



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Лысьвенский филиал федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования

**Пермский национальный исследовательский
политехнический
университет**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»

основной профессиональной образовательной программы
подготовки бакалавров

по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсового проекта

Разработчик-составитель Лопатин В.Г.

Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Данные методические указания составлены применительно к рабочей программе дисциплины «Электрический привод». В них приведены задания для студентов на выполнение курсового проекта по дисциплине «Электрический привод», изложена методика проведения расчёта, рассмотрены различные ситуации, встречающиеся в расчётах электропривода.

Курсовой проект охватывает все разделы, изучаемые в теоретическом курсе, и способствует закреплению знаний, приобретению умений и навыков при расчёте электроприводов будущими выпускниками.

Предназначено для студентов, направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

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

За основу взяты методические указания, разработанные к.т.н., доцентом Столбовым Б.М. и доцентом Мазуниным Н.Т.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.	4
1. Задания на курсовой проект	5
2. Методические рекомендации по выполнению проекта	7
3. Состав курсового проекта	8
4. Оформление пояснительной записки и графического материала.	10
5. Рекомендуемая литература.	13
6. Методические указания по выполнению курсового проекта	14
6.1. Пояснения к п.п. 1 – 9	14
6.2. Пояснения к п. 10 «Статические механические характеристики $\omega = f(M)$ проектируемого регулируемого ЭП».	21
6.2.1 Система ТП–Д.	21
6.2.2 Система ПЧ–АД.	25
6.3. Пояснения к п. 11 «Расчёт переходных процессов (зависимости $\omega(t)$, $M(t)$, $\omega_0(t)$)»	27
6.3.1 Расчёт переходных процессов в системах ТП–Д и ПЧ–АД.	30
А) <u>Разгон системы из неподвижного состояния</u>	32
Б) <u>Увеличение скорости системы</u>	34
В) <u>Торможение системы</u>	35
Г) <u>Снижение скорости</u>	37
Д) <u>Реверс системы</u>	37
6.4. Пояснения к п.п. 12 – 24	40
Приложение А.	52
Приложение Б.	53
Приложение В.	54
Приложение Г	55
Приложение Д.	56
Приложение Е.	57
Приложение Ж.	58
Приложение К	59
Приложение Л.	60
Приложение М.	62
Приложение Н.	63
Приложение П	64
Приложение Р	65
Приложение С.	66

ВВЕДЕНИЕ

Правильный выбор элементов электромеханических систем и получение нужных статических и динамических характеристик определяют не только производительность рабочей машины (далее РМ), но и качество выпускаемой продукции. Для решения этих задач необходимы всесторонние знания теории и практики, которые приобретаются при изучении дисциплины “Теория электропривода”, при проектировании этих систем, а также при эксплуатации электроприводов различных механизмов на промышленных предприятиях.

Целью курсового проекта является детальный расчёт регулируемого электропривода производственной установки с двигателем постоянного или переменного тока соответственно в системах ТП–Д или ПЧ–АД. Предполагается, что при её выполнении студент овладеет определенными навыками анализа данных о режимах нагрузки, построения нагрузочных диаграмм РМ и электропривода. Также научиться выбирать электрические машины и преобразовательные устройства с учетом требований технологического процесса, современных тенденций развития автоматизированного электропривода, сможет обосновывать целесообразность применения разомкнутой или замкнутой системы, рассчитывать параметры элементов принятой системы, оценивать энергетические показатели электропривода.

Предполагается также, что выполнение курсового проекта будет способствовать закреплению и углублению знаний по теории электропривода, формированию грамотного специалиста, развитию творческой инженерной инициативы, приобретению или закреплению навыков использования средств вычислительной техники, справочной, учебной и специальной литературы, навыков выполнения графической работы и оформления технической документации.

Выполненный проект (пояснительная записка и графическая часть) передается преподавателю для проверки. Студенты-заочники представляют курсовой проект для проверки непосредственно в деканат **в срок не позднее 15 мая**. После проверки преподавателем проект возвращается на доработку или допускается к защите. К защите допускаются проекты, с правильно выполненными расчётами и оформленные в соответствии с изложенными требованиями и требованиями ГОСТ.

1. ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Исходные данные для проектирования представлены в таблицах 1 и 2.

В табл.1 приведены варианты тахограммы, по которой работает рабочая машина (РМ) и которая составляет повторяющийся цикл работы. Здесь $\omega_{1м}$, $\omega_{2м}$ и $\omega_{3м}$ – скорости работы РМ в установившихся режимах; t_1 , t_2 и t_3 – время работы РМ с установившейся скоростью (сюда не входит время переходных процессов пуска, торможения, изменения скорости); t_0 – время паузы. Точность поддержания установившейся скорости δ_3 задана в процентах от скорости идеального холостого хода двигателя на регулировочной характеристике.

Таблица 1. Варианты тахограмм механизмов

Номер варианта	$\omega_{1м}$	$\omega_{2м}$	$\omega_{3м}$	t_1	t_2	t_3	t_0	δ_3	$\omega_{оз.макс В}$ % от $\omega_{ор}$
	1/с			с					
0	12	15	5	30	10	25	65	5	95%
1	16	-12	5	40	15	15	65	5	96%
2	22	-10	-2	15	30	20	40	4	95%
3	20	-12	-5	10	20	45	70	4	93%
4	25	15	4	25	20	50	110	3	96%
5	17	-10	2	50	30	30	70	3	95%
6	12	-20	-3	70	50	25	95	2	94%
7	22	30	-5	15	35	30	65	3	95%
8	12	18	-3	10	10	5	30	3	96%
9	15	-10	2	100	20	20	140	5	95%

В таблице 2 приведены варианты механических характеристик рабочих машин, причем закон изменения момента сопротивления (нагрузки) РМ задан в виде уравнения. Здесь же указаны значения момента инерции РМ в долях от момента инерции двигателя, тип двигателя и способ его питания, характер момента сопротивления РМ.

Таблица 2. Варианты механических характеристик механизма

Номер варианта	Закон изменения момента сопротивления механизма $M_{см}, Н \cdot м$	Момент инерции механизма J_m в долях от момента инерции двигателя, кг·м ²	Тип двигателя и способ его питания
0	800	4,5	Асинхронный, питание от частотного тиристорного преобразователя (ПЧ)
1	1300-40· ω	3,5	Постоянного тока, питание от тиристорного преобразователя (ТП)
2	1250	7,0	Асинхронный, питание от ПЧ
3	400+40· ω	6,0	Асинхронный, питание от ПЧ
4	1100	4,5	Постоянного тока, питание от ТП
5	1600-60· ω	5,0	Постоянного тока, питание от ТП
6	330 +10· ω	3,0	Асинхронный, питание от ПЧ
7	400 +25· ω	4,5	Постоянного тока, питание от ТП
8	40· ω	5,0	Постоянного тока, питание от ТП
9	600	6,0	Асинхронный, питание от ПЧ

Примечание. Характер момента сопротивления – реактивный.

Варианты тахограммы и механической характеристики механизма студентам указывает руководитель.

