходного вала) и передаточного числа. Табличное значение мощности выбранного редуктора должно быть больше или равно $P_{расч}$. Например, при $P_{нд}=28$ кВт, $i=4$, $n_n = 1000$ об/мин (скорость быстроходного вала) $P_{расч} = K_з * P_{нд} = 1,7 * 28 = 47,5$ кВт. По таблице П16 при $i=4$ и $n_n=1000$ об/мин ближайшее значение мощности редуктора $P_{н.ред}=50,1$ кВт. Следовательно, редуктором, допускающим при заданных условиях такую нагрузку, будет ЦОН-20.

Расчеты следует свести в таблицу 2. Окончательно выбирается тот вариант двигателя и редуктора, у которого величина $J_d * i^2$ минимальна.

Таблица 2 Выбор двигателя и редуктора по оптимальной скорости

Тип двигателя	$P_{нд}$, кВт	ω_n , 1/с	i	J_d , кг*м ²	Тип редуктора	$P_{нр}$, кВт	$\omega_{нр}$, 1/с	$\eta_{нр}$	$J_d * i^2$
---------------	----------------	------------------	-----	---------------------------	---------------	----------------	---------------------	-------------	-------------

Далее для выбранного двигателя приводится таблица с его полными техническими данными из справочной таблицы в приложении.

Затем по фактическому передаточному числу редуктора определяется момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = \delta * J_d + J_m / i^2 * \eta_{нр}, \quad \delta = 1.1 \div 1.3$$

где δ - коэффициент, учитывающий момент инерции вращающихся частей редуктора и полумуфт; J_d, J_m - моменты инерции двигателя и рабочей машины (см. табл. 1); $i, \eta_{нр}$ - фактическое передаточное число редуктора и его номинальный КПД (принять $\eta_{нр} = 0,95 \div 0,97$).

Следует иметь в виду, что в течение цикла возможны случайные кратковременные перегрузки, превышающие максимальный статический момент в $2 \div 2,5$ раза. Поэтому выбранный двигатель нужно проверить на перегрузочную способность с учетом этих случайных перегрузок. Если он удовлетворяет условиям перегрузки, для него производятся все дальнейшие расчеты.

$$\lambda_{ф} = \frac{M_{см} * 2}{M_n} \leq \frac{M_{макс}}{M_n} = \lambda_n,$$

где $\lambda_{ф}, \lambda_n$ - фактическая и номинальная (допустимая) перегрузки двигателя по моменту; $M_{см}$ - максимальный статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, Н*м (методика его определения приведена в п.8 настоящих указаний), $M_{макс}$ - максимальный (допустимый по условиям коммутации для ДПТ) или критический моменты (для АД КЗР). Формулы для расчета M_n приведены в п.8 указаний.

3.6 Расчет и выбор управляемого преобразователя

К п. 6. В качестве преобразователя системы Г-Д используется агрегат – генератор постоянного тока – к.з. асинхронный двигатель (гонный двигатель).

Расчетная мощность генератора $P_{г.расч}$ находится по условию:

$$P_{г.расч} = \frac{P_{н.д}}{\eta_{н.д}}$$

Далее выбираются генератор мощностью $P_{н.г} \geq P_{г.расч}$ на соответствующее приводному двигателю напряжение. Расчетная мощность тонного двигателя, вращающего генератор:

$$P_{г.дв.расч} = \frac{P_{н.г}}{\eta_{н.г}}$$

По расчетной мощности выбирается гонный двигатель мощностью:

$$P_{н.г.вд} \geq P_{г.дв.расч}$$

Скорость гонного двигателя должна быть равна или близка номинальной скорости генератора.

Основные технические данные генераторов независимого возбуждения приведены в таблице П5, а к.з. асинхронных двигателей, используемых в качестве гонных, – в таблице П6.

Для системы ТП-Д выбирается тиристорный преобразователь согласно условию:

$$I_{дн} \geq I_{н.дв}; U_{дн} \geq U_{н.дв}; P_{преобр} \geq P_{н.дв}.$$

Основные технические данные тиристорных преобразователей приведены в таблице П7.

Если согласно заданию необходимо изменение направления вращения, что видно из тахограммы рабочей машины, преобразователь выбирается реверсивный. Одновременно с выбором преобразователя выбирается тип и мощность питающего трансформатора, если двигатель выбран на напряжение 220 В.

Расчетное значение его мощности согласующего трансформатора:

$$S_{расч} = \frac{P_{н.дв}}{\eta_{н.дв} \cdot \eta_{н.пр} \cdot \eta_{н.тр} \cdot \eta_{и.тр}},$$

где $P_{н.дв}$, $\eta_{н.дв}$, $\eta_{н.пр}$, $\eta_{н.тр}$ – номинальные значения мощности двигателя, его КПД, КПД преобразователя, КПД трансформатора; $\eta_{и.тр}$ – коэффициент использования трансформатора. ($\eta_{н.пр} = 0,95 \div 0,98$; $\eta_{и.тр} = 0,955$).

Условие выбора трансформатора: $S_{н.тр} \geq S_{расч}$.

По справочнику выбирается трансформатор серии ТСП (трехфазный сухой преобразовательный). Технические данные трансформаторов серии ТСП приведены в таблице П8.

Если приводной двигатель выбирается на напряжение 440 В, трансформатора не требуется, вместо него тиристорный преобразователь подключается к сети 380 В через токоограничивающие реакторы (ТОР). Технические данные реакторов приведены в таблице П9.

Расчетное значение индуктивности ТОР:

$$L_p = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{н.ф.}}{314 \cdot I_{к.з.}}, \quad I_{к.з.} = (7 \div 8) \cdot I_{дн}$$

где $I_{к.з.}$ и $I_{дн}$ – допустимый ударный ток короткого замыкания и номинальный выпрямленный ток преобразователя.

$$\text{Условие выбора ТОР: } L_n \geq L_p; \quad I_{н.ф.} \geq \frac{I_{дн}}{3}.$$

Для системы ПЧ-АД выбирается преобразователь частоты по номинальному току, напряжению двигателя, а также диапазону частот, обеспечивающих работу электропривода с заданными скоростями. Основные технические данные преобразователей частоты серии АТ (корпорация «Триол») и серии ЭКТ приведены в таблицах П13, П14, П15.

3.7 Тахограмма работы двигателя

К п. 7. Тахограмма $\omega = f(t)$ работы двигателя с установившимися скоростями строится по тахограмме рабочей машины и передаточному числу редуктора.

3.8 Расчет моментов сопротивления приведенных к валу механизма

К п. 8. При расчете приведенных к валу двигателя моментов сопротивления рабочей машины необходимо учесть моменты холостого хода двигателя:

$M_0 = M_{х.х} = M_n - M_{н.в.}$, где $M_n, M_{н.в.}$ – номинальный электромагнитный момент двигателя и номинальный момент на его валу.

Для ДПТ независимого возбуждения $M_n = k\Phi \cdot I_{я.н.}$,

где $k\Phi = \frac{U_n - I_{я.н.} \cdot R_{я.н.}}{\omega_n}$ – коэффициент ЭДС двигателя;

$k = \frac{N \cdot p_n}{2\pi \cdot a}$ – конструктивный коэффициент двигателя.

Номинальный электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M_H = \frac{3 \cdot U_{\text{лнн.}}^2 \cdot \frac{R'_2}{S_H}}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + X_k^2 \right]};$$

Номинальный момент на валу

$$M_{\text{н.в}} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H};$$

Фактический момент сопротивления рабочей машины

$$M_{\text{с.и}} = M'_{\text{с.и}} + M_0$$

Приведенный момент сопротивления рабочей машины, соответствующий каждой из установившихся скоростей $\omega_{\text{с.и}}$, двигателя (без учета КПД передачи)

$$M'_{\text{с.и}} = \frac{M_{\text{с.м.и}}}{j}$$

Отложив на графике значения момента сопротивления и скорости, постройте характеристику момента сопротивления на валу двигателя $\omega_a = f(M_{\text{с.и}})$, которая и используется в дальнейших расчетах.

3.9 Выбор режимов работы электропривода

К п. 9. Прежде чем рассчитывать статические механические характеристики, соответствующие заданным установившимся скоростям, необходимо обосновать способы управления электроприводами в режимах пуска, регулирования скорости и торможения. При этом следует учесть, что технологический процесс допускает изменение установившихся скоростей в пределах $\pm 5\%$, а низкая (заправочная) скорость может быть изменена в пределах $\pm 50\%$.

Если студент за основную скорость, соответствующую номинальному напряжению, принял наименьшую, а согласно заданной тахограмме требуется получить более высокую скорость (в системе Г-Д и ТП-Д), необходимо ослабить магнитный поток двигателя. В этом случае студент предварительно устанавливает, допустимо ли при заданных условиях ослабление потока, т.е. выясняет, не будет ли ток якоря превышать допустимое с точки зрения коммутации значение, и лишь

после этого делает заключение о способе разгона двигателя до заданной повышенной скорости. Допустимый ток при ослаблении магнитного потока не должен превышать:

$$I'_{\text{доп}} = (2 \div 2,5) \cdot I_{\text{я.н}} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{с.и}}} \cong I_{\text{доп}} \cdot \frac{\Phi_{\text{осл}}}{\Phi_{\text{н}}} = I_{\text{доп}} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{с.и}}};$$

где $\omega_{\text{н.и}}$ – скорость, на которой двигатель должен работать при ослабленном потоке $\Phi_{\text{осл}}$; $\omega_{\text{н}}$ – номинальная скорость при номинальном потоке $\Phi_{\text{н}}$; $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток при $\Phi_{\text{н}}$.

Требуемое значение ослабленного потока $\Phi_{\text{осл}}$ находится из уравнения механической характеристики двигателя при подстановке в него заданной повышенной скорости.

$$\omega_{\text{с.и}} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{осл}}} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi_{\text{осл}})^2} \cdot M_{\text{с.и}}$$

Решая его относительно коэффициента ЭДС $k\Phi_{\text{осл}}$, находят два значения коэффициента ЭДС. Реальным считается $k\Phi_{\text{осл}}$, отличающийся от коэффициента ЭДС $k\Phi_{\text{н}}$ при номинальном потоке (он определен ранее в п. 8) не более чем в два раза.

Далее определяется относительный ослабленный поток:

$$\varphi_{\text{осл}} = \frac{\Phi_{\text{осл}}}{\Phi_{\text{н}}},$$

по кривой намагничивания двигателя серии Д (она дана в табличном виде в табл. П13) находится относительный ток возбуждения, соответствующий $\Phi_{\text{осл}}$, и вычисляется абсолютное значение этого тока:

$$I_{\text{в.осл}} = i_{\text{в.осл}} \cdot I_{\text{в.н}}$$

Добавочное сопротивление, которое нужно ввести в цепь возбуждения для обеспечения протекания этого тока:

$$R_{\text{в.доб}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{в.осл}}} - R_{\text{в}}$$

При питании обмотки возбуждения двигателя от тиристорного возбудителя следует определить напряжение на его выходе, следовательно, на обмотке возбуждения двигателя, необходимое для получения нужного значения тока и

соответствующего ему ослабленного потока $\Phi_{\text{осл}}$.

Ток в якорной цепи при ослабленном потоке:

$$I'_я = \frac{M_c}{k\Phi_{\text{осл}}},$$

сравнивается с максимально допустимым током $I'_{\text{доп}}$, и делается вывод о его приемлемости.

При решении применить двухзонное регулирование скорости системы ПЧ-АД необходимо выполнение условия:

$$\frac{M_{\text{кр}}}{M_c} \geq 2$$

где $M_{\text{кр}}$ и M_c – критический момент двигателя при $f_1 > f_{1н}$ и момент статического сопротивления в установившемся режиме работы.

$$M_{\text{кр}} = \frac{3 \cdot U_{1нн}^2 \cdot \frac{R'_2}{S_n}}{2\omega_{0р} \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k'^2}]}, \quad X_k' = (X_1 + X_2') \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}$$

где $\omega_{0р}$, X_k' – скорость идеального х.х. и индуктивное сопротивление к.з. при $f_1 > f_{1н}$.

Если $\frac{M_{\text{кр}}}{M_c} < 2$, двухзонное регулирование применять не рекомендуется.

Торможение электропривода во всех системах рекуперативное. Остановку двигателя на последнем участке цикла можно осуществлять свободным выбегом, если на этом участке двигатель работает с небольшой (по сравнению с предыдущими участками цикла) скоростью.

3.10 Расчет статических механических характеристик

К п. 10. Порядок расчета статических механических характеристик системы Г-Д следующий:

1) Определяется номинальная ЭДС генератора, соответствующая номинальной нагрузке, и определяется скорость идеального х.х. основной характеристикой при номинальном потоке $\Phi_{\text{нд}}$ двигателя:

$$E_{г.н} = k\Phi_{\text{нд}} \cdot \omega_{\text{нд}} + I_{я.н} \cdot R_{я.с} = U_n + I_{я.г} \cdot R_{я.г},$$

где $R_{я.с} = R_{я.д} + R_{я.г}$

2) Определяется скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая его основной характеристике:

$$\omega_0 = \frac{E_{г.н}}{k\Phi_{нд}}$$

3) Строится основная характеристика по двум точкам с координатами:

$$\omega = \omega_0, \quad M = 0; \quad \omega = \omega_i, \quad M = M_i;$$

4) Для расчета характеристик, соответствующих заданным скоростям $\omega_{н.і}$, необходимо определить ЭДС генератора при вычисленных в п. 7 скоростях двигателя и найти скорости идеального х.х.

$$E_{г.і} = k\Phi_{нд} \cdot \omega_{с.і} + \frac{M_{с.і}}{k\Phi_{нд}} \cdot R_{я.Σ}; \quad \omega_{0.і} = \frac{E_{г.і}}{k\Phi_{нд}}$$

5) Далее расчет и построение регулировочных характеристик делается аналогично основной характеристике, начиная с п.3.

6) Поток возбуждения генератора, создающий ЭДС $E_{а.і}$:

$$\Phi_{г.і} = \frac{E_{г.і}}{k_r \cdot \omega_{н.г}}, \quad \text{где } k_r = \frac{N \cdot p_n}{2\pi \cdot a}$$

7) По кривой намагничивания генератора (см. табл. П12) находится соответствующий ток возбуждения генератора (в именованных или относительных единицах) $I_{в.і}$ или $i_{в.і}$.