Требования к электроприводу

Спроектированная система электропривода должна обеспечить выполнение следующих требований:

1. Необходимый диапазон регулирования скорости вращения РМ (см. заданную тахограмму).
2. Плавный пуск, торможение и реверс РМ.
3. Заданное быстродействие (см. далее заданное суммарное время переходных процессов за цикл работы).
4. Минимум потерь энергии в переходных процессах.
5. Возможность изменения направления вращения РМ.
6. Режим рекуперативного торможения.
7. Требуемую перегрузочную способность двигателя.
8. Средняя температура нагрева изоляции двигателя не должна превышать допустимую.
9. Статическая ошибка по скорости не должна превышать заданную (см. задание на проектирование).

Пункты требований 1, 3, 7, 8, 9 представить в численном виде.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОЕКТА

Прежде чем начать выполнение курсового проекта, следует внимательно разобраться в исходной информации, требованиях к электроприводу. Все необходимые записи заносят в черновик, для которого лучше всего подходит отдельная тетрадь или блокнот.

Все величины следует представлять в системе СИ и расчёты вести только в этой системе единиц. Не забудьте фиксировать источники, из которых взяты те или иные сведения, к ним придется, возможно, обратиться вновь. Принимаемые решения по ходу анализа и расчётов сопровождайте краткими обоснованиями.

При выполнении расчётов сначала запишите формулу, убедитесь, что при подстановке в неё соответствующих величин, размерность результата соответствует размерности рассчитываемой физической величины в системе СИ. Промежуточные расчёты могут пригодиться при проверке результатов.

В черновике должны четко выделяться полученные результаты и выводы. Для этого полезно использовать цветные карандаши или шариковые ручки. Запись ведите на одной стороне черновой тетради, вторая пригодится для дополнительных расчётов, оценок, замечаний, пересчетов.

При выполнении расчётов, полученные результаты, оценивайте дополнительно «на глаз» для исключения грубых ошибок.

При расчёте каких-либо зависимостей без компьютера составьте таблицу, включив в неё и промежуточные величины. Например, при расчётах механических характеристик подробный расчёт делается только для характерных точек каждой из них. Результаты остальных расчётов сводятся в таблицу. Она может быть также получена и при расчёте на компьютере. Сразу же строится график искомой зависимости. Это необходимо для анализа или проверки полученного результата. Выберите масштаб графиков, удобный для построения и считывания промежуточных значений связанных величин, - лучше всего кратный 2, 5, 10. При расчётах на компьютере программу расчёта следует составлять таким образом, чтобы выводимые на печать результаты были представлены в виде таблиц и графиков.

За технические решения, принятые при выполнении проекта, за точность и достоверность всех вычислений отвечает СТУДЕНТ.

3. СОСТАВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Для расчёта системы электропривода необходимо выполнить следующие пункты:

1. Построить тахограмму РМ $\omega_m = f(t)$ за цикл работы и найти $PВ_{расч.}\%$ – расчётную продолжительность включения.
2. Построить механическую характеристику $M_{сМи} = f(\omega_{Ми})$ РМ.
3. Построить нагрузочную диаграмму $M_{сМи} = f(t)$ РМ.
4. Определить предварительно мощность двигателя.
5. Выбрать из двух и более вариантов электродвигатель и редуктор, обеспечивающие максимальное быстродействие и минимум потерь энергии в переходных режимах электропривода.
6. Выбрать управляемый преобразователь (частотный тиристорный преобразователь, тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный) в зависимости от условий задания.
7. Построить тахограмму работы двигателя $\omega_i = f(t)$.
8. Рассчитать приведенные к валу двигателя статические моменты сопротивления $M_{сi}$ РМ и построить зависимость скорости двигателя от $M_{сi}$, т.е. $\omega_i = f(M_{сi})$.
9. Обосновать способы пуска, регулирование скорости и торможения (останова) электродвигателя.
10. Рассчитать и построить статические механические характеристики, на которых двигатель будет работать в течение цикла.
11. Рассчитать переходные процессы $\omega(t)$, $M(t)$, $I(t)$, $\omega_0(t)$, построить нагрузочную диаграмму электропривода за цикл работы и действительную тахограмму работы РМ $\omega_m(t)$ с учетом времени переходных процессов.
12. Проверить предварительно выбранный двигатель на нагрев и перегрузочную способность.
13. Записать уравнения в дифференциальной и операторной формах и изобразить структурную схему разомкнутой системы электропривода, показав на ней численные значения параметров.
14. Сделать вывод – удовлетворяет ли разомкнутая система указанным в задании требованиям в отношении точности поддержания установившейся скорости на различных участках цикла.
15. Сделать синтез замкнутой системы электропривода и изобразить её структурную схему.
16. Определить передаточные функции регуляторов тока (момента) и скорости и установить, какими должны быть эти регуляторы.
17. Рассчитать параметры регуляторов.

18. Рассчитать механические (электромеханические) характеристики замкнутой системы и построить их для трех напряжений задания скорости, величины которых определяются при расчёте параметров регуляторов.

19. Проанализировать динамические качества замкнутой системы: определить точность поддержания скорости; динамическую ошибку; время 1-го согласования при переходном процессе и его длительность, например, при пуске, построив предварительно кривые $M(t)$, $I(t)$, $\omega_0(t)$.

20. Составить принципиальные схемы разомкнутой и замкнутой систем в соответствии с заданной системой управления.

21. Рассчитать энергетику спроектированной разомкнутой системы электропривода в установившихся режимах работы за цикл.

22. Рассчитать стоимость электроэнергии, потребляемой системой электропривода в течение года.

23. Сделать заключение о рациональности спроектированной системы электропривода для заданной РМ и заданных условий её работы.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Курсовой проект представляется в виде пояснительной записки, а также графической части на листе формата А-1 или на миллиметровой бумаге, или в печатном виде из электронной таблицы Excel.

Пояснительная записка должна быть выполнена любым печатным способом на пишущей машинке или с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А-4. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков – не менее 1,8 мм (кегель - 14, шрифт - Times New Roman через 1,5 интервала, начертание прямое обычное). Выравнивание текста производить по ширине страницы, установив автоматическую расстановку переносов. Абзацный отступ равен 5 знакам.

Все латинские буквы в тексте пояснительной записке выделяются курсивом: *sin, cos, tg, ctg, ln, exp, const, min, max, S, U, I* и т.д. Шрифт: **Times New Roman**. Начертание: курсив. Размер: 14.

Все греческие буквы и специальные символы печатаются прямым шрифтом через опции «Вставка» и «Символ»: $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu, \Delta, \sigma, \omega, \partial, \Delta, \infty, \approx, \neq, \geq, \div$ и т.д. Шрифт: Symbol. Начертание: обычное. Размер: 14.

Текст пояснительной записки следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: правое поле – 10 мм, верхнее, левое и нижнее – 20 мм.

Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных терминах, формулах, применяя шрифты разной гарнитуры.

Допускается рукописный способ выполнения текста, выполненный аккуратным почерком.

Изложение текста и оформление пояснительной записки выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32, ГОСТ 2.105 и ГОСТ 6.38.

Изложение записки ведется от 1-го лица множественного числа (**принимаем, определяем т.п.**).

Структурными элементами пояснительной записки являются:

1. Титульный лист (см. образец);
2. Задание на курсовое проектирование.
3. Исходные данные для проектирования.
4. Требования к проектируемому приводу.
5. Содержание;
6. Аннотация;
7. Введение;
8. Основная часть;

9. Заключение;
10. Список использованных источников;
11. Приложения.

Объем пояснительной записки 40-50 страниц.

В пояснительной записке должен быть приведен краткий, но исчерпывающий расчёт всех требуемых величин и зависимостей в системе СИ. При оформлении расчётов рекомендуется сначала писать расчётную формулу, затем числовые значения входящих в неё 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 расчётов сводятся в таблицы. Каждый раз, когда в расчётную формулу будут входить величины с иными индексами или знаками, она должна приводиться, в неё подставляются соответствующие цифровые значения, дается конечный результат, а результаты аналогичных расчётов сводятся в таблицы, имеющие номер и название.

Расчётные 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 со ссылками на соответствующие расчёты, 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 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 в одну тетрадь в виде файловой папки. Обложка оформляется согласно образцу (см. приложение). Нумерация страниц расчётно-пояснительной записки сквозная, включая листы с рисунками, схемами, диаграммами. На титульном листе номер не проставляется.

Графическая часть курсового проекта представляется на одном листе формата А-1 (594x841 мм). Разрешается использовать миллиметровку соответствующего формата. Чертеж выполняется карандашом. При изображении кривых следует пользоваться лекалом. Допускается использование цветных карандашей и чернил. Условные обозначения элементов схем на чертеже и рисунках пояснительной записки должны соответствовать ГОСТ 2.702-75. Приветствуется выполнение чертежа с применением компьютера на листах формата А-4.

На чертеже необходимо изобразить:

1. Заданную тахограмму за цикл $\omega_m = f(t)$ и показать начало следующего цикла.
2. Механическую характеристику РМ, с учетом приведения момента сопротивления к валу двигателя.
3. Нагрузочную диаграмму РМ $M_{ci}(t)$.
4. Тахограмму работы двигателя $\omega_i(t)$, статические и динамические характеристики, на которых он работает в течение цикла (с указанием зоны прерывистых токов в случае вентильного электропривода постоянного тока при наличии таковой). Обозначить точки статических режимов работы.
5. Нагрузочную диаграмму электропривода за цикл работы и все расчётные кривые переходных процессов $\omega(t)$, $\omega_0(t)$, $M(t)$ в замкнутой и разомкнутой системе, а также график зависимости $M_{дин}(t)$.
6. Структурные схемы разомкнутой и замкнутой систем управления электроприводом.
7. Принципиальные схемы электропривода РМ в разомкнутой и замкнутой системах.
8. Основные показатели, характеризующие работу спроектированной системы электропривода, полученные в результате принятых решений и расчётов (данные выбранного двигателя, преобразователя, питающего трансформатора, сглаживающего дросселя; время пуска, торможения, реверса двигателя, т.е. время переходных процессов; динамические показатели).

5. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Теория электропривода. Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 615 с.
3. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок. – М.: Энергия, 1973. – 727 с. Под ред. Я.М. Большмана.
4. Справочник по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 616 с. Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.
5. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с. Под ред. В.И. Круповича и др.
6. Электротехнический справочник, т.3, кн.2. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 615 с. Под ред. В.Г. Герасимова и др.
7. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
8. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 223 с.
9. Справочник по электрическим машинам. – М.: Энергоатомиздат, 1988, т.1, – 455 с; 1989, т.2. – 688 с.
10. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982 – 504 с.
11. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
12. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. – 440 с.
13. Комплектные тиристорные электроприводы. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 318 с. Под ред. В.М. Перельмутер.
14. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982 – 192 с.
15. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
16. Сарбатов Р.С. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. – М.: Энергия, 1980. – 327 с.
17. Краузе Г.Н., Кутилин Н.Д., Сыцко С.Н. Редукторы. Справочное пособие. – М.;Л.: Машиностроение, 1972.
18. Солодухо Я.И. и др. Тиристорный электропривод постоянного тока. – М.: Энергия, 1971.
19. Алексеев Ю.В., Рабинович А.А. Краново-металлургические и экскаваторные двигатели постоянного тока. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 167 с.
20. Алексеев Ю.В. и др. Крановое электрооборудование. – М.: Энергия, 1979.
21. Чиликин М.Г. и др. Основы автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
22. Лопатин В.Г., Вотинова С.Ю. Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы и проведению её защиты по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. – Лысьва, 2017. – 22 с.
23. ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.
24. ГОСТ 6.38 – 90 Унифицированные системы документации. Система организационно-распорядительной документации. Требования к оформлению документов.
25. ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
26. Руководство по эксплуатации. Электропривод транзисторный регулируемый асинхронный Триол АТ04-АТ-06, АТ16.
27. Столбов, Б.М. **Теория электромеханических систем.** Конспект лекций. Лысьва, 2001. – 234 с.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

6.1. Пояснения к п.п. 1 – 9.

К п. 1. Тахограмма РМ $\omega_m = f(t)$ строится по данным табл. 1, по ней же определяется расчётная продолжительность включения – ПВ_р в %.

$$ПВ\%_p = \frac{\sum_1^n t_{pi}}{t_{ц}} \cdot 100\% ,$$

где $n, t_{pi}, t_{ц}$ – число установившихся режимов работы, их длительность и время цикла.

К п. 2. Механическая характеристика РМ $M_{см}(\omega_m)$ задана уравнением в табл. 2. При её построении (в том числе и в 3-м квадранте) в уравнение подставляются действительные значения скорости.

К п. 3. Нагрузочная диаграмма РМ $M_{см}(t)$ строится на основании её тахограммы и механической характеристики. Для каждой из трех рабочих скоростей по механической характеристике определяются моменты сопротивления. Нагрузочная диаграмма получается путем замены на тахограмме скорости соответствующим ей моментом сопротивления $M_{см}$.

К п. 4. Предварительная расчётная мощность двигателя рассчитывается по нагрузочной диаграмме и тахограмме РМ [1, с. 378; 21, с. 527]. При этом можно использовать формулу:

$$P_p' = k_{ПН} \cdot k_{ОП} \cdot k_3 \cdot M_{НМ} \cdot \omega_{ОМ} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

где $k_{ПН} = 1,05$ – коэффициент, учитывающий пульсирующий характер напряжения, подведенного к двигателю при питании от полупроводникового преобразователя;

$k_{ОП} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий; возможный режим ослабления магнитного потока двигателя. Если в ЭП не предусматривается ослабление магнитного потока, то $k_{ОП} = 1$;

$k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент, учитывающий динамические нагрузки двигателя в переходных процессах. Рекомендуется принимать значение коэффициента $k_3 = 1,1$ для механизмов с отрицательным коэффициентом жесткости механической характеристики $\beta_c < 0$; $k_3 = 1,2$ для механизмов с $\beta_c = 0$ и $k_3 = 1,3$ для $\beta_c > 0$.