8) Соответствующее напряжение возбуждения генератора:

$$U_{а.і} = I_{а.і} \cdot R_{а}$$

9) При регулировании скорости двигателя выше номинальной за счёт ослабления его потока возбуждения требуемое значение потока $\Phi_{осл}$ определяется из уравнения механической характеристики системы Г-Д при номинальной ЭДС генератора. Для вычисленного значения $\Phi_{осл}$ и номинальной ЭДС генератора рассчитывается и строится механическая характеристика двигателя, обеспечивающая его работу с $\omega_{с.і}$ при данном $M_{с.і}$.

Для расчета и построения статических механических характеристик системы ТП-Д, соответствующих заданным установившимся скоростям вращения двигателя, предварительно определяется эквивалентное сопротивление якорной цепи:

$$R_3 = \frac{m \cdot X_{\text{тр}}}{2\pi} + 2R_{\text{тр}} + R_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{с.др}} + n \cdot R_{\text{у.др}},$$

где m – число пульсаций выпрямленного напряжения (для мостовой схемы $m=6$);

Активное и реактивное сопротивление трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к.з.}}}{m_1 I_{1\text{н}}^2 K_{\text{тр}}^2}; \quad X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к.з.}\%} \cdot U_{1\text{нн.}}}{100 \cdot I_{1\text{н}} K_{\text{тр}}^2};$$

где $\Delta P_{\text{к.з.}}$ – потери короткого замыкания трансформатора, Вт; m_1 – число фаз;

$U_{\text{к.з.}\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора; $K_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{нн.}}}{U_{2\text{нн.}}}$ –

коэффициент трансформации трансформатора; $I_{1\text{н}} = \frac{I_{2\text{н.н}}}{K_{\text{дд}}}$ – номинальный

первичный ток трансформатора;

Сопротивление сглаживающего и уравнивающих дросселей:

$$R_{\text{с.д.}} = \frac{\Delta U_{\text{с.др}}}{I_{\text{дн}}}; \quad R_{\text{у.др}} = \frac{\Delta U_{\text{у.др}}}{I_{\text{дн}}},$$

где $\Delta U_{\text{с.др}} = \Delta U_{\text{у.др}} \cong (0,005 \div 0,01) \cdot U_{\text{д.н}}$ – падение напряжения на сглаживающем и уравнивающих дросселях при номинальном выпрямленном токе $I_{\text{дн}}$ преобразователя. Технические данные дросселей рекомендуемых для выбора приведены в таблицах П10 и П11.

В случае безтрансформаторной схемы подключения преобразователя (с ТОР) R_3 определяется по формуле:

$$R_3 = \frac{m \cdot X_{\text{р}}}{2\pi} + R_{\text{р}} + R_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{с.др}} + n \cdot R_{\text{у.др}}$$

где $X_{\text{р}}$ и $R_{\text{р}}$ индуктивное и активное сопротивления токоограничивающего реактора, причем $X_{\text{р}} = 2\omega_1 \cdot L_{\text{н}}$, где $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}$. Технические данные реакторов рекомендуемых для выбора приведены в таблице П9.

Статические механические характеристики рассчитываются по уравнению:

$$\omega_{\text{с.и}} = \frac{E_{\text{д0}} \cdot \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{R_3}{(k\Phi)^2} \cdot M_{\text{с.и}},$$

где $E_{\text{д0}} = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{н.л}} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = 2,34 \cdot U_{2\text{нн.}}$ при $m = 6$.

Угол задержки открывания клапанов α_i , необходимый для обеспечения

работы двигателя с установившейся скоростью ω_{ni} :

$$\alpha_i = \arccos \frac{U_{di}}{E_{d0}} = \arccos \frac{k\Phi \cdot \omega_{ci} + I_{ci} \cdot R_s}{E_{d0}}$$

где $I_{ci} = \frac{M_{ci}}{k\Phi}$ – ток статической нагрузки, которому соответствует приведенный момент сопротивления M_{ci} .

Если преобразователь системы ТП-Д неререверсивный (с одним комплектом вентилей) или реверсивный (с двумя комплектами вентилей), но управление комплектами раздельное, при малых нагрузках ток будет прерывистым, т.е. возникнет зона прерывистых токов. В этой зоне механические характеристики нелинейны.

Для построения ЗПТ в системе координат $[\omega, I]$ требуется рассчитать зависимость $I_{adi} = f(\alpha_i)$ по формуле (при $\alpha_i \geq 10^0$):

$$I_{гр.i} = \frac{E_{d0} \sin \alpha_i}{\omega_1 (L_d + L_T)} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right),$$

где $I_{гр.i}$ – граничное значение тока якорной цепи ДПТ соответствующее i -му углу регулирования $\alpha_i \geq 10^0$; $L_d = L_\Sigma = \frac{l_e \cdot E_{d0}}{i_e \cdot \omega_1 \cdot I_H}$, $L_T = \frac{2 \cdot X_T}{\omega_1}$ – индуктивность согласующего трансформатора или токоограничивающего реактора.

Найденные значения граничных токов и соответствующие им углы α_i , подставляют в уравнение механической характеристики $\omega(I)$ и рассчитываются значения скорости ω_i привода. На основании расчета строится зона прерывистых токов.

В расчетах принимают $i_e = 0,02 \div 0,1$; $\omega_1 = 314$ 1/с.

$$l_e = \frac{\sqrt{2} \cdot \cos \alpha_M}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_M},$$

где $m=6$ – пульсность схемы выпрямления; α_M – максимальный угол управления.

Тогда требуемая индуктивность СД:

$$L_{CD} = L_\Sigma - L_J - L_{вд} - L_T, \text{ Гн}$$

Значение L_J определяется по формуле; $L_{вд}$ – индуктивность уравнительного

дросселя

Условия выбора сглаживающего дросселя:

$$L_{н.сд} \geq L_{сд}; I_{н.сд} \geq I_{н}$$

По таблицам из приложения выбираются дроссели серии ФРОС, СРОС, СРОСЗ, ТРОС.

Уравнительные дроссели в системе могут отсутствовать, если преобразователь однокомплектный или для двухкомплектного преобразователя выбрано раздельное управление комплектами вентиляей, в этом случае уравнительные токи в системе ТП-Д не возникают.

Требуемую индуктивность УД можно определить по формуле:

$$L_{уд} = k_{д} \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2нф}}{\omega_1 \cdot I_{уд}},$$

где $k_{д}$ - коэффициент действующего значения уравнительного тока (см. табл.1.6.); Построить кривую $k_{д}(\alpha)$ и определить $k_{д}$ при $I_{уд} = 0,1 \cdot I_{н}$ - допустимое значение уравнительного тока, А.

Таблица 3 Зависимость коэффициента $k_{д} = f(\alpha^{\circ})$ для $m=6$

α°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$k_{д}$	0	0,02	0,05	0,12	0,25	0,40	0,63	0,42	0,26	0,18

Выбираются УД, при соблюдении условия: $L_{н.уд} \geq L_{уд}; I_{н.уд} \geq I_{н}$

Уравнительных дросселей в схеме может быть четыре, если они насыщающиеся, или два (например, УД1 и УД3 или УД2 и УД4), если они не насыщающиеся.

Для построения механических характеристик $\omega(M)$ в зоне прерывистых токов необходимо определить граничные моменты двигателя: $M_{гр.i} = I_{гр.i} \cdot K$

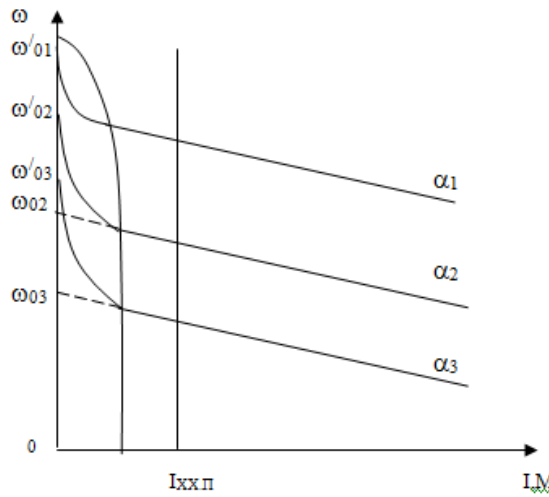


Рисунок 1 – Статические характеристики системы ТП-Д с учетом зоны прерывистых токов

Методика расчета характеристик $\omega(I)$, $\omega(M)$ в зоне прерывистых токов:

1) Задаются угловой длительностью прохождения тока $\lambda = 0^\circ \div 2\pi/m$ (8÷10 значений)

2) Определяют ток якоря для каждого значения λ :

$$I_{я} = \frac{E_{d0}}{X_T + \omega_1 L_d} \cdot \frac{\sin \frac{\lambda}{2}}{\sin \frac{\pi}{m}} \left(1 - \frac{\lambda}{2} \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\lambda}{2} + \alpha - \frac{\pi}{m} \right)$$

3) Для каждого значения λ определяют ЭДС якоря ДПТ:

$$E = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{\lambda} \cdot \left[\sin \left(\lambda + \alpha - \frac{\pi}{m} \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right] - (2R_{Тр} + R_{с.др} + 2R_{у.др} + R_{я}) \cdot I_{я}$$

4) Определяют скорость вращения $\omega = E/k\Phi$

5) Определяют $M = I_{я} \cdot k\Phi$

6) По данным расчета строят зависимость $\omega(M)$ в отдельных осях.

7) Скорость идеального холостого хода:

$$\omega'_{0i} = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{K} \text{ при } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{m} \\ \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi} \cdot \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right)}{K} \text{ при } \alpha > \frac{\pi}{m} \end{cases}$$

Статические механические характеристики в системе ПЧ-АД необходимо рассчитать для следующих случаев:

а) при пропорциональном законе регулирования напряжения;

б) при компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора;

в) при компенсации падения напряжения на полном сопротивлении обмотки статора.

По данным расчетов строятся семейства этих характеристик $\omega=f(M)$, причем для сравнения их следует построить в одних координатных осях.

Основные технические данные к.з. асинхронных двигателей, механические характеристики частотно-регулируемого электропривода которых следует рассчитать, приведены в таблицах П2 и П3. Предварительно необходимо определить синхронные скорости и частоты напряжения на выходе ПЧ, обеспечивающие работу электропривода с заданными установившимися скоростями. Для этого находится падение скорости $\Delta\omega$, при работе с заданной скоростью ω_{c1} на естественной характеристике при частоте $f_{1н}=50$ Гц (рис. 2). Это позволяет определить ее жесткость $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta\omega} = \frac{\Delta M_{c1}}{\Delta\omega_{c1}}$.

Зная ее, можно для каждой из характеристик определить $\Delta\omega_{c,i} = \frac{\Delta M_{c,i}}{\beta}$ при соответствующих $\omega_{c,i}$ и $M_{c,i}$. При сложении $\Delta\omega_{c,i}$ с заданной скоростью $\omega_{c,i}$ находятся соответствующие синхронные скорости $\omega_{0,i}$ и необходимые частоты напряжения на выходе ПЧ: $f_i = f_{1н} \cdot \frac{\omega_{0,i}}{\omega_{0,н}}$

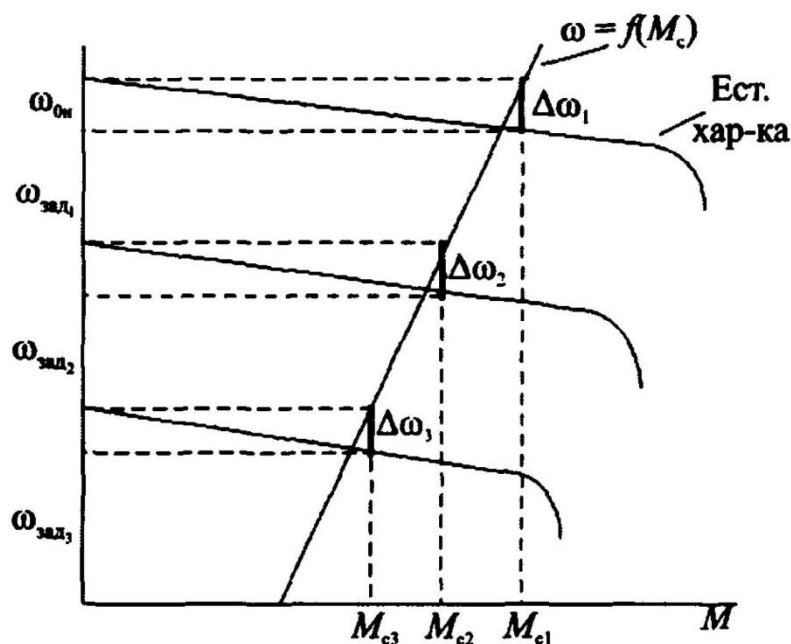


Рисунок 2 – Статические механические характеристики при разных частотах

При расчете статических механических характеристик используется уравнение электромагнитного момента:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{\omega_{0н}} \cdot \left[\frac{v_1^2}{2 \cdot R_1 \cdot \varphi_1 + (b^2 + c^2 \cdot \varphi_1^2) \cdot \frac{S_a}{R_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \varphi_1^2) \cdot \frac{R_2'}{S_a}} \right]$$

Где $m_1 = 3$ – число фаз напряжения двигателя; $U_{1\phi}$ – номинальное фазное напряжение; $\omega_{0н} = \frac{2\pi f_{1н}}{p_n}$ – синхронная скорость при номинальной частоте;

$S_a = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0н}}$ – абсолютное скольжение; v_1 – относительное напряжение $\frac{U_1}{U_{1н}}$; φ_1 –

относительная частота $\frac{f_1}{f_{1н}}$; коэффициенты уравнения электромагнитного момента:

$$b = R_1 \cdot \left(1 + \frac{X_2'}{X_\mu} \right); \quad c = X_1 + X_2' + \frac{X_1 \cdot X_2'}{X_\mu}; \quad d = \frac{R_1}{X_\mu}; \quad e = 1 + \frac{X_1}{X_\mu}; \quad X_\mu \approx \frac{U_{1л}}{I_{xx}}$$

При пропорциональном законе регулирования:

$$\frac{f_1}{f_{1н}} = \frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{v_1}{\varphi_1} = 1$$

Тогда уравнение момента принимает вид:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{\omega_{0н}} \cdot \left[\frac{1}{\frac{2 \cdot R_1}{\varphi_1} + \left(\frac{b^2}{\varphi_1^2} + c^2 \right) \cdot \frac{S_a}{R_2'} + \left(\frac{d^2}{\varphi_1^2} + e^2 \right) \cdot \frac{R_2'}{S_a}} \right]$$

Задаваясь значениями S_a от 0 до 1 (не менее 8÷10 значений), при найденных ранее частотах $\varphi_1 = \frac{f_1}{f_{1н}}$, $\varphi_2 = \frac{f_2}{f_{1н}}$, $\varphi_3 = \frac{f_3}{f_{1н}}$ рассчитываем семейство механических характеристик. Результаты расчетов сводятся в таблицу, на основе которой строится семейство характеристик.

При компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора $R_1 = 0$, $b = 0$, $d = 0$ и формула момента принимает вид:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{\omega_{0н}} \cdot \left[\frac{\nu_1^2}{c^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot \frac{S_a}{R_2'} + e^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot \frac{R_2'}{S_a}} \right]$$

В этом случае при регулировании по пропорциональному закону напряжение, подаваемое на обмотку статора при $f_{li} < f_{1н}$, равно $U'_{1\phi}$. Величина его находится из того условия, что при $\varphi_1 = 1$ и $\omega = \omega_n$ (момент равен номинальному).

$$U'_{1\phi} = \sqrt{\frac{\omega_{0н} \cdot M_n}{3} \cdot \left(c^2 \cdot \frac{S_n}{R_2'} + e^2 \cdot \frac{R_2'}{S_n} \right)}$$

Задаваясь значениями S_a от 0 до 1 (не менее 8÷10 значений), при найденных ранее относительных частотах и напряжениях $\nu_1 = \varphi_1 = \frac{f_1}{f_{1н}}$, $\nu_2 = \varphi_2 = \frac{f_2}{f_{1н}}$,

$\nu_3 = \varphi_3 = \frac{f_3}{f_{1н}}$ рассчитывают семейство механических характеристик, и результаты расчетов сводят в таблицу.

При работе электропривода в области частот $f_1 > f_{1н}$ напряжение $U'_{1\phi} = U_{1н}$. При компенсации падений напряжения на полном сопротивлении статора ($R_1 = 0$; $X_1 = 0$; $b = 0$; $d = 0$; $c = X_2'$; $e = 1$) формула момента принимает вид:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{\omega_{0н}} \cdot \left[\frac{\nu_1^2}{X_2'^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot \frac{S_a}{R_2'} + \varphi_1^2 \cdot \frac{R_2'}{S_a}} \right]$$

В этом случае при регулировании по пропорциональному закону напряжение, подаваемое на обмотку статора при $f_{li} < f_{1н}$, равно $U'_{1\phi}$. Величина его находится из того условия, что при $\varphi_1 = 1$ и $\omega = \omega_n$ (момент равен номинальному).

$$U'_{1\phi} = \sqrt{\frac{\omega_{0н} \cdot M_n}{3} \cdot \left(X_2'^2 \cdot \frac{S_n}{R_2'} + \frac{R_2'}{S_n} \right)}$$

Задаваясь значениями S_a от 0 до 1 (не менее 8÷10 значений), при найденных ранее относительных частотах и напряжениях $\nu_1 = \varphi_1 = \frac{f_1}{f_{1н}}$, $\nu_2 = \varphi_2 = \frac{f_2}{f_{1н}}$,

$\nu_3 = \varphi_3 = \frac{f_3}{f_{1н}}$ рассчитывают семейство механических характеристик, и результаты

расчетов сводят в таблицу.

По данным трех таблиц строится семейство механических характеристик. Их, как сказано выше, следует построить в одних координатных осях (каждое семейство на отдельном графике).

3.11 Проверка выбранного двигателя по нагреву

К п. 11. При проверке выбранного двигателя по нагреву методом средних потерь не учитывать потери в переходных режимах. Порядок определения средних потерь следующий:

1) Определяются мощности, развиваемые двигателем на каждой из установившихся скоростей

$P_i = M_{c,i} \cdot \omega_{c,i}$, где $M_{c,i}$ – приведенный момент сопротивления, соответствующий каждой из установившихся скоростей двигателя $\omega_{c,i}$;

2) Определяется коэффициент загрузки X_i двигателя по мощности на каждой из $\omega_{c,i}$:

$$X_i = \frac{P_i}{P_n}$$

3) Определяются полные номинальные ΔP_n , номинальные переменные V_n и постоянные потери K , а также коэффициент потерь a :

$$\Delta P_n = P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right);$$

$$V_n = I_n^2 \cdot R_{\Sigma} - \text{для двигателей постоянного тока};$$

$$V_n = I_{1n}^2 \cdot R_1 + I_{2n}'^2 \cdot R_2' - \text{для асинхронного двигателя};$$

$$K = \Delta P_n - V_n; \quad a = \frac{K}{V_n}$$

4) Потери в двигателе ΔP_i на каждом участке работы с установившейся скоростью:

$$\Delta P_i = \Delta P_n \cdot \left(\frac{a + X_i^2}{a + 1} \right)$$

Средние потери в двигателе постоянного тока за цикл работы

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \Delta P_0 \cdot t_{\text{ц}}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0 \cdot \beta}$$

Средние потери в асинхронном двигателе за цикл работы

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0 \cdot \beta}$$

где ΔP_0 – потери в двигателе постоянного тока на возбуждение (принять равным 2 % от $\Delta P_{\text{н}}$); $t_{\text{ц}}$ – длительность цикла; β – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения во время паузы (принять равным 0,75).

5) Пересчет потерь из условия, что $t_{\text{доп}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{о,ср}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{н}} \cdot \frac{t_{\text{доп}} - t_{\text{о,ср}}}{t_{\text{доп}} - 40}$$

б) Делается вывод о возможности установки двигателя, если выполняется указанное условие или вывод о том, что необходимо выбрать двигатель ближайшей большей мощности, если условие не выполняется.

3.12 Расчет потерь энергии и энергетических показателей в установившихся режимах работы

К п. 12. Расчет энергетики выполнить для спроектированной системы электропривода. Для этого необходимо определить:

а) полезно затраченную энергию за цикл и потери за цикл в установившихся режимах работы – $W_{\text{в}}$ и $\Delta W_{\text{в}}$;

б) общий расход энергии за цикл, час, год - $W_{\text{ц}}$, $W_{\text{ч}}$, $W_{\text{г}}$. Расход электроэнергии за год $W_{\text{г}}$ рассчитать из условия работы предприятия в две смены длительностью каждая по 8 часов и 250 рабочих дней в году.

в) потери энергии в двигателе и преобразователе - $\Delta W_{\text{д}}$ и $\Delta W_{\text{п}}$ (показать отдельно);

г) отношение суммарных потерь энергии за цикл к общему расходу энергии, %- $\Delta W_{\text{ц}}/W_{\text{в}}$;

д) КПД и коэффициент мощности электропривода в каждом установившемся режиме работы, а также потребление реактивной энергии за цикл. Независимо от

типа проектируемой системы ЭП его КПД определить по известному соотношению:

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{li}} = \frac{P_i}{P_i + \Delta P_{\Sigma i}} = \frac{W_{yi}}{W_{yi} + \Delta W_{\Sigma yi}},$$

где P_i , P_{li} , $\Delta P_{\Sigma i}$, W_{yi} , $\Delta W_{\Sigma yi}$ - соответственно, мощность на валу двигателя и потребляемая из сети, суммарные потери мощности в силовой части схемы ЭП, энергия, затраченная на совершение полезной работы и соответствующие ей потери энергии в i -м установившемся режиме работы.

$$P_i = M_{ci} \cdot \omega_{ci} \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}$$

Определение других составляющих написанной формулы КПД рассмотрено ниже.

Потребление из сети реактивной энергии W_P за цикл независимо от системы ЭП определить по известному соотношению:

$$W_P = \sum_1^n Q_{li} \cdot t_{Pi} = \sum_1^n (P_{li} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i) \cdot t_{Pi},$$

где n , Q_{li} , t_{Pi} , $\operatorname{tg} \varphi_i$ - число установившихся режимов работы за цикл; реактивная мощность, потребляемая из сети (ВАр), время работы и коэффициент реактивной мощности в i -м установившемся режиме; $\operatorname{tg} \varphi_i$ - определяется по найденному коэффициенту мощности $\cos \varphi_i$ (см далее).

Примечание: в системе ТП-Д потребление W_P не рассчитывать.

Расход электроэнергии выразить в кВт*ч. Годовой расход энергии рассчитывается для двухсменного графика работы при 250 рабочих днях. Общий расход энергии за цикл составляет:

$$W_{ц} = W_y + \Delta W_y + \Delta W_{III} - W_c$$

Энергию, затраченную двигателем на совершение полезной работы в установившихся режимах работы, независимо от системы электропривода рекомендуется определять по формуле:

$$W_y = \sum_1^n M_{ci} \cdot \omega_{ci} \cdot t_{Pi} \text{ (Вт*с)}$$

Система Г-Д.

Потери энергии в приводном двигателе:

$$\Delta W_{Д} = \sum_1^n \left[\Delta P_B + (\Delta P_M + \Delta P_C)_H \cdot \left(\frac{\omega_{ci}}{\omega_H} \right)^2 + M_{ci} \cdot (\omega_{OP} - \omega_{ci}) \right] \cdot t_{pi}, \quad (1)$$

где $\Delta P_B = U_B \cdot I_B$ - потери мощности на возбуждение; $(\Delta P_M + \Delta P_C)_H$ - сумма потерь мощности (механических и в стали) при номинальной скорости двигателя; ω_{OP} - скорость идеального х.х. двигателя на регулировочной характеристике.

$$(\Delta P_M + \Delta P_C)_H = \frac{P_H}{\eta_H} (1 - \eta_H) - M_H \cdot (\omega_0 - \omega_H) - \Delta P_{BH}, \quad (2)$$

где ω_0 - скорость идеального х.х. на естественной характеристике двигателя.

Потери энергии в генераторе (ГПТ):

$$\Delta W_{Г} = \sum_1^n [\Delta P_{BГi} + \Delta P_M + \Delta P_C + I_{ci}^2 \cdot R_{яГ}] \cdot t_{pi}, \quad (Вт*с) \quad (3)$$

Суммарные потери мощности в стали и механические потери в ГПТ

$$\Delta P_M + \Delta P_C = \frac{P_{HG}}{\eta_{HG}} (1 - \eta_{HG}) - \Delta P_{BГH} - I_{HG}^2 \cdot R_{яГ}, \quad (4)$$

где P_{HG} , η_{HG} , $\Delta P_{BГH}$, I_{HG} - соответственно, номинальные мощности, КПД, потери на возбуждение и ток якоря генератора.

Потери энергии в гонном (сетевом) двигателе генератора:

$$\Delta W_{АД} \cong \sum_1^n [M_i \omega_0 \cdot S_i \cdot (1 + R_1/R_2')] \cdot t_{pi}, \quad (Вт*с) \quad (5)$$

где ω_0 , M_i , S_i - скорость идеального х.х. асинхронного двигателя; его электромагнитный момент и скольжение в i -м установившемся режиме работы системы. (В формуле пренебрегли постоянными потерями мощности).

$$M_i = M_{Гi} + M_{ХХ.Г} + M_{ХХ.АД}, \quad (6)$$

где $M_{Гi}$, $M_{ХХ.Г}$, $M_{ХХ.АД}$ - электромагнитный момент генератора в i -м установившемся режиме работы; моменты холостого хода генератора и АД.

$$M_{Гi} = (C_E \cdot \Phi_i)_Г \cdot I_{Ci}; \quad (7)$$

$$M_{ХХ.Г} = \frac{P_{HG}}{\eta_{HG} \cdot \omega_{HG}} - (C_E \cdot \Phi_H)_Г \cdot I_{HG}, \quad (8)$$

где Φ_i , I_{ci} - магнитный поток и ток якоря генератора в i -м статическом режиме работы. Значения скольжений S_i асинхронного двигателя определить по

найденным значениям M_i и построенной ранее его естественной характеристике.

Тогда потери энергии за цикл работы в установившихся режимах:

$$\Delta W_y = \Delta W_d + \Delta W_r + \Delta W_{Ad}, \quad (\text{Вт} \cdot \text{с}) \quad (9)$$

Коэффициент мощности гонного двигателя (системы ГД) при работе приводного двигателя постоянного тока с установившейся скоростью

$$\cos \varphi_i = \frac{S_i \cdot S_K \cdot (2 + \alpha \cdot S_i)}{2 \cdot \sqrt{[a_1^2 \cdot S_K^2 \cdot (1 + \alpha \cdot S_i) + S_i^2 \cdot (1 + 2 \cdot a_1)] \cdot (S_i^2 + \alpha \cdot S_i \cdot S_K + S_K^2)}}, \quad (10)$$

где $\alpha = 2 \cdot R_1 / R_2'$, $a_1 = I_{\mu H} / I'_{2ПР}$, S_K – критическое скольжение гонного двигателя.

Номинальный ток намагничивания гонного двигателя:

$$I_{\mu H} \approx I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_H + \sqrt{\lambda_{MH}^2 - 1}} \right), \quad (11)$$

где λ_{MH} – номинальная перегрузочная способность гонного двигателя.

Предельный приведенный ток

$$I'_{2ПР} = \frac{U_{H\phi}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \quad (12)$$

Система ТП-Д.

Потери энергии в установившемся режиме работы состоят из потерь в двигателе и тиристорном преобразователе (ТП):

$$\Delta W_y = \Delta W_d + \Delta W_{ТП}$$

Потери энергии в двигателе определяются по уравнению (1).

Потери энергии в ТП

$$\Delta W_{ТП} = \sum_1^n \left[\Delta P_{XX} + (\Delta P_{K3} + \Delta P_{PH}) \cdot \left(\frac{I_{Ci}}{I_{HP}} \right)^2 + \Delta P_T \cdot \frac{I_{Ci}}{I_{HP}} \right] \cdot t_{Pi}, \quad (11)$$

где ΔP_{XX} , ΔP_{K3} , ΔP_{PH} , ΔP_T – соответственно потери мощности х.х. и к.з.

согласующего трансформатора (токоограничивающих реакторов), потери при номинальном токе якоря в уравнивательных и сглаживающих дросселях, а также в тиристорах; I_{HP} – номинальный ток преобразователя.

$$\Delta P_{PH} = \Delta P_{уд} + \Delta P_{сд}; \quad \Delta P_{уд} = I_H^2 \cdot R_{уд}; \quad \Delta P_{сд} = I_H^2 \cdot R_{сд}. \quad (12)$$

Здесь I_H – номинальные токи уравнивательных и сглаживающих дросселей.

Потери мощности в тиристорах ΔP_T рекомендуется принять равным 0.

Коэффициент мощности системы ТП-Д в i -м установившемся режиме работы определить по формуле:

$$\cos \varphi_i \approx \frac{U_{di}}{E_{do} \sqrt{\frac{1}{K_{HT}^2} + 0,15 \frac{I_H}{I_{ci}} \sqrt{1 - \frac{U_{di}^2}{E_{do}^2}}}}, \quad (13)$$

$$U_{di} = E_{do} \cdot \cos \alpha_i, K_{HT} \approx 0.78 \quad (\text{при } m = 6)$$

где U_{di} , K_{HT} , I_H - напряжение на якоре двигателя в i -м режиме работы; коэффициент искажения тока; номинальный ток двигателя.

Система ПЧ-АД.

Потери энергии в АД и ПЧ в установившемся режиме

$$\Delta W_y = \Delta W_{АД} + \Delta W_{ПЧ} \quad (14)$$

Потери энергии в асинхронном двигателе:

$$\Delta W_{АД} = \sum_1^n \left[\Delta P_{MH} \cdot \left(\frac{\omega_{ci}}{\omega_H} \right)^2 + \Delta P_{C1H} \cdot \left(\frac{f_i}{f_H} \right)^{3,3} + \right. \\ \left. + 3 \cdot I_{\mu H}^2 \cdot R_1 + M_{ci} \cdot \omega_{opi} \cdot S_i \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \right] \cdot t_{pi} \quad (15)$$

где ΔP_{MH} - механические потери при номинальной скорости; ΔP_{C1H} - потери в стали статора при номинальной частоте; $I_{\mu H}$ - номинальный ток намагничивания (см. расчет потерь в системе ГД, формула (11)); ω_{opi} - скорость идеального х.х. при работе двигателя на регулировочной характеристике, соответствующей i -му установившемуся режиму; S_i - скольжение двигателя, соответствующее этому режиму.

$$\Delta P_{MH} = K_H - \Delta P_{C1H} - 3 \cdot I_{\mu H}^2 \cdot R_1, \quad S_i = \frac{\omega_{opi} - \omega_{ci}}{\omega_{opi}} \quad (16)$$

Постоянные потери мощности в двигателе

$$K_H = \frac{P_H}{\eta_H} (1 - \eta_H) - M_H \cdot \omega_0 \cdot S_H \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \quad (17)$$

$$\Delta P_{C1H} = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_H - M_H \cdot \omega_0 - 3 \cdot I_{1H}^2 \cdot R_1$$

где M_H, ω_0 - номинальный электромагнитный момент и скорость идеального х.х. на естественной характеристике.

Потери энергии в ПЧ рекомендуется определять по приближенной формуле

$$\Delta W_{ПЧ} \approx \sum_1^n [S_H \cdot \cos \varphi_H \cdot (1 - \eta_H) \cdot X_i^2] \cdot t_{pi}, \quad (18)$$

здесь S_H - номинальная полная мощность, потребляемая ТПЧ из сети; X_i - коэффициент загрузки преобразователя частоты по току, $X_i = I_{i'} / I_{HП}$; где $I_{i'}$, $I_{HП}$ - ток статора и номинальный ток ТПЧ, двигателя при работе с установившейся скоростью в i -м режиме.

$$I_{1H} \cong \sqrt{I_{\mu H}^2 + I_{2i}'^2 \cdot (1 + 2 \cdot a_1)}, \quad a_1 = \frac{I_{\mu H}}{I_{2.ПР}'} \quad (19)$$

Приведенный ток ротора при работе с установившейся скоростью.

$$I_{2i}' = \sqrt{\frac{M_{ci} \cdot \omega_{opi} \cdot S_i}{3 \cdot R_2'}} \quad (20)$$

При отсутствии в паспортных данных ТПЧ сведений об энергетических показателях следует принять $\cos \varphi_H = 0.85 \div 0.87$, $\eta_H = 0.87 \div 0.9$.

4. ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Принципиальные, функциональные и структурные схемы электропривода по системам Г-Д, ТП-Д и ПЧ-АД изображены на рисунках 3 – 18.

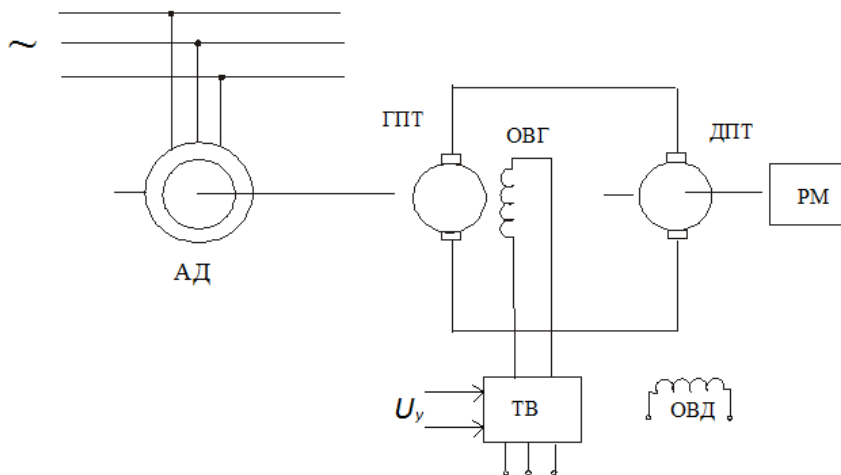


Рис. 3. Принципиальная схема разомкнутой системы Г-Д

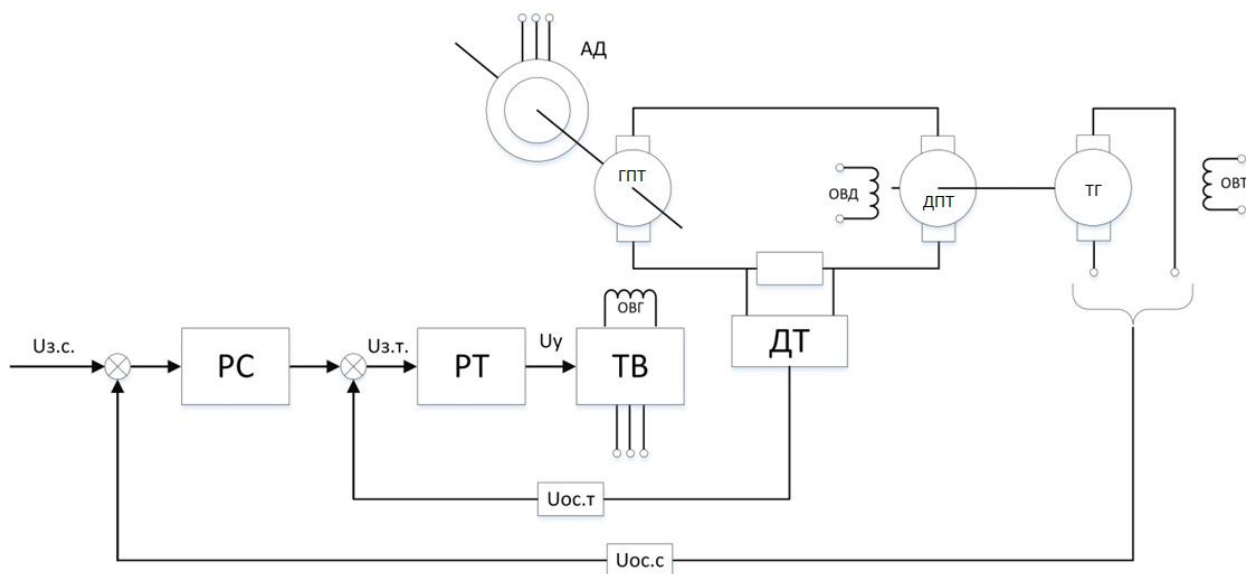


Рис. 4. Функциональная схема замкнутой двухконтурной системы Г-Д

$U_{з.с}$ – напряжение задания скорости, $U_{з.т}$ – напряжение задания тока, U_y – напряжение управления,

РС – регулятор скорости, РТ – регулятор тока, ТВ - тиристорный возбудитель, ОВГ - обмотка возбуждения генератора, ДТ - датчик тока (с шунтом), ГПТ – генератор постоянного тока, АД – асинхронный гонный двигатель, ДПТ – двигатель постоянного тока, ОВД – обмотка возбуждения двигателя, ТГ – тахогенератор, ОВТГ – обмотка возбуждения тахогенератора, $U_{oc.c}$ – напряжение обратной связи по скорости, $U_{oc.т}$ – напряжение обратной связи по току.

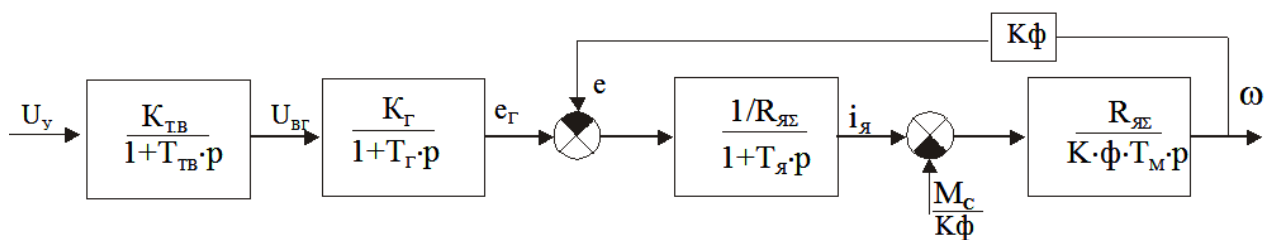


Рис. 5. Структурная схема разомкнутой системы Г-Д

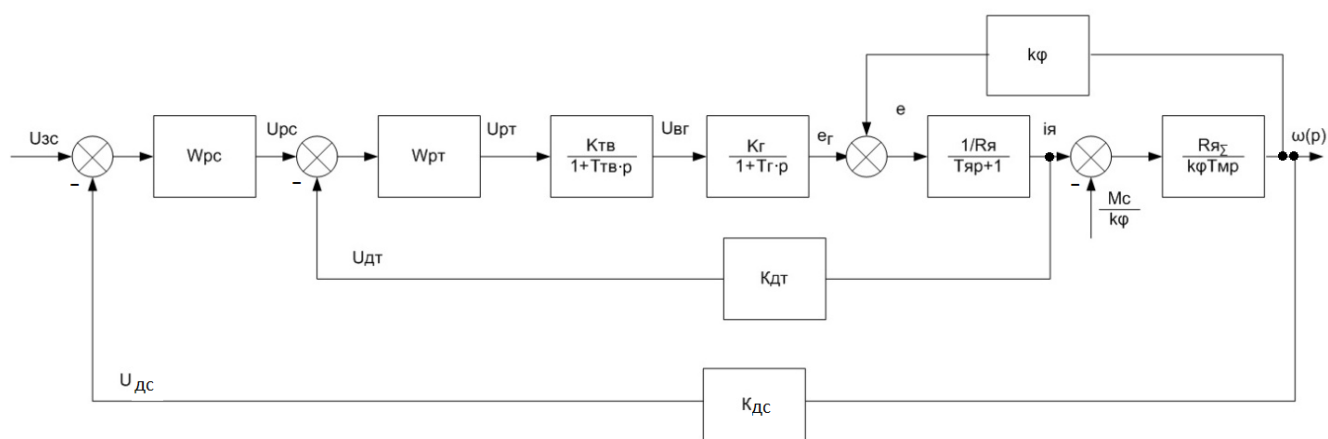


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной замкнутой системы Г-Д

U_y – напряжение управления, $K_{Г}$ – коэффициент усиления генератора, $K_{ТВ}$ – коэффициент усиления тиристорного возбудителя, $T_{Г}$ – механическая постоянная времени генератора, $T_{ТВ}$ – электромагнитная постоянная времени тиристорного возбудителя, $e_{Г}$ – ЭДС генератора, $T_{я}$ – электромагнитная постоянная времени якоря машины, $i_{я}$ – ток в якорной цепи, $M_{с}$ – момент сопротивления рабочей машины, $k_{Ф}$ – коэффициент ЭДС приводного двигателя, $R_{яΣ}$ – суммарное сопротивление якорной цепи, $T_{М}$ – электромеханическая постоянная времени машины, e – противо ЭДС двигателя, ω – скорость двигателя, $K_{дт}$, $K_{дс}$ – коэффициенты датчиков тока и скорости, $W_{рс}$, $W_{рт}$ – передаточные функции регуляторов скорости и тока

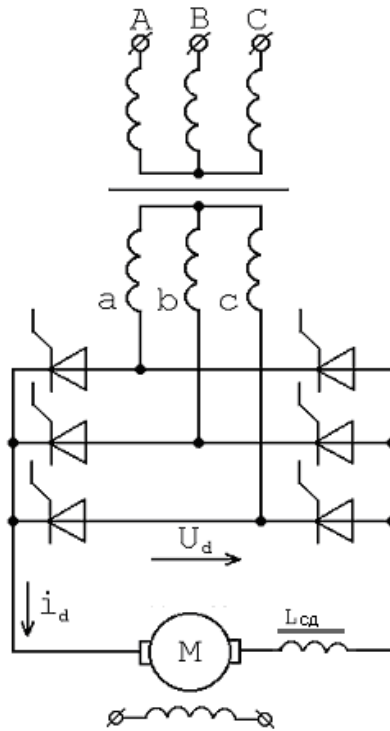


Рис. 7. Принципиальная схема силовой части нереверсивного электропривода по системе ТП-Д

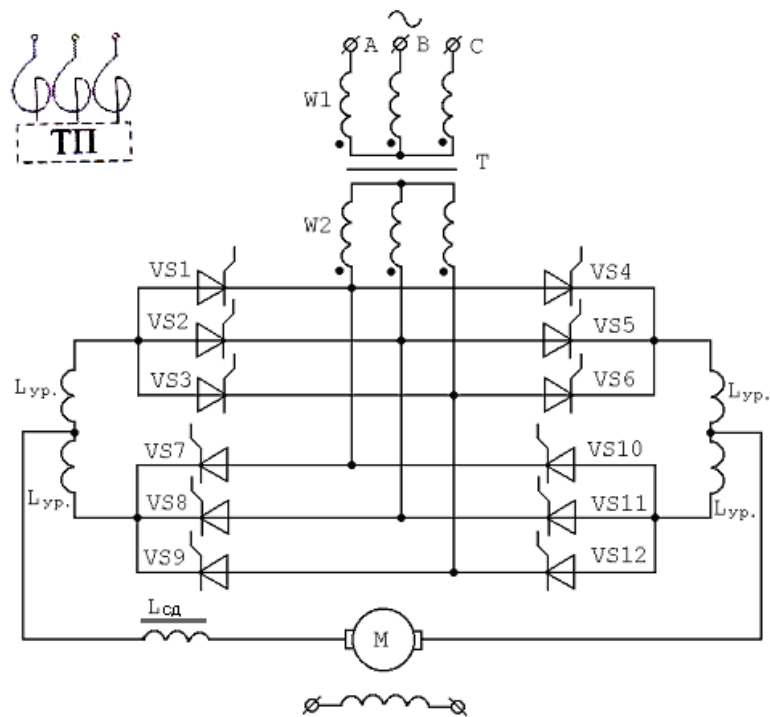


Рис. 8. Принципиальная схема силовой части реверсивного электропривода по системе ТП-Д

Примечание. При выборе двигателя постоянного тока на 440 В в системе ТП-Д вместо трансформаторов ТП подключается к сети 380 В через токоограничивающие реакторы.