$M_{НМ}$ – номинальный момент механизма, Н·м

$$M_{НМ} = \sqrt{M_{М.СР} \cdot M_{М.СР.К}} ,$$

где $M_{М.СР}, M_{М.СР.К}$ – средний и среднеквадратичный моменты механизма, определяемые по нагрузочной диаграмме РМ;

$$M_{M.CP.} = \frac{\sum_1^n M_{CMi} \cdot t_{pi}}{\sum_1^n t_{pi}}; \quad M_{M.CP.K} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_{CMi}^2 \cdot t_{pi}}{\sum_1^n t_{pi}}},$$

где n , t_{pi} – число, установившихся режимов работы в цикле и их длительность (см. тахограмму РМ);

ω_{0M} – основная скорость вращения РМ, выбрать её (и обосновать) из числа трех заданных скоростей вращения РМ. Обращается внимание на то, что для получения ω_{0M} привод должен работать на основной механической характеристике, а для получения двух других скоростей РМ – на регулировочных характеристиках $\omega(M)$, расположенных ниже основной. Рекомендуется за основную принимать максимальную скорость при однозонном регулировании скорости и меньшую (но не самую малую) при двухзонном регулировании. Двухзонное регулирование скорости целесообразно применять в тех случаях, когда M_{CM} уменьшается с ростом скорости (при отрицательной жесткости механической характеристики РМ). Найденную расчётную мощность следует пересчитать на номинальную ПВ% = 40%:

$$P_p = P_p' \cdot \sqrt{\frac{ПВ\%_p}{ПВ\%_H}}.$$

К п. 5. По вычисленному расчётному значению мощности выбирается двигатель согласно условию: $P_{нд} \geq P_p$ при ПВ% = 40%. В зависимости от типа проектируемого ЭП выбрать электродвигатели серии Д, МТКФ, МТКН или 4АС см. Приложения А – Д.

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, например два, двигателя одного типа с **РАЗЛИЧНЫМИ номинальными СКОРОСТЯМИ, но ОДИНАКОВОЙ МОЩНОСТИ и одной и той же ПВ%**. Для каждого выбранного двигателя определяется расчётное передаточное число редуктора $i_p = \omega_H / \omega_{0M}$. По расчётному передаточному числу и мощности двигателя выбирается тип редуктора [17], а также см. (Приложения Е – К). Затем по фактическому передаточному числу редуктора определяется момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя

$$J = \delta \cdot J_D + J_M / (i^2 \cdot \eta_{HP}), \quad \delta = 1,1 \div 1,3,$$

где δ , J_D , J_M , i , η_{HP} – коэффициенты, учитывающие, соответственно: момент инерции вращающихся частей редуктора и полумуфта; моменты инерции двигателя и РМ (см. табл. 2); фактическое передаточное число редуктора и его номинальный КПД.

ВЫБИРАЕТСЯ тот вариант двигателя и редуктора, у которого величина $J_D \cdot i^2$ МИНИМАЛЬНА. Расчёты сводятся в табл. 3.

Таблица 3. Выбор двигателя по оптимальным параметрам

Тип двигателя	P_{HD} , кВт	ω_n , 1/с	i	J_D , кг·м ²	Тип редуктора	P_{HP} , кВт	ω_{HP} , 1/с	η_{HP}	$J_D \cdot i^2$

В курсовом проекте, учитывая его учебный характер, рекомендуется выбирать только цилиндрические горизонтальные одноступенчатые редукторы типов ЦОН, ЦОМ, РЦ1-150А и ГО, технические данные которых приведены в [17], а также в (Приложениях Е – К).

В качестве примера ниже приведено несколько примеров выбора редуктора.

Расчётная мощность редуктора типа ЦОН

$$P_P = k_3 \cdot P_{HD},$$

где P_{HD} – номинальная мощность, передаваемая с вала двигателя;

k_3 – коэффициент запаса, принимаемый равным 2,2 при среднем режиме работы, 1,7 при тяжелом и 1,3 при весьма тяжелом.

Расчётная мощность P_P сравнивается с табличным значением для соответствующей скорости двигателя (быстроходного вала) и передаточного числа. Табличное значение мощности выбранного редуктора должно быть больше или равно P_P .

Например, при $P_{HD} = 28$ кВт, $i = 4$, $n_n = 1000$ об/мин (скорость быстроходного вала)

$$P_P = k_3 \cdot P_{HD} = 1,7 \cdot 28 = 47,5 \text{ кВт}.$$

По табл. 11.6 [17] или табл. П.9 (см. прил. Е) при $i = 4$ и $n_n = 1000$ об/мин ближайшее значение мощности редуктора $P_{HP} = 50,1$ кВт. Следовательно, редуктором, допускающим при заданных условиях такую нагрузку, будет ЦОН-20.

Выбор редуктора типа ЦОМ производится аналогично, только вместо коэффициента k_3 в расчёт берется коэффициент k_P из табл. 11.8 [17] или табл. П.10 (см. прил. Е). Типоразмер редуктора выбирается из табл. 11.6 [17] или (табл. П.9, прил. Е).

Аналогично выбирается редуктор типа ГО. Его расчётная мощность определяется по формуле:

$$P_P = P_{HD} \cdot k_1 \cdot k_2.$$

Коэффициенты k_1 и k_2 находятся по табл. 11.19 или 11.20 [17], или (табл. П.11, прил. Ж). Типоразмер редуктора выбирается из табл. 11.18 [17] или (табл. П.12, прил. Ж).

Расчётная мощность редуктора типа РЦ1-150А:

$$P_P = P_{HD} / k_1.$$

Коэффициент k_1 находится из табл. 11.23 [19] или (табл. П.13, прил. К), типоразмер редуктора выбирается из табл. 11.22 [17] или (табл. П.14, прил. К).

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 расчёты.

$$\lambda_\phi = \frac{M_{CM} \cdot 2,5}{M_H} \leq \frac{M_{MAKC}}{M_H} = \lambda_H,$$

где λ_ϕ , λ_H – фактическая и номинальная (допустимая) перегрузки двигателя по моменту;

M_{CM} – максимальный статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, Н·м; методика его определения приведена в п. 8 настоящих указаний;

M_{MAKC} – максимальный (допустимый по условиям коммутации для ДПТ) или критический (для АД) момент.

Формулы для расчёта M_H приведены в п. 8 указаний.

К п. 6. Тип вентильного преобразователя, от которого будет питаться и посредством которого будет управляться двигатель, выбирается в зависимости от того, каким является двигатель – постоянного или переменного тока. Преобразователь для питания двигателя постоянного тока рекомендуется выбирать по номинальному току и напряжению двигателя (см. табл. прил.), а преобразователь частоты для питания асинхронного короткозамкнутого (к.з.) двигателя – по номинальному току, напряжению двигателя и диапазону частоты, обеспечивающим работу электропривода с заданными скоростями.

Если согласно тахограмме работы РМ требуется осуществлять реверс двигателя, преобразователь нужно выбирать **реверсивным**.

Одновременно с выбором преобразователя для электропривода постоянного тока выбираются тип и мощность питающего трансформатора.

Расчётное значение мощности согласующего трансформатора в системе ТП–Д:

$$S_p = \frac{P_{нд}}{\eta_{нд} \cdot \eta_{нв} \cdot \eta_{нт} \cdot k_{нт}},$$

где $P_{нд}$, $\eta_{нд}$, $\eta_{нв}$, $\eta_{нт} = 0,95 \div 0,98$, $k_{нт} = 0,955$ – соответственно номинальная мощность двигателя; номинальные значения КПД двигателя, тиристорного выпрямителя, трансформатора и коэффициент использования трансформатора (при пульсности напряжения $m = 6$). Условие выбора трансформатора: $S_H \geq S_p$ [13, с. 270 или табл. П.22, прил. П].