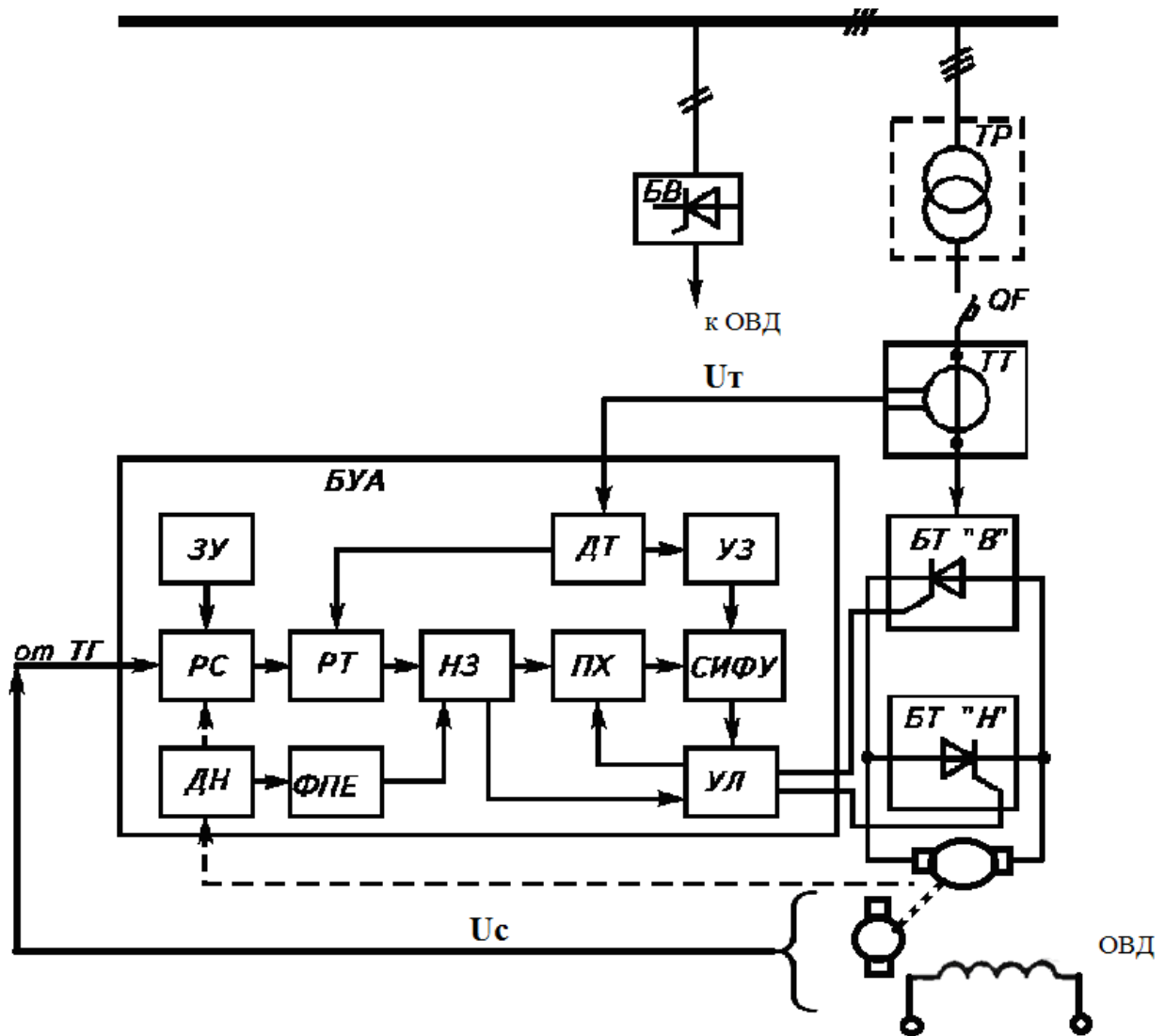


Рис. 9. Функциональная схема замкнутой двухконтурной системы ТП-Д

ОВД – обмотка возбуждения двигателя ; ТР – силовой согласующий трансформатор; ТТ – трансформатор тока; БТ "В" и БТ "Н" - блоки тиристорные (комплекты "вперед" и "назад"); БВ – блок тиристорного возбудителя; ТГ – тахогенератор; БУА – блок управления агрегатом; ЗУ – задающее устройство; ДТ – датчик тока; УЗ – узел защиты; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; НЗ – нелинейное звено; ПХ – переключатель характеристик; СИФУ – система импульсно-фазового управления; ДН – датчик напряжения; ФПЕ – функциональный преобразователь ЭДС; УЛ – устройство логическое, U_с – напряжение обратной связи по скорости, U_т – напряжение обратной связи по току.

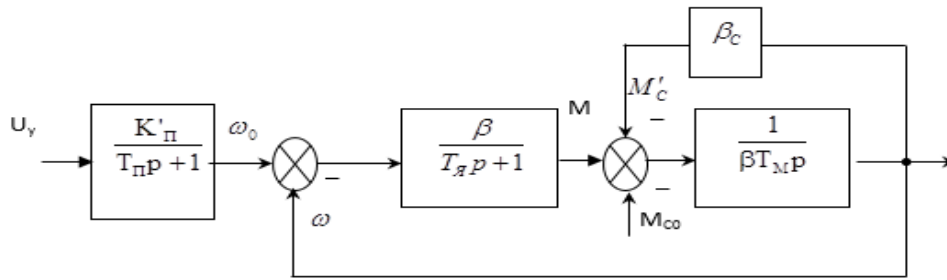


Рис. 10. Структурная схема разомкнутой замкнутой системы ТП-Д

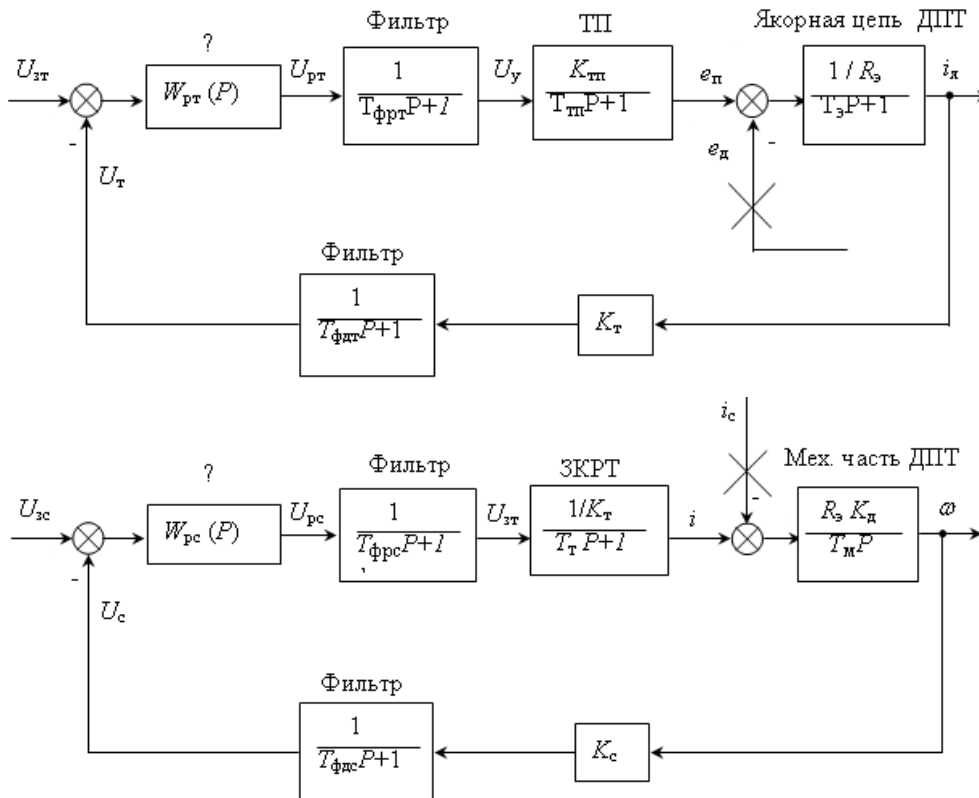


Рис. 11. Структурные схемы замкнутой системы ТП-Д с регулятором тока (а) и скорости (б)

U_y – напряжение управления, ω_0 – скорость идеального холостого хода двигателя, K'_n – коэффициент усиления тиристорного преобразователя по напряжению, T_n – постоянная времени тиристорного преобразователя, β – жесткость механической характеристики двигателя, β_c – жесткость механической характеристики механизма; $T_я$ – электромагнитная постоянная времени якоря, $T_м$ – электромеханическая постоянная времени машины, M – электромагнитный момент, $M_{с0}$ – момент холостого хода механизма, M'_c – приведенный момент сопротивления механизма, $T_м$ – некомпенсированная (малая) постоянная времени; K_c – коэффициент усиления обратной связи по скорости; K_t – коэффициент усиления обратной связи по току; ω – скорость двигателя; $T_з$ – электромагнитная постоянная времени; $T_{тп}$, $T_{фрт}$, $T_{фдт}$ – малые постоянные времени тиристорного преобразователя и фильтров; e_d – э.д.с. двигателя; $W_{рt}$ – передаточная функция регулятора тока якоря и скорости; $U_{зт}, U_{зс}$ – напряжения задания тока и скорости, ЗКРТ – замкнутый контур регулирования тока.

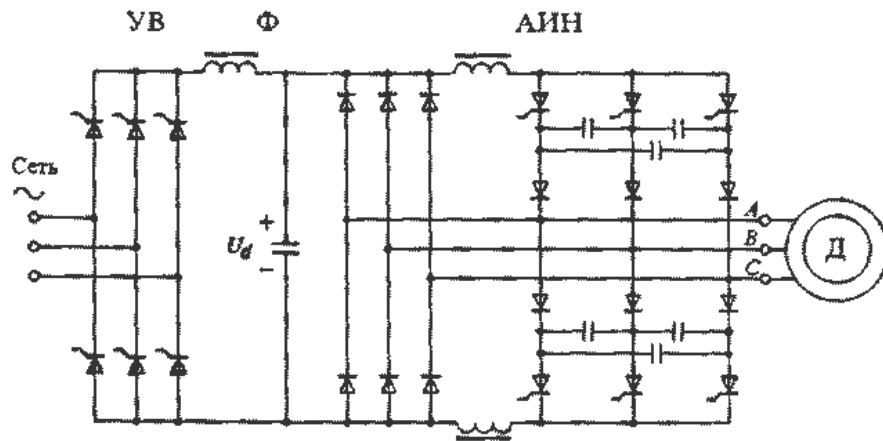


Рис. 12. Принципиальная схема силовой части электропривода по системе ПЧ-АД с тиристорным преобразователем на базе АИН

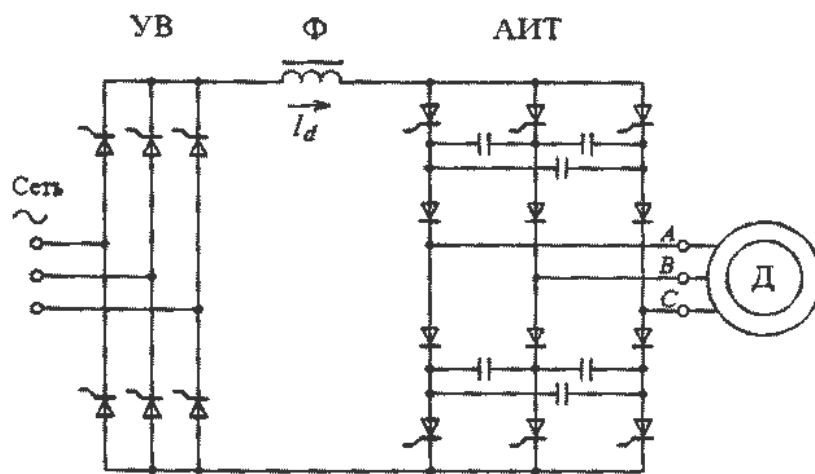


Рис. 13. Принципиальная схема силовой части электропривода по системе ПЧ-АД с тиристорным преобразователем на базе АИТ

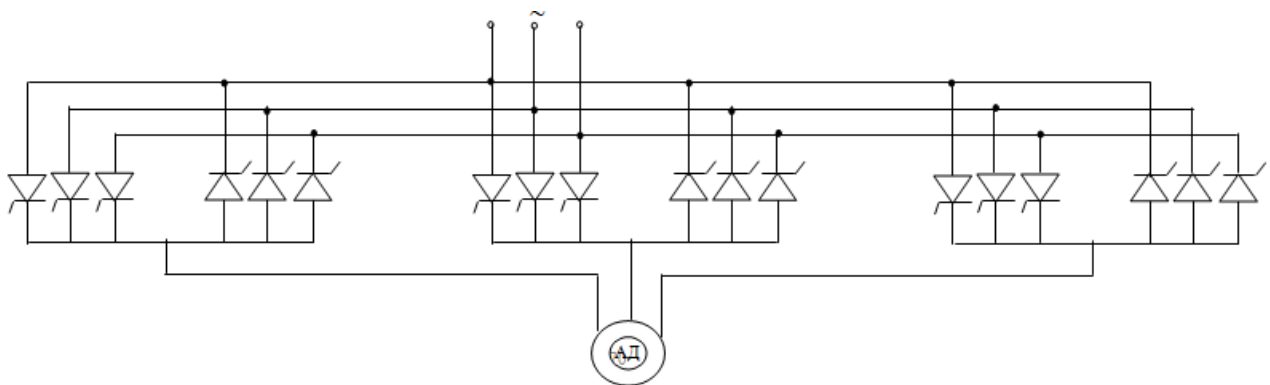


Рис. 14. Принципиальная схема силовой части электропривода по системе ПЧ-АД на базе преобразователя частоты с непосредственной связью