При выборе двигателя постоянного тока серии Д на 440 В используется бестрансформаторная схема включения преобразователя при напряжении питающей сети 380 В. В этом случае в анодную цепь преобразователя вместо трансформатора включается токоограничивающий реактор (ТОР). Расчётное значение индуктивности ТОР [7, с. 157]:

$$L_p = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{нф}}{314 \cdot I_{км}}, \text{ Гн}, \quad I_{км} = (7 \div 8) \cdot I_{дн},$$

где $I_{км}$, $I_{дн}$ – допустимый ударный ток короткого замыкания и номинальный ток преобразователя.

Условия выбора ТОР: $L_H \geq L_p$; $I_{нф} \geq I_{дн} / 3$ [13, с. 303 или табл. П.24, прил. Р].

К п. 7. Тахограмма $\omega(t)$ работы двигателя с установившимися скоростями строится по тахограмме РМ и передаточному отношению редуктора.

К п. 8. Приведенные к валу двигателя статические моменты рассчитываются по методикам [1 и 21]. При их определении следует учесть момент холостого хода двигателя.

$$M_{xx} = M_H - M_{нв},$$

где M_H – номинальный электромагнитный момент двигателя, вычисляемый по его паспортным данным, Н·м;

$M_{нв}$ – номинальный момент на валу двигателя, Н·м.

Электромагнитный момент ДПТ независимого возбуждения и параллельного возбуждения

$$M_H = k\Phi \cdot I_{ян}.$$

Номинальный ток якоря двигателя параллельного возбуждения $I_{ян} = I_H - I_{нв}$;

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_{ян} \cdot R'_{я\sigma}}{\omega_H}; \quad k = \frac{p_{п} \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a};$$

$$R'_{я\sigma} = R_{я} \left[1 + \alpha \cdot (t_{доп}^0 - t_{окр.ср.}^0) \right].$$

Номинальный электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M_H = \frac{3 \cdot U_{\Phi H}^2 \cdot R_2' / s_H}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + X_K^2 \right]}.$$

Номинальный момент на валу

$$M_{HB} = \frac{P_{HD} \cdot 10^3}{\omega_H}.$$

Фактический момент сопротивления РМ

$$M_{Ci} = M_{Ci}' + M_{XX}.$$

Приведенный момент сопротивления РМ для двигательного режима

$$M_{Ci}' = \frac{M_{CM,i}}{i \cdot \eta_{HP}}$$

Скорости на валу двигателя, соответствующие статическим моментам, определены в п.7. Отложив на графике значения момента сопротивления и скорости, строится характеристика момента сопротивления на валу двигателя, которая и используется в дальнейших расчётах.

К п. 9. При обосновании способа пуска, регулирования скорости и торможения (останова) электропривода необходимо показать какие способы управления двигателем возможны в разомкнутых системах ТП–Д и ПЧ–АД, и как автор курсового проекта предполагает управлять двигателем в заданной ему системе электропривода.

При выборе способа регулирования скорости следует учесть, что технологический процесс допускает отклонение рабочих скоростей машин в пределах $\pm 5\%$, **а низкая (заправочная) скорость может быть изменена в пределах $\pm 50\%$.**

При решении регулировать скорость двигателя постоянного тока ослаблением магнитного потока необходимо предварительно установить, допустимо ли для данных условий ослабление потока, т.е. установить, не будет ли ток якоря превышать допустимое с точки зрения коммутации значение, и лишь после этого сделать заключение о способе разгона двигателя до заданной повышенной скорости. Допустимый ток при ослаблении магнитного потока не должен превышать

$$I'_{доп} \cong I_{доп} \cdot \frac{\Phi'}{\Phi_H} \cong I_{доп} \cdot \frac{\omega_H}{\omega_C},$$

где ω_C – скорость, на который двигатель должен работать при ослабленном потоке;

ω_H – номинальная скорость при номинальном потоке;

$I_{доп}$ – допустимый ток при номинальном потоке;

Φ' – ослабленный магнитный поток двигателя, Вб;

Φ_H – номинальный поток двигателя, Вб.

Рассмотрим методику определения требуемого магнитного потока Φ' .

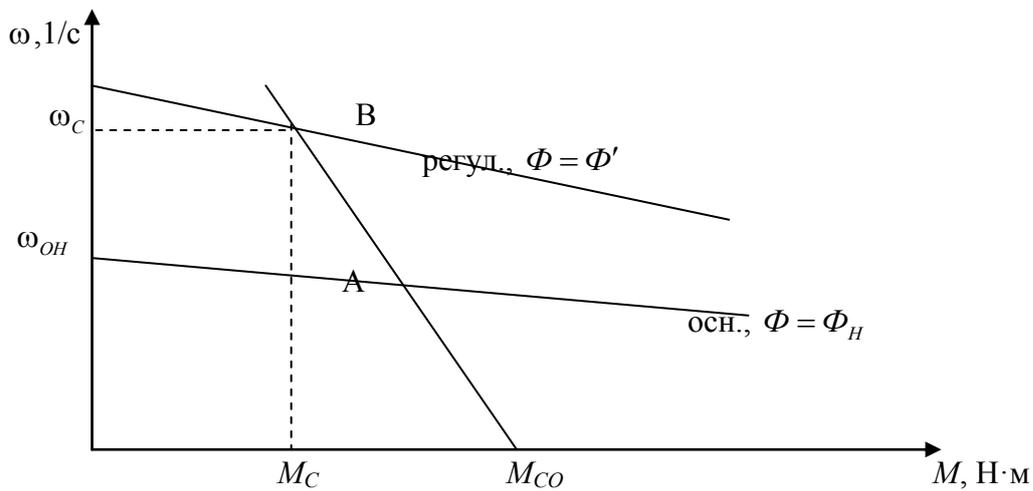


Рисунок 1. Иллюстрация для определения потока Φ'

Пусть ЭП постоянного тока системы ТП–Д переведен для работы с ослабленным потоком Φ' из т. А в т. В (рис. 1)

Определяется значение коэффициента $(k\Phi_H)'$:

$$(k\Phi)' = \frac{U + \sqrt{U^2 - 4 \cdot \omega_c \cdot M_c \cdot R'_{я\sigma}}}{2 \cdot \omega_c},$$

где $U, R'_{я\sigma}$ – напряжение на якорной обмотке двигателя и суммарное сопротивление её цепи.

В системе ТП–Д $U = U_{дн}, R'_{я\sigma} = R_{\Sigma}$, где $E_{ГН}, U_{дн}, R_{\Sigma}$ – номинальные ЭДС генератора, выпрямленное напряжение тиристорного преобразователя и эквивалентное сопротивление силовой части схемы системы ТП–Д (определение его см. в п. 10).

Тогда

$$\Phi' = \frac{(k\Phi)'}{k} \cdot \hat{A} \hat{a}, \quad k = \frac{p_{II} \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}.$$

Ток в якорной цепи двигателя при работе в т. В: $I_c = M_c / (k\Phi)'$.