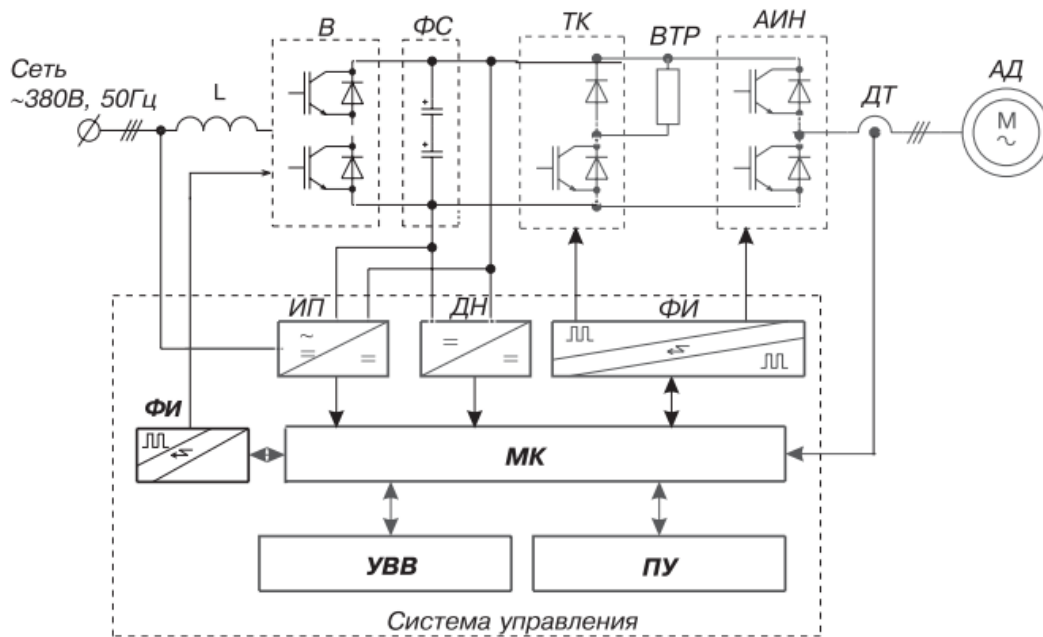


Рис. 14. Функциональная схема транзисторного электропривода АТ05

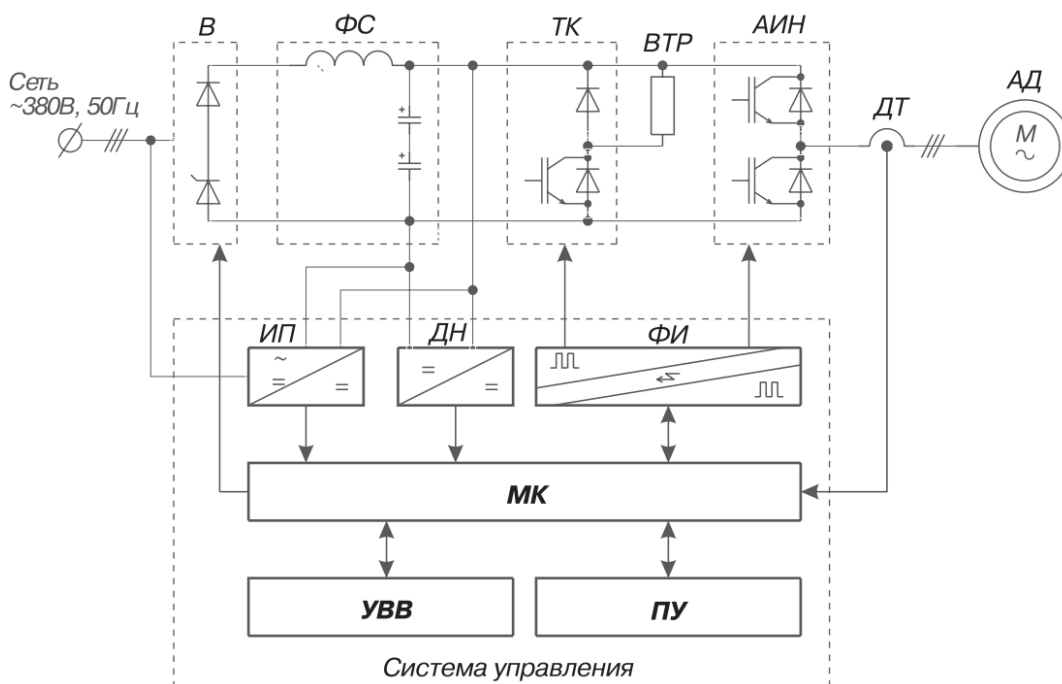


Рис. 15. Функциональная схема электроприводов АТ04, АТ06, АТ16

АД – приводной асинхронный электродвигатель; ИП – источник питания (конвертор); ДН – датчик напряжения; ФИ – формирователь управляющих сигналов транзисторов (драйвер); МК – микропроцессорный контроллер; УВВ – устройство ввода/вывода (внешний интерфейс); ПУ – пульт управления; В – силовой полупроводимый (диодно-тиристорный) выпрямитель; ФС – силовой LC фильтр звена постоянного напряжения; ТК – транзисторный (IGBT) ключ реостатного торможения (тормозной ключ), устанавливается в АТ04 и в АТ05; ВТР – внешний блок тормозного резистора; АИН – транзисторный (IGBT) автономный инвертор напряжения; ДТ – датчик тока;

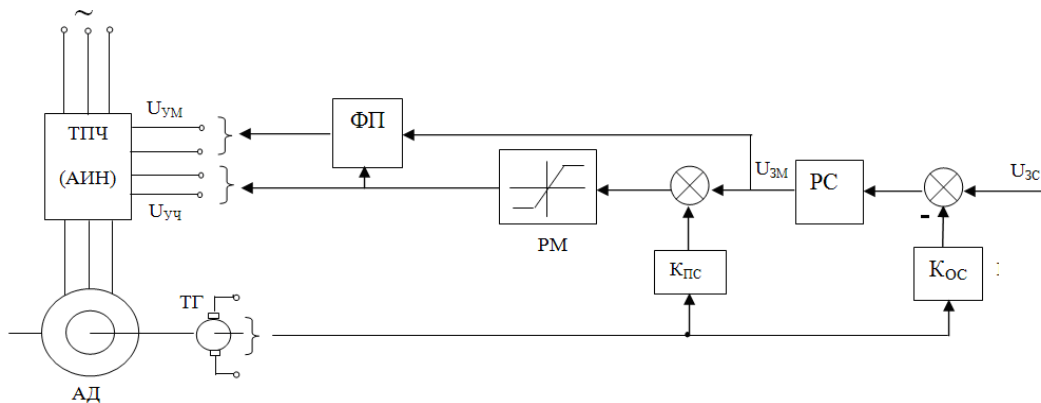


Рис. 16. Функциональная схема замкнутой системы ПЧ-АД

ТПЧ – транзисторный преобразователь напряжения; АИН – автономный инвертор напряжения; АД – асинхронный двигатель; ФП – функциональный преобразователь; РМ – регулятор момента; РС – регулятор скорости; Кос – коэффициент обратной связи по скорости; U_{zm} – напряжение задания момента; U_{zc} – напряжение задания скорости; $U_{уч}$ – напряжение управления частотой; $U_{ум}$ – напряжение управления моментом; Кпс – коэффициент преобразования по моменту; ТГ – тахогенератор

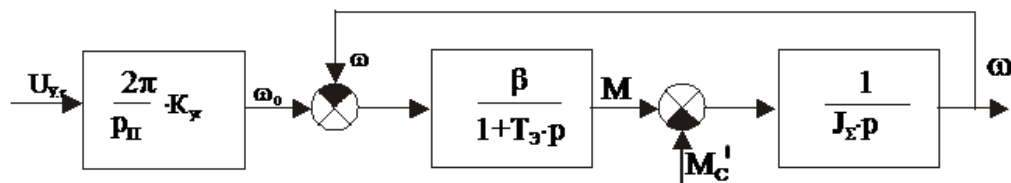


Рис. 17. Структурная схема разомкнутой системы ПЧ-АД

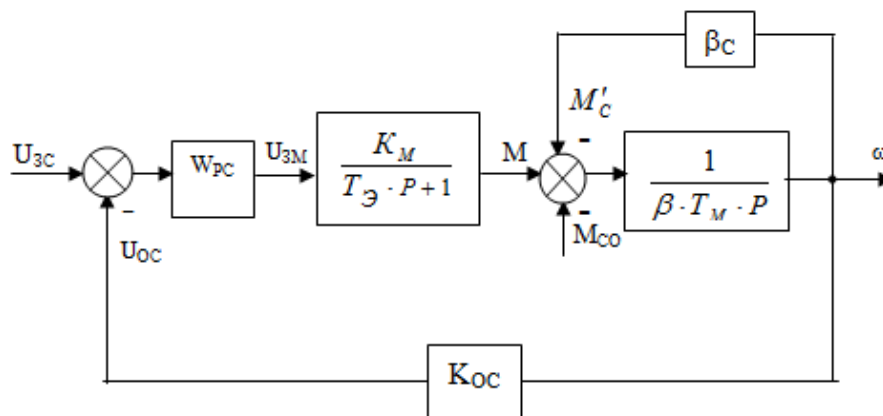


Рис. 18. Структурная схема замкнутой по скорости системы ПЧ-АД

U_y – напряжение управления; ω – угловая скорость двигателя; ω_0 – скорость идеального холостого хода двигателя; β – жесткость механической характеристики двигателя; β_c – жесткость механической характеристики механизма; T_ε – электромагнитная постоянная асинхронного двигателя; M – электромагнитный момент; M_{co} – момент холостого хода механизма; M'_c – приведенный момент сопротивления; p_π – число пар полюсов двигателя; K_y – коэффициент усиления преобразователя частоты; J_Σ – суммарный приведенный момент инерции; K_{oc} – коэффициент обратной связи по скорости; W_{pc} – передаточная функция регулятора скорости; U_{oc} – напряжение обратной связи по скорости; T_m – электромеханическая постоянная времени, T_ε – электромагнитная постоянная времени

Список рекомендуемой литературы:

1. Онищенко, Г.Б. Электрический привод: учебник для студентов высшего профессионального образования / Г.Б. Онищенко.–3-е изд., исправ. и доп.–М.: Издательский центр «Академия», 2013.–288с.
2. Новиков, В.А. Электропривод в современных технологиях: учебник для студ. учреждений высшего образования / В.А. Новиков, С.В. Савва, Н.И. Татаринцев; под ред. В.А. Новикова.– М.: Изд. центр « Академия»,2014.–400с.
3. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для бакалавров/ И.П. Копылов. –2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2015. – 675с.
4. Онищенко, Г.Б. Электрический привод: учебник для студентов высшего профессионального образования / Г.Б. Онищенко.–3-е изд., исправ. и доп.–М.: Издательский центр «Академия», 2013.–288с.
5. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. –3-е изд., испр. – М.: Академия,2007. –576с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1 Основные технические и обмоточные данные краново-металлургических двигателей независимого возбуждения серии Д, закрытых с естественным охлаждением при ПВ% = 40 %

Серия	$P_{н\prime}$ кВт	$I_{н\prime}$, А	$n_{н\prime}$, об/мин	N	2a	W_{ϵ}	$\Phi_{н\prime}$, мВб	$I_{в.н\prime}$, А	$R_{я\prime}$, Ом	$R_{в\prime}$, Ом	J, кг·м ²	$M_{доп\prime}$, Н·м
Тихоходные $U_{н\prime} = 220$ В												
Д12	2,4	14	1200	990	2	1800	4,6	0,7	1,63	270	0,05	57
Д21	3,6	21	1060	920	2	1650	5,8	1,2	0,95	128	0,125	90
Д22	4,8	26	1120	696	2	1480	7,4	1,18	0,57	130	0,155	108
Д31	6,8	37	850	738	2	1700	8,8	1,18	0,42	107	0,3	201
Д32	9,5	51	770	558	2	1470	13,2	1,62	0,27	94	0,425	319
Д41	13	70	700	492	2	1480	17	2,16	0,17	70	0,8	476
Д806	16	84	700	372	2	1400	25	2,7	0,1085	65	1,0	678
Д808	22	112	620	278	2	1250	38	3,93	0,054	44	2,0	1290
Д810	29	148	590	234	2	1500	47,5	3,9	0,0356	46,2	3,6	1915
Д812	38	192	555	210	2	1350	57,2	5,74	0,023	34,4	7,0	2800
Д814	55	280	550	608	8	1200	82,1	6,25	0,0129	35,2	10,25	4270
Д816	70	350	525	504	8	1160	104	7,44	0,0087	24,7	11,25	6040
Д818	83	415	460	504	8	1000	111	10,2	0,0066	17,3	12,5	7950
Тихоходные $U_{н\prime} = 440$ В												
Д21	3,1	9,5	1280	1610	2	1650	5,6	1,24	3,54	128	0,125	54
Д31	5,2	14,5	890	1476	2	1700	8,8	1,42	2,08	107	0,3	128
Д41	12,5	34	710	984	2	1480	17	2,2	0,695	70	0,8	349
Д808	22	56	620	556	2	1250	38,6	3,6	0,208	50	2,0	1030
Д810	29	74	590	468	2	1500	46,8	3,85	0,146	46,2	3,82	1511
Д812	36	92	560	418	2	1350	57,3	5,1	0,099	36,4	7,0	2060
Д814	55	138	550	1216	8	1200	82,1	5,5	0,052	34	10,25	3390
Д816	70	175	530	1008	8	1060	103	7,44	0,0324	24,7	16,25	4760
Д818	83	205	460	1008	8	1000	111	10,2	0,026	17,3	27,5	6370
Быстроходные $U_{н\prime} = 220$ В												
Д21	4,4	25	1460	690	2	1650	5,8	1,24	0,531	128	0,125	79
Д22	6,5	34	1510	522	2	1460	7,45	1,18	0,322	130	0,155	119
Д31	9,5	50	1360	492	2	1700	8,8	1,42	0,194	107	0,3	183
Д32	13	68	1190	372	2	1470	13,2	1,6	0,125	94	0,425	305
Д41	17,5	90	1120	310	2	1480	17	2,16	0,072	70	0,8	438
Д806	21	110	1050	246	2	1400	25	2,7	0,047	65	1,0	645
Д808	26	134	810	210	2	1250	37,2	3,9	0,0295	44	2,0	1180
Быстроходные $U_{н\prime} = 440$ В												
Д22	5,6	16	1510	1044	2	1145	7,45	3,6	1,69	45	0,155	79
Д32	12	32	1200	738	2	1140	13,2	4,3	0,534	57	0,425	235
Д806	21	55	1050	492	2	1400	25	2,7	0,205	65	1,0	510

Примечание. Двигатели допускают увеличение скорости в два раза за счет ослабления магнитного потока. При этой скорости максимальный момент не должен превышать $0,8M_{доп}$ при $U_{н\prime} = 220$ В и $0,64M_{доп}$ при $U_{н\prime} = 440$ В. Сопротивления обмоток даны при $t_{о.ср} = 20$ °С; рабочая температура обмоток $t = 115$ °С; число пар полюсов $p_n = 2$.