Если $I_c \leq I'_{доп}$, то возможно ослабление потока до значения Φ' . Если это условие выполняется, то необходимо определить величину добавочного сопротивления, которое следует ввести в цепь возбуждения двигателя для ослабления потока. С этой целью по кривой намагничивания выбранного двигателя находят ток возбуждения, соответствующий ослабленному потоку, зная который, можно найти сопротивление цепи возбуждения. Вычитая из него величину сопротивления обмотки возбуждения двигателя, находят требуемое для ослабления потока значение добавочного сопротивления.

При решении применить двухзонное регулирование скорости системы ПЧ–АД, необходимо выполнение условия двойного запаса по перегрузочной способности по моменту: $M_K / M_C \geq 2$, где M_K и M_C – критический момент двигателя при $f_1 > f_{1H}$ и момент статического сопротивления в установившемся режиме работы. При этом $U_\phi = U_{\phi H} = 220B = const$.

Тогда

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{\phi H}^2}{2 \cdot \omega_{OP} \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K'^2})}, \quad X_K' = (X_1 + X_2') \cdot \frac{f_1}{f_{1H}},$$

где ω_{OP} , X_K' – скорость идеального х.х. и индуктивное сопротивление к.з. при $f_1 > f_{1H}$.

Если $M_K / M_C < 2$, то двухзонное регулирование скорости применять не рекомендуется.

Торможение электропривода во всех системах рекуперативное.

Останов двигателя при работе на последнем участке цикла можно осуществлять свободным выбегом, если двигатель на этом участке работает с небольшой (по сравнению с предыдущими участками цикла) скоростью и если длительность переходных процессов не превышает заданного значения.

6.2 Пояснения к п. 10 «Статические механические характеристики $\omega = f(M)$ проектируемых регулируемых ЭП»

Статические механические характеристики $\omega = f(M)$ проектируемых регулируемых ЭП в первом приближении с учетом известных допущений линейны [1; 2; 11; 21], поэтому в рамках курсового проекта рекомендуется их построить по двум точкам с координатами:

1) $\omega = \omega_{0i}; M=0$ (точка идеального холостого хода).

2) $\omega = \omega_{Ci}; M = M_{Ci}$ (точка i -го установившегося режима работы, координаты которых определены в п.п. 7, 8).

Координаты точек для построения статических механических характеристик двигателей определяется следующим образом:

6.2.1 Система ТП–Д

Для расчёта и построения статических механических характеристик системы, соответствующих установившимся скоростям вращения двигателя, необходимо предварительно определить эквивалентное сопротивление якорной цепи

$$R_{Я\Sigma Д} = \frac{m x_{TP}}{2\pi} + R_{CD} + 2R_{УД} + 2R_{TP} + R_{Я\Sigma},$$

здесь m – число пульсаций выпрямительного напряжения. Для мостовой схемы преобразования $m = 6$, для нулевой $m = 3$.

Активное и реактивное сопротивления трансформатора, приведенные к его вторичной обмотке, рассчитывают по формулам:

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3}}{m_1 \cdot I_{1H}^2 \cdot k_{TP}^2}, \quad x_{TP} = \frac{U_K \% \cdot U_{1\Phi}}{100 \cdot I_{1H} \cdot k_{TP}^2},$$

где ΔP_{K3} – потери короткого замыкания трансформатора, Вт;

m_1 – число фаз первичной обмотки трансформатора;

$U_{K3} \%$ – напряжение к.з. трансформатора;

$$k_{TP} = U_{1\Phi} / U_{2\Phi}.$$

Сопротивление сглаживающего и уравнивающего дросселей

$$R_{CD} \cong \frac{\Delta U_{CD.H}}{I_{dH}}, \quad R_{yD} \cong \frac{\Delta U_{yD.H}}{I_{dH}},$$

где $\Delta U_{CD.H} = \Delta U_{yD.H} \cong (0,005 \div 0,01) \cdot U_{dH}$ – падение напряжения на сглаживающем и уравнивающих дросселях при номинальном выпрямленном токе I_{dH} .

Статические механические характеристики рассчитываются по формуле

$$\omega = \frac{E_{d0} \cdot \cos \alpha_i}{k\Phi_H} - \frac{R_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} \cdot M$$

здесь $E_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_{2\Phi} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = 2,34 \cdot U_{2\Phi}$ при $m = 6$ и $E_{d0} = 1,17 \cdot U_{2\Phi}$ при $m = 3$.

Угол задержки открывания вентилей α_i , необходимый для обеспечения работы двигателя с установившейся скоростью ω_{ci}

$$\alpha_i = \arccos \frac{U_{di}}{E_{d0}} = \arccos \frac{k\Phi_H \cdot \omega_{ci} + I_{ci} \cdot R_{\Sigma}}{E_{d0}}.$$

Здесь $I_{ci} = \frac{M_{ci}}{k\Phi_H}$ – ток статической нагрузки, которому соответствует приведенный момент M_{ci} . Он находится по характеристике $\omega(M_c)$ при данной ω_{ci} .

Для уменьшения зоны прерывистых токов, которая возникает в нереверсивных схемах преобразователей и в реверсивных при раздельном управлении, сглаживания пульсаций выпрямленного тока, ограничения тока через тиристоры в первый полупериод питающего напряжения при коротком замыкании на стороне выпрямленного тока в тиристорном электроприводе постоянного тока применяют дроссели, включаемые в якорную цепь.

В данной курсовом проекте предлагается рассчитать индуктивность дросселя в целях уменьшения зоны прерывистых токов до определенного значения (не > 10% от номинального тока двигателя при максимальном угле регулирования).

Если преобразователь реверсивный, с уравнительными реакторами, то зоны прерывистых токов нет, ибо уравнительные токи уже являются нагрузкой для тиристорov. Добавочная индуктивность в этом случае нужна для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

Методика расчёта индуктивности сглаживающего дросселя заключается в следующем. Суммарная индуктивность, необходимая для сглаживания пульсаций тока до заданного значения [7, с. 157; 18, с. 62]

$$L_{\Sigma} = \frac{l_e \cdot E_{d0}}{i_e \cdot \omega_1 \cdot I_H},$$

где l_e , i_e – относительные величины пульсаций первых гармоник выпрямленного напряжения и тока.

В расчётах принимаются $i_e = 0,02 \div 0,05$; $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_{1H} = 314$ 1/с;

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

где α_M – максимальный угол открывания тиристорov в заданном диапазоне регулирования скорости;

m – пульсность схемы выпрямления, $m = 3; 6$.

Расчётная индуктивность сглаживающего дросселя

$$L_{CD} = L_{\Sigma} - L_{Я} - L_{ТР} - L_{УД}.$$

Если пульсность схемы выпрямления $m = 6$, то формулу необходимо подставить значение $2 \cdot L_{ТР}$. Если ТП выбран в бестрансформаторном исполнении, то вместо $L_{ТР}$ в формулу нужно подставить $2 \cdot L_H$ токоограничивающего реактора (см. п. б).

Если в схеме установлены четыре насыщающихся уравнительных дросселя, подставляется значение $L_{УД} = 0$. Если же в схеме установлены два ненасыщающихся уравнительных дросселя, то в формулу подставляют $L_{УД}$ одного дросселя.