Таблица П2 Технические данные асинхронных двигателей серии 4АС, $U_H = 380$ В

Тип двигателя	P_H , кВт	η_H	$\cos\varphi_H$	λ_M	S_H , %	Параметры схемы замещения, о.е					J_d , кг·м ²
						x_μ	r_1	x_1	r'_2	x'_2	
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 157$ 1/с											
4АС132	8,5	0,825	0,85	2,8	6,9	2,8	0,051	0,093	0,080	0,13	0,028
4АС132	11,8	0,84	0,85	2,2	6,1	2,7	0,043	0,084	0,072	0,12	0,040
4АС160	17,0	0,845	0,86	2,2	6,1	3,7	0,045	0,082	0,064	0,13	0,10
4 АС 160	20,0	0,87	0,87	2,2	5,3	3,6	0,039	0,072	0,055	0,13	0,13
4 АС 180	21,0	0,86	0,92	2,2	5,7	4,2	0,044	0,086	0,059	0,11	0,19
4 АС 180	26,5	0,885	0,91	2,2	4,4	3,3	0,033	0,068	0,047	0,092	0,23
4АС200	31,5	0,875	0,92	2,2	5,7	4,5	0,034	0,075	0,062	0,10	0,37
4АС200	40,0	0,89	0,93	2,2	5,8	4,9	0,030	0,073	0,060	0,11	0,45
4АС225	50,0	0,875	0,92	2,2	5,8	4,4	0,029	0,080	0,061	0,11	0,64
4АС250	56,0	0,875	0,92	2,2	6,3	3,6	0,020	0,072	0,068	0,068	1,00
4АС250	63,0	0,870	0,93	2,2	6,4	3,9	0,019	0,070	0,069	0,069	1,20
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 104,7$ 1/с											
4АС132	6,3	0,79	0,80	2,1	6,4	1,9	0,079	0,079	0,081	0,12	0,04
4 АС 132	8,5	0,80	0,80	2,1	5,8	2,0	0,062	0,073	0,076	0,12	0,058
4 АС 160	12,0	0,825	0,85	2,1	7,7	2,5	0,065	0,092	0,087	0,10	0,14
4 АС 160	16,0	0,84	0,85	2,1	7,8	3,1	0,060	0,098	0,093	0,13	0,18
4 АС 180	19,0	0,845	0,90	2,1	7,6	3,7	0,061	0,120	0,083	0,12	0,22
4АС200	22,0	0,835	0,92	2,1	7,3	5,0	0,053	0,110	0,076	0,12	0,40
4АС200	28,0	0,855	0,91	2,1	6,2	4,4	0,046	0,099	0,068	0,11	0,45
4АС225	33,5	0,81	0,91	2,1	6,9	4,0	0,042	0,099	0,079	0,11	0,74
4АС250	40,0	0,89	0,90	2,1	5,4	3,8	0,033	0,079	0,058	0,10	1,16
4АС250	45,0	0,865	0,88	2,1	3,8	2,7	0,026	0,061	0,045	0,079	1,26
Синхронная частота вращения $\omega_0 = 78,5$ 1/с											
4АС132	6,0	0,77	0,70	2,0	8,1	1,6	0,069	0,11	0,110	0,19	0,042
4 АС 160	9,0	0,815	0,80	2,0	7,4	2,4	0,079	0,14	0,110	0,15	0,058
4 АС 160	12,5	0,825	0,79	2,0	9,3	2,4	0,065	0,14	0,110	0,15	0,14
4АС180	15,0	0,835	0,83	2,0	9,0	2,7	0,061	0,12	0,086	0,13	0,18
4АС200	20,0	0,835	0,85	2,0	8,4	3,4	0,065	0,14	0,090	0,15	0,40
4АС225	26,5	0,830	0,85	2,0	7,2	2,5	0,042	0,10	0,084	0,12	0,74
4АС250	36,0	0,850	0,85	2,0	6,7	3,2	0,046	0,11	0,077	0,14	1,20

Примечание.

$$x_\mu = \frac{X_\mu}{Z_i}; \quad r_1 = \frac{R_1}{Z_i}; \quad x_1 = \frac{X_1}{Z_i}; \quad r'_2 = \frac{R'_2}{Z_i}; \quad x'_2 = \frac{X'_2}{Z_i}; \quad z_i = \frac{U_{\delta,i}}{I_{1,i}};$$

Таблица ПЗ Технические данные металлургических асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором,
 $U_H = 380/220$ В, $PВ\%_H = 40$ %, закрытое обдуваемое исполнение

Серия МТКН													
Параметр	111-6	112-6	211-6	311-6	311-8	312-6	312-8	411-6	411-8	412-6	412-8	511-8	512-8
P_H , кВт	3	4,5	7	11	7,5	15	11	2	15	30	22	28	37
ω_H , 1/с	95,3	94,2	93,7	95,3	72,3	97,4	73,3	97,9	72,8	97,9	73,3	72,8	72,8
$\cos\varphi_H$ %	70	75	70	76	71	78	74	79	71	78	69	77	78
η_H , %	68	72	73	78	74	81	78	83	80	84	81	83	83
λ_M	2,8	3	2,7	2,9	3	3,2	3	2,6	2,4	3,3	2,8	2,3	2,5
Статор													
I_{1H} , А	9,6	12,8	20,8	28,4	21,9	36,1	29	51	40	70	60	67	87
I_{xH} , А	8	9,6	14,4	20	16	30	28	31	26	42	43	39	45
R_1 , Ом	2,62	1,61	0,84	0,51	0,98	0,34	0,54	0,22	0,35	0,13	0,2	0,16	0,1
X_1 , Ом	1,7	1,14	0,88	0,64	0,84	0,43	0,53	0,27	0,51	0,2	0,31	0,23	0,17
Ротор													
I'_{2H} , А	6,2	9,1	14,9	28,8	15	31	21,4	45,4	32,3	46	43	56	69
R'_2 , Ом	2,8	2,2	1,4	0,8	1,01	0,48	0,64	0,33	0,51	0,24	0,33	0,31	0,24
X'_2 , Ом	1,43	1,12	0,88	0,56	0,65	0,36	0,42	0,35	0,41	0,25	0,27	0,46	0,37
$K_r \cdot 10^4$	3,03	1,8	1,25	0,74	1,34	0,36	0,62	0,32	0,6	0,17	0,3	0,39	0,23
J_d , кг·м ²	0,045	0,065	0,11	0,213	0,275	0,3	0,388	0,475	0,538	0,638	0,75	1,1	1,425

Серия МТКФ													
Параметр	011-6	012-6	111-6	112-6	211-6	311-6	312-6	311-6	312-8	411-6	412-6	411-8	412-8
P_H , кВт	1,4	2,2	3,5	5	7,5	11	15	7,5	11	22	30	15	22
ω_H , 1/с	91,6	92,1	92,6	93,7	92,1	95,3	97,4	72,3	73,3	97,9	97,9	72,8	73,3
$\cos\varphi_H$	0,66	0,69	0,79	0,74	0,77	0,76	0,78	0,71	0,74	0,79	0,78	0,71	0,69
η_H , %	62	67	72	74	76	78	81	74	78	83	74	80	81
λ_M	2,3	2,2	2,3	2,3	2,2	2,9	3,2	3	3	2,6	3,3	2,4	2,8
Статор													
I_{1H} , А	5,3	7,2	9,4	14	20	28	36	22	29	51	80	40	60
I_{xH} , А	4,2	5,3	6,2	9,6	12	20	30	16	28	31	42	25	43
R_1 , Ом	5,8	3,6	2,1	1,3	0,76	0,48	0,23	0,84	0,37	0,2	0,12	0,33	0,18

$X_1, \text{Ом}$	3,6	2,5	1,9	1,3	105	0,65	0,33	0,84	0,53	0,29	0,20	0,53	0,32
Ротор													
$I_{2н}, \text{А}$	327	487	7,5	11,3	16,1	23	31	15	214	454	535	326	432
$R_2, \text{Ом}$	7,45	5,4	3,26	2,2	1,6	0,8	0,48	1,01	0,64	0,33	0,24	0,5	0,33
$X'_2, \text{Ом}$	3,17	2,32	1,5	1,12	1,02	0,56	0,36	0,65	0,42	0,35	0,25	0,41	0,28
$K_r (\cdot 10^4)$	8,7	4,6	3,5	1,8	1,4	0,74	0,36	134	0,62	0,32	0,17	0,6	0,29
$J_d, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,02	0,028	0,045	0,065	0,11	0,213	0,3	0,275	0,388	0,475	0,638	0,538	0,75

Примечание: сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии, $\omega_{\text{макс}} = 2,5 \cdot \omega_0$.

Таблица П4 Технические данные асинхронных короткозамкнутых двигателей серии 4МТ, при $U_n = 380 \text{ В}$, $\text{ПВ}\%_n = 40 \%$

Тип	$P_n, \text{кВт}$	$n_n, \text{об/мин}$	$I_{1н}, \text{А}$	$\cos\varphi_n$	$M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	$2 \cdot p_n$	$R_1, \text{Ом}$	$I_{x.x}, \text{А}$	$R_k, \text{Ом}$	$X_k, \text{Ом}$	$J_d, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
4МТКН-6	5,5	900	13,6	0,75	155	6	1,07	8,0	3,36	2,87	0,09
4МТКН-6	7,5	900	18,3	0,70	225	6	0,68	10,1	2,37	1,91	0,11
4МТКН-6	11,0	910	29,0	0,76	395	6	0,35	20,4	1,15	1,18	0,23
4МТКН-6	15,0	930	36,5	0,78	560	6	0,23	22,7	0,81	0,86	0,28
4МТКН-6	22,0	935	51,0	0,79	760	6	0,23	31,3	0,50	0,63	0,57
4МТКН-6	30,0	935	70,0	0,78	980	6	0,13	42,1	0,36	0,46	0,68
4МТКН-8	7,5	690	24,0	0,71	310	8	0,48	16,4	1,81	2,24	0,23
4МТКН-8	11,0	700	33,5	0,74	500	8	0,26	25,2	1,10	1,43	0,29
4МТКН-8	15,0	695	40,0	0,71	657	8	0,24	25,4	0,77	0,90	0,62
4МТКН-8	22,0	700	60,0	0,69	981	8	0,14	43,3	0,47	0,58	0,74
4МТКН-8	30,0	700	68,0	0,77	1128	8	0,14	38,8	0,45	0,57	1,07

Примечание: $R_k = R_1 + R'_2$, $X_k = X_1 + X'_2$.

Таблица П5 Основные технические данные генератора постоянного тока серии П с независимым возбуждением

Наименование параметров	$U_{\text{н}}$, В	П-81	П-82	П-91	П-92	П-101	П-102	П-111	П-112
$n_{\text{н}}$, об/мин	230	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	1450	1450
$P_{\text{н}}$, кВт		19 / 27	25 / 35	32 / 50	42 / 70	55 / 90	65 / 110	150	190
$W_{\text{я}}$		290 / 210	210 / 145	210 / 145	165 / 105	141 / 93	141 / 138	126	100
$2a$		2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	4	4
$R_{\text{я}}$, Ом		0,243	0,144	0,102	0,0741	0,049	0,031	0,0096	0,00624
		0,128	0,0687	0,0504	0,0278	0,0187	0,0128		
$W_{\text{в}}$		936	735	870	830	850	850	750	558
		1032	890	870	830	950	950		
$R_{\text{в}}$, Ом		34,6	23,4	35,8	31,8	37,8	32,9	21,4	13,2
		51,5	36	35,8	31,8	44,6	24,5		
$\eta_{\text{н}}$	0,83 / 0,86	0,84 / 0,88	0,85 / 0,87	0,86 / 0,89	0,87 / 0,89	0,87 / 0,9	0,9	0,91	
$n_{\text{н}}$, об/мин	460	1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	980 / 1450	1450	1450
$P_{\text{н}}$, кВт		27	25 / 35	32 / 50	42 / 65	55 / 90	65 / 110	145	170
$W_{\text{я}}$		435	435 / 290	435 / 290	330 / 210	282 / 175	222 / 141	123	200
$2a$		2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2	4
$R_{\text{я}}$, Ом		1	0,689	0,483	0,312	0,197	0,135	0,0362	0,0298
		0,167	0,275	0,198	0,111	0,0738	0,0522		
$W_{\text{в}}$		-	890	870	830	950	850	780	670
		1032	890	870	830	850	850		
$R_{\text{в}}$, Ом		-	36	35,8	31,8	37,8	32,9	21,5	12,9
		51,5	36	25,8	31,8	29,3	32,9		
$\eta_{\text{н}}$	-	0,825	0,825	0,845	0,85	0,855	0,855	0,895	
	0,825	0,85	0,855	0,875	0,88	0,885			

Примечание. Число пар полюсов $p_{\text{н}} = 2$: номинальное напряжение возбуждения $U_{\text{вн}} = 230$ В, сопротивления обмоток указаны при $t_{\text{oc}} = 20$ °С. Рабочая температура $t_{\text{нар}} = 75$ °С, число активных проводников якоря $N = 2W_{\text{я}}$.