Индуктивность якорной цепи двигателя:

$$L_{Я} = \gamma \frac{U_H}{I_H \cdot \omega_H \cdot p_{П}},$$

где $\gamma = 0,5 \div 0,6$ – для некомпенсированных машин (мощность < 100 кВт);

$\gamma = 0,25$ – для компенсированных машин;

$p_{П}$ – число пар полюсов двигателя.

Индуктивность согласующего трансформатора

$$L_{TP} = \frac{x_{TP}}{\omega_1} = \frac{x_{TP}}{314}.$$

Индуктивность уравнивающего дросселя

$$L_{yд} = \frac{\sqrt{2} \cdot k_d \cdot U_{2\phi}}{\omega_1 \cdot I_y},$$

где I_y – допустимый уравнивающий ток, $I_y = 0,1 \cdot I_H$;

k_d – коэффициент действующего значения уравнивающего тока. Он определяется по $\alpha = \alpha_m$ (см. табл. 4).

Таблица 4. Зависимость $k_d = f(\alpha^0)$

α^0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
k_d	0	0,02	0,05	0,12	0,25	0,40	0,63	0,42	0,26	0,18

Расчёт индуктивности для ограничения зоны прерывистых токов проводится следующим образом. Величина индуктивности цепи выпрямительного тока, необходимая для сужения зоны прерывистых токов до заданного значения, т.е. для получения начально-непрерывного (граничного) тока, в случае трехфазной нулевой схемы выпрямления [18]

$$L_d = \frac{1}{\omega_1} \cdot \left(0,46 \cdot \frac{U_{2\phi}}{I_{d.ГР}} \cdot \sin \alpha_M - x_{TP} \right),$$

а в случае мостовой симметричной схемы выпрямления:

$$L_d = \frac{1}{\omega_1} \cdot \left(0,126 \cdot \frac{U_{2л}}{I_{d.ГР}} \cdot \sin \alpha_M - 2 \cdot x_{TP} \right),$$

здесь ω_1 – угловая частота питающей сети, $\omega_1 = 314$ 1/с;

$U_{2\phi}$, $U_{2л}$ – соответственно фазное и линейное напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора, В;

α_m – максимальный угол регулирования вентилей в заданном диапазоне регулирования скорости;

x_{TP} – индуктивное сопротивление фазы питающего трансформатора;

$I_{d.ГР}$ – начально-непрерывный ток якоря двигателя при максимальном угле регулирования (при расчётах принять равным 0,9 тока холостого тока привода), $I_{xx.ГР} \approx 2 \cdot I_{xx.д}$.

Расчётная индуктивность дросселя

$$L_{ДР} = L_d - L_{я} - L_{yд}.$$

По двум найденным расчётным значениям индуктивностей L_{CD} и L_{DP} выбрать дроссель из условия [13; табл. П.24, П.25, Прил. Р]

$$L_{H,DP} \geq L_{P,M}, \quad I_{H,DP} > I_H,$$

где $L_{H,DP}$ – номинальное значение индуктивности дросселя по паспорту, Гн;

$L_{P,M}$ – расчётное максимальное значение индуктивности (L_{CD} или L_{DP}).

С учетом индуктивностей выбранных дросселей необходимо рассчитать зону прерывистых токов, если ТП выбран с отдельным управлением.

Для расчёта этой зоны находится граничный ток при фактически определенной индуктивности на стороне выпрямленного напряжения

$$L_{d,\Phi} = L_{я} + L_{H,CD} + L_{H,UD}.$$

При $m = 6$

$$I_{d,ГР,i} = \frac{0,126 \cdot U_{2Л}}{L_{d,\Phi} \cdot \omega_1 + 2 \cdot x_{ГР}} \cdot \sin \alpha_i.$$

При $m = 3$

$$I_{d,ГР,i} = \frac{0,46 \cdot U_{2\Phi}}{L_{d,\Phi} \cdot \omega_1 + x_{ГР}} \cdot \sin \alpha_i,$$

здесь α_i – угол регулирования, соответствующий i -й статической характеристике $\omega(I)$ или $\omega(M)$ привода.

Для построения зоны прерывистых токов необходимо для каждого найденного значения $I_{d,ГР,i}$ определить скорость привода ω_i по уравнениям статических характеристик $\omega(I)$ или $\omega(M)$ системы ТП–Д.

6.2.2 Система ПЧ–АД

Механические характеристики двигателя в этой системе предлагается рассчитывать в предположении компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, т.е. при законе частотного управления

$$\frac{U_{\Phi i} - I_{ii} \cdot R_1}{f_{ii}} = const = A.$$

Предварительно необходимо определить синхронные скорости, частоты и величины напряжения на выходе ПЧ, обеспечивающие работу двигателя с заданными установившимися

скоростями. Для этого находят падение скорости $\Delta\omega_1$ при работе с заданной скоростью ω_1 , на естественной характеристике (см. рис. 2) при частоте 50 Гц. Это позволит определить её жесткость

$$\beta = \frac{\Delta\dot{\omega}}{\Delta\omega} = \frac{\dot{\omega}_{\bar{n}1}}{\Delta\omega_1}.$$

При заданных условиях она будет одинаковой для всех характеристик, на которых должен работать двигатель. Зная её, можно для каждой из характеристик определить $\Delta\omega_i = M_{Ci}/\beta$ при соответствующих M_{Ci} и ω_{Ci} . При сложении $\Delta\omega_i$ с заданной скоростью ω_{Ci} находят соответствующие синхронные скорости ω_{0i} и необходимые частоты напряжения на выходе ПЧ:

$$f_{1i} = f_{1H} \cdot \frac{\omega_{0i}}{\omega_{0H}}.$$

Соответствующие этим частотам напряжения на выходе ПЧ для каждого установившегося режима работы определяются исходя из заданного закона частотного управления. Численное значение коэффициента A определяется из уравнения:

$$A = \frac{U_{\phi H} - I_{1H} \cdot R_1}{f_{1H}}.$$

Для расчёта напряжений $U_{\phi i}$ необходимо знать в обмотке статора I_{1i} в каждом установившемся режиме. Они определяются по формулам:

$$I_{1i} \approx \sqrt{I_{2i}'^2 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha) + I_{\mu H}^2}; \quad I_{2i}' = \sqrt{\frac{M_{Ci} \cdot (\omega_{0P} - \omega_{Ci})}{3 \cdot R_2'}};$$

$$I_{\mu H} \approx I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right);$$

$$\alpha = I_{\mu H} / I_{2PP}'; \quad I_{2PP}' = \frac{U_{\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}},$$

где I_{2i}' , $I_{\mu H}$, M_{Ci} , ω_{Ci} , ω_{0P} , λ_M – соответственно, приведенный ток ротора в i -м установившемся режиме; номинальный ток намагничивания; приведенный статический момент на валу двигателя и соответствующая ему скорость вращения; скорость идеального холостого хода на i -ой регулировочной характеристике; номинальная перегрузочная способность по моменту АД.

Ниже предложена еще одна методика расчёта требуемого напряжения $U_{\phi i}$, подаваемого на обмотку статора при частотах $f_{1i} < f_{1H}$, исходя из обеспечения постоянного M_K на всех регулировочных характеристиках в нижнем поддиапазоне регулирования.