Таблица П6 Основные технические данные асинхронных короткозамкнутых двигателей серии 4А (U_н= 380/220 В)

Типоразмер двигателя	P _н , кВт	S _н , %	cosφ _н	η _н	Параметры схемы замещения, о.е.			
					r ₁	x ₁	r' ₂	x' ₂
Синхронная скорость вращения ω ₀ =314 с ⁻¹								
4А71	1,5	5,9	0,85	0,81	0,084	0,051	0,089	0,081
4А80	2,2	4,3	0,87	0,83	0,076	0,05	0,049	0,087
4А90	3,0	4,3	0,88	0,845	0,072	0,057	0,097	0,1
4А100	4,0	3,3	0,89	0,865	0,054	0,055	0,036	0,099
4А112	7,5	2,5	0,88	0,875	0,046	0,058	0,028	0,14
4А132	11,0	2,3	0,9	0,88	0,04	0,061	0,025	0,12
4А160	15,0	2,1	0,91	0,88	0,052	0,092	0,022	0,12
4А160	18,5	2,1	0,92	0,885	0,049	0,092	0,022	0,12
4А180	29,0	1,9	0,91	0,885	0,039	0,091	0,02	0,11
4А180	30,0	1,8	0,9	0,905	0,03	0,073	0,018	0,11
Синхронная скорость вращения ω ₀ =157 с ⁻¹								
4А80	1,1	5,4	0,81	0,75	0,012	0,078	0,068	0,12
4А80	1,5	5,8	0,83	0,77	0,012	0,078	0,069	0,12
4А100	3,0	4,4	0,83	0,82	0,078	0,079	0,053	0,13
4А100	4,0	4,6	0,84	0,84	0,067	0,079	0,053	0,14
4А112	5,5	3,6	0,85	0,855	0,064	0,073	0,0141	0,13
4А132	7,5	2,9	0,86	0,875	0,048	0,085	0,033	0,13
4А132	11,0	2,8	0,87	0,875	0,043	0,085	0,032	0,13
4А160	15,0	2,3	0,88	0,885	0,047	0,086	0,025	0,13
4А160	18,5	2,2	0,88	0,895	0,042	0,085	0,024	0,13
4А180	22,0	2,0	0,9	0,9	0,041	0,08	0,021	0,12
4А180	30,0	1,9	0,89	0,91	0,034	0,068	0,018	0,12
4А200	37,0	1,7	0,9	0,91	0,039	0,086	0,018	0,14
4А225	55,0	1,4	0,9	0,925	0,027	0,086	0,015	0,14
4А250	75,0	1,2	0,9	0,93	0,025	0,089	0,014	0,11
4А250	90,0	1,3	0,91	0,93	0,024	0,093	0,014	0,12
4А280	110	2,3	0,9	0,925	0,023	0,122	0,019	0,16
4А280	132	2,3	0,9	0,93	0,021	0,115	0,018	0,15
4А315	160	1,4	0,91	0,935	0,018	0,107	0,017	0,15
4А315	200	1,3	0,92	0,94	0,014	0,086	0,014	0,12
Синхронная скорость вращения ω ₀ =104,7 с ⁻¹								
4А200	22,0	2,3	0,9	0,9	0,05	0,11	0,024	0,14
4А200	30,0	2,1	0,9	0,905	0,046	0,12	0,022	0,13
4А225	37,0	1,8	0,89	0,91	0,042	0,1	0,019	0,13
4А250	45,0	1,4	0,89	0,915	0,037	0,09	0,015	0,14
4А250	55,0	1,3	0,89	0,92	0,034	0,083	0,014	0,14
4А280	75,0	2,0	0,89	0,92	0,032	0,12	0,021	0,13

Примечание:

Таблица П7 Основные технические данные тиристорных агрегатов серии ТЕ, ТЕР с естественным охлаждением

Тип агрегата	Параметры сети	Выходные параметры			
		Номин. выпрямл. ток, А	Максим. выпрямл. ток, А	Номин. выпрямл. напряжение, В	Номин. мощность, кВт
Нереверсивные					
ТЕ4-63/230	190-220	63	141,75	230	14,5
ТЕ4-63/460	380	63		460	29
ТЕ4-100/230	190-220	100	225	230	23
ТЕ4-100/460	380	100		460	46
ТЕ4-160/230	190-220	160	360	230	36,8
ТЕ4-160/460	380	160		460	73,6
ТЕ4-200/230	190-220	200	450	230	46
ТЕ4-200/460	380	200		460	92
Реверсивные					
ТЕР4-63/230	190-220	63	141,75	230	14,5
ТЕР4-63/460	380	63		460	29
ТЕР4-100/230	190-220	100	225	230	23
ТЕР4-100/460	380	100		460	46
ТЕР4-160/230	190-220	160	360	230	36,8
ТЕР4-160/460	380	160		460	73,6
ТЕР4-200/230	190-220	200	450	230	46
ТЕР4-200/460	380	200		460	92

Таблица П8 Технические данные трансформаторов серии ТСП, номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1нл} = 380$ В

Тип трансформатора	S_n кВА	Параметры вторичной обмотки		Параметры тиристорного преобразователя		Потери мощности, Вт		$U_{к.з.}$ %	$I_{х.х.}$ %
		$U_{2нф}, В$	$I_{2нф}, А$	$U_{дн}, В$	$I_{дн}, А$	$\Delta P_{х.х.}$	$\Delta P_{к.з.}$		
ТСП-10/0,7	7,5	118	20,5	230	25	130	320	4,7	16
ТСП-16/0,7	14,6	118	41	230	50	140	550	5,2	10
ТСП-16/0,7	14,6	236	20,5	460	25	140	550	5,2	10
ТСП-25/0,7	29,1	118	82	230	100	210	1100	5,5	8
ТСП-25/0,7	29,1	236	41	460	50	210	1100	5,5	8
ТСП-63/0,7	58	118	164	230	200	330	1900	5,5	8
ТСП-63/0,7	58	236	82	460	100	330	1900	5,5	8
ТСП-100/0,7	93	118	262	230	320	440	2300	5,8	5
ТСП-125/0,7	117	236	164	460	200	520	2700	5,8	4

Таблица П9 Технические данные токоограничивающих реакторов серии РТСТ (реактор трехфазный сухой токоограничивающий), $U_H = 410$ В

Тип реактора	$I_{нф}, A$	$L_H, мГн$	$R_p, мОм$
РТСТ-20,5-2,02	20,5	2,02	265
РТСТ-41-1,01	41	1,01	102
РТСТ-82-0,505	82	0,505	37
РТСТ-165-0,25	165	0,25	13
РТСТ-265-0,156	265	0,156	7,2
РТСТ-410-0,101	410	0,101	3,8
РТСТ-660-0,06	660	0,064	2,1
РТСТ-820-0,05	820	0,05	1,4

Таблица П10 Технические данные сглаживающих и уравнивающих дросселей серии СРОСЗ

Тип реактора	Параллельное соединение ветвей обмотки реактора		Последовательное соединение ветвей обмотки реактора		ΔP_{MH} Вт
	I_H, A	$L_H, мГн$	I_H, A	$L_H, мГн$	
СРОЗ-800	1600	0,5	800	2	2100
	2500	0,2	1250	0,8	2100
СРОЗ-1250	4000	0,12	2000	0,48	2800
	2500	0,32	1250	1,28	2800
СРОЗ-2000	4000	0,20	2000	0,8	4000
СРОЗ-3200	6300	0,08	3200	0,32	4000
СРОЗ-3200	6300	0,125	3200	0,5	4800
СРОЗ-4000	8000	0,10	4000	0,4	5700
СРОЗ-5000	10000	0,08	5000	0,32	7500
СРОЗ-6300	12500	0,06	6300	0,24	8500

Примечание: СРОСЗ – сглаживающий реактор однофазный сухой в защищенном исполнении.

Таблица П11 Технические данные сглаживающих и уравнивающих дросселей серии ФРОС

Типоисполнение	I_H, A	$L_H, мГн$
ФРОС-125/0,5Т	500	0,75
ФРОС-250/0,5Т	250	6,50
ФРОС-250/0,5Т	320	4,20
ФРОС-250/0,5Т	800	0,60
ФРОС-250/0,5Т	1000	0,35
ФРОС-500/0,5Т	500	3,25
ФРОС-65/0,5Т	250	1,50
ФРОС-65/0,5Т	320	1,00
ФРОС-1000/0,5Т	800	2,30
ФРОС-100/0,5Т	1000	1,60

Пример расшифровки обозначений (ФРОС-125/0,5Т): ФРОС – фильтровый (сглаживающий) реактор однофазный сухой; 125 – типовая мощность (125 кВА); 0,5 – класс напряжения (0,5кВ); Т – для тиристорных агрегатов.

Таблица П12 Универсальная кривая намагничивания двигателей серии Д и генераторов серии П

ДПТ серии Д		ГПТ серии П	
$i_B = \frac{I_B}{I_{BH}}$	$\varphi = \frac{\Phi_B}{\Phi_{BH}}$	$i = \frac{I_B}{I_{BH}}$	$\varphi = \frac{\Phi_B}{\Phi_{BH}}$
0	0,02	0	0,02
0,1	0,2	0,1	0,18
0,2	0,38	0,2	0,35
0,3	0,53	0,3	0,5
0,4	0,63	0,4	0,62
0,5	0,75	0,5	0,73
0,6	0,82	0,6	0,82
0,7	0,88	0,7	0,88
0,8	0,92	0,8	0,93
0,9	0,96	0,9	0,97
1,0	1,0	1,0	1,0
1,1	1,03	1,1	1,03
1,2	1,05	1,2	1,05
1,3	1,06	1,3	1,07

Таблица П13 Преобразователи частоты серии Триол АТ02 (асинхронный транзисторный общепромышленный модернизированный электропривод)

Напряжение питающей сети	3 × 380 В	Частота 50 Гц
Выходное напряжение	3 × (0-380) В	КПД _н = 0,95
Выходная частота	0,5-1 00 Гц	cosφ _н = 0,95

Мощность ПЧ, кВт	7	10	15	20	30	50	72	100	120	150	170
Мощность двигателя, кВт	4,5 5,5	7,5	11	15	17 22	30 37	45 55	75	90	110	90 110 132
Выходной ток, А	10	15	22	30	45	75	110	150	180	20	260

Таблица П14 Преобразователи частоты серии Триол АТ04 и Триол АТ05 (асинхронный транзисторный интеллектуальный электропривод)

Напряжение питающей сети	3 × 380 В		Частота 50 Гц	
Выходное напряжение	3 × (0-380) В		КПД _н = 0,95	
Выходная частота	0,5-400 Гц		cosφ _н = 0,95	

Мощность ПЧ, кВт	7	10	15	20	30	50	72	100	120	140	170	210	264
Мощность двигателя, кВт	5,5	7,5	7,5 11	15	17 18 22	30 37	45 55	75	90	90 110	110 132	160	180 200
Выходной ток, А	10	16	22	30	45	75	110	150	180	220	260	320	400

Таблица П15 Основные технические данные преобразователей частоты серии ЭКТ (электропривод комплектный тиристорный)

Тип преобразователя	I_n А	U_n В	f_n Гц	S_n кВА	Диапазон регулирования частоты	Диапазон регулирования напряжения	Рабочий диапазон регулирования частоты	Рабочий диапазон регулирования напряжения
ЭКТ-32/220	32	220	200	12	5-250	0-220	15-250	20-200
ЭКТР-32/220								
ЭКТ-50/220	50	220	200	19	5-250	0-220	15-250	20-200
ЭКТР-50/220								
ЭКТ-100/220	100	220	200		5-250	0-220	15-250	20-200
ЭКТР-100/220								
ЭКТ-160/220	160	220	200	61	5-250	0-220	15-250	20-200
ЭКТР-160/220								
ЭКТ-250/220	250	220	200	95	5-250	0-220	15-250	20-200
ЭКТР-250/220								
ЭКТ-20/380	20	380	50	13	1-90	0-380	5-80	38-340
ЭКТР-20/380								
ЭКТ-40/380	40	380	50	26	1-90	0-380	5-80	38-340
ЭКТР-40/380								
ЭКТ-63/380	63	380	50	41	1-90	0-380	5-80	38-340
ЭКТР-63/380								
ЭКТ-100/380	100	380	50	66	1-90	0-380	5-80	38-340
ЭКТР-100/380								
ЭКТ-160/380	160	380	50	105	1-90	0-380	5-80	38-340
ЭКТР-160/380								
ЭКТ-25/380	25	380	50	165	1-60	0-380	5-60	38-340
ЭКТР-25/380	25	380	200	165	5-240	0-380	15-240	38-340
ЭКТ-160/380	160	380	50	105	5-60	0-380	5-60	38-340
ЭКТР-160/380	160	380	200	105	5-240	0-380	15-200	38-340
ЭКТР-63/380	63	380	200	415	5-200	0-380	15-200	38-340
ЭКТР-63/380	63	380	50	415	1-60	0-380	5-60	38-340
ЭКТР-250/380	250	380	200	165	5-200	0-380	15-200	38-340
ЭКТР-400/380	400	380	50	264	1-60	0-380	5-60	38-340

Примечание. Параметры питающей сети: номинальное напряжение 380 В; номинальная частота 50,60 Гц, число фаз – 3. Кратность перегрузки по току 1,5–2,0. Номинальный КПД $\eta_n = 0,88$; $\cos\varphi_n = 0,88$. Д - динамическое торможение. Р - рекуперативное торможение.

Таблица П16 Технические данные редукторов типа ЦОН

Типоразмер редуктора	Скорость вращения б/х вала n_n , об/мин	Номинальное передаточное число, i												
		2,0	2,24	2,5	2,8	3,15	3,65	4,0	4,5	5,0	5,5	6,3	7,0	8,0
		Номинальные мощности, $P_{нр}$, кВт												
ЦОН-15	500	22,3	19,6	17,9	16,5	15,1	13	11,9	10,3	8,72	7,9	6,35	5,44	4,8
	750	33,6	29,5	26,8	24,7	22,7	19,4	17,8	15,4	13,1	11,8	9,55	8,15	7,1
	1000	44,4	30,2	35,8	33,7	30,3	25,9	23,7	20,6	17,5	15,8	12,7	10,8	9,6
	1500	67	59,1	53,6	4,95	45,4	38,9	35,5	30,8	26,5	23,7	19,1	16,3	14,2
ЦОН-20	500	49,8	43,5	39,8	36,3	32,8	28	25,8	22,2	18,8	17,3	18,5	11,9	10,7
	750	74,8	65,2	59,8	54,4	49,2	42,8	38,4	33,2	28,3	26	20,3	17,9	16,1
	1000	97,9	86,1	78,8	72,6	65,2	57,2	50,1	44,4	37,7	34,7	27,1	24,9	21,5
	1500	139	121	112	103	94,4	81,4	76,2	66,4	56,7	52	40,6	36,8	32,2
ЦОН-25	500	85,7	78,8	70,8	65	59,5	54,2	46,8	41,6	35,4	30,7	25,6	22	17,5
	750	125	112	103	92,2	82	75	64,5	87,5	50,2	42	36,2	30	24,7
	1000	158	141	128	120	107	98	87	77	67,2	56,5	48,5	41,6	33,2
	1500	-	-	172	160	142	130	115	102	89	77	66	56,4	48
ЦОН-30	500	92,3	92,1	88,6	80,6	77,3	68,8	60,3	52,1	42,3	38,4	29,8	26,2	21,7
	750	140,3	128,3	125	112	108,5	97,5	85,2	75,5	60,8	56,5	43,4	37,3	32,6
	1000	173,5	150,7	157	138,8	135,5	126,1	109	93,0	87,2	68,8	54,4	49,2	41,2
	1500	-	-	202	197,5	188,5	176,2	141,2	132,5	99,1	97,1	78,7	70,9	59,4

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Чайковский филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Направление: 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
Направленность: Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении
и энергетике

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему «_____»

по дисциплине «Электрический привод»

Выполнил:

студент группы _____

(Фамилия Имя Отчество)

Руководитель:

(должность, ученая степень, ученое звание)

(Фамилия Имя Отчество)

Оценка

«_____» _____ 20__г

(подпись)

Чайковский 20_____