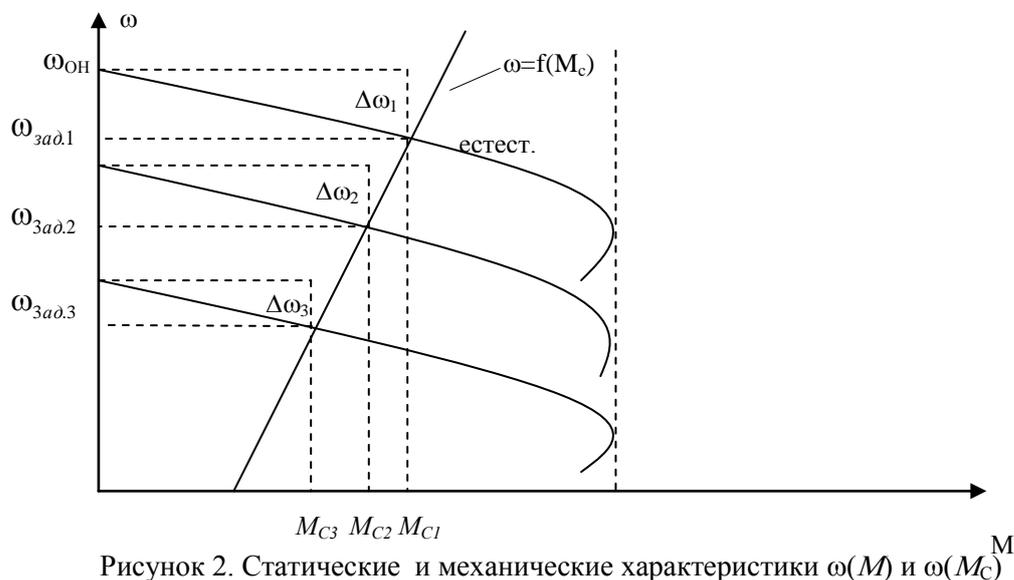


Рисунок 2. Статические и механические характеристики $\omega(M)$ и $\omega(M_c)^M$

Требуемое напряжение определяется по формуле:

$$U_{\phi i} = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{KE} \cdot \omega_{oi} \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{ki}^2}]}{3}},$$

где M_{KE} – критический момент на естественной характеристике $M(s)$;

$\omega_{oi} = \omega_{0H} \cdot \varphi$ – скорость идеального холостого хода на регулировочной характеристике $M(s)$;

$\varphi = \frac{f_{1i}}{f_{1H}}$ – относительная частота напряжения;

$X_{ki} = (X_1 + X_2') \cdot \varphi$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания при частоте f_{1i} .

При работе ЭП в области частот $f_{1i} > f_{1H}$ напряжение $U_{\phi i} = U_{\phi H} = const.$.

Более точные методики расчёта, характеристик и параметров проектируемых систем ЭП изложены в [1, с. 423; 4, с. 176; 21, с. 314].

6.3 Пояснения к п. 11 «Расчёт переходных процессов (зависимости $\omega(t)$, $M(t)$, $\omega_0(t)$)»

Независимо от типа системы электропривода и способа формирования переходных процессов общий порядок их расчёта одинаков:

1. На построенных статических механических характеристиках двигателя и РМ находят характерные точки, определяют начальные и конечные условия переходного процесса.
2. Рассчитывают переходные процессы, т.е. зависимости $\omega(t)$, $M(t)$, $\omega_0(t)$.

3. Строят графики этих зависимостей.

При расчётах необходимо иметь в виду, что двигатель в переходном режиме должен быть полностью использован по моменту. Вместе с тем нагрузка **не должна** превышать допустимую.

Если скорость двигателя постоянного тока регулируется изменением магнитного потока, необходимо учитывать электромагнитные переходные процессы в обмотке возбуждения.

При свободном выбеге расчёт переходного процесса сводится к расчёту времени выбега. Отличительным для свободного выбега является равенство нулю момента двигателя и совпадение с осью скоростей его механической характеристики, а динамический момент равен статическому, взятому с обратным знаком. Время свободного выбега:

$$\Delta t \cong J \cdot \frac{\Delta \omega}{M_C},$$

где $\Delta \omega$ – скорость, при которой двигатель отключается от источника питания;

M_C – соответствующий этой скорости статический момент.

При линейных механических характеристиках двигателя и одинаковых их жесткостях во всем диапазоне скоростей вращения и линейных механических характеристиках РМ возможен аналитический метод расчёта переходных процессов при питании двигателя от вентильного преобразователя в системах ТП–Д и ПЧ–АД.

Для расчёта переходных процессов в случае, когда предполагается ослаблять магнитный поток двигателя в системе ТП–Д с целью обеспечения работы ЭП на регулировочной характеристике, расположенной выше основной (см. рис. 8), необходимо выполнить следующее [21, с. 431]:

1. По универсальной кривой намагничивания, приведенной в приложении, а также в [4, с. 34], рассчитывается и строится кривая намагничивания двигателя $\Phi(I_B)$.
2. Рассчитывается начальное $\Phi_{НАЧ}$ и конечное $\Phi_{КОН}$ значения потока. В качестве $\Phi_{НАЧ}$ принимается номинальный поток, Φ_H двигателя, работающего на основной характеристике $\omega(M)$. Методика определения требуемого $\Phi_{КОН}$ изложена в п. 9 настоящих указаний (определение Φ').
3. По кривой намагничивания $\Phi(I_B)$ определяется начальное $I_{В.НАЧ}$ и конечное $I_{В.КОН}$ значения токов возбуждения двигателя.
4. По конечному значению $I_{В.КОН}$ рассчитывается добавочное сопротивление, которое необходимо включить в цепь ОВД для получения требуемого магнитного потока $\Phi_{КОН} = \Phi'$, а при питании обмотки возбуждения от тиристорного возбудителя, определить необходимое напряжение на ней.

5. Рассчитывается электромагнитная постоянная T_B контура возбуждения

$$T_B = L_{ВД} / (R_B + R_D) \text{ (при питании ОВД от тиристорного возбудителя } T_B = \frac{L_{ВД}}{R_B} \text{)}.$$

6. Рассчитывается и строится кривая $I_B(t)$:

$$I_B(t) = I_{B.КОН} \cdot \left(1 - e^{-t/T_B}\right) + I_{B.НАЧ} \cdot e^{-t/T_B}$$

Длительность переходного процесса $t_{ПП} \approx 4 \cdot T_B$.

7. Используя кривые $\Phi(I_B)$ и $I_B(t)$, строится кривая $\Phi(t)$.

8. Строится кривая $\varphi(t)$, где φ – магнитный поток в относительных единицах:

$$\varphi(t) = \Phi(t) / \Phi_H.$$

9. Кривая разбивается на $8 \div 10$ интервалов по оси времени, принимая $\Delta t_i = const$.

10. На каждом i -м интервале определяется среднее значение $\varphi_{ср.i}$ относительного потока.

11. Рассчитывается приращение скорости вращения ЭП на каждом i -м интервале:

$$\Delta\omega_i(t) = \frac{\omega_{ОН} \cdot \varphi_{ср.i} - \varphi_{ср.i}^2 \cdot \omega_{НАЧ.i} - \Delta\omega_C}{T_M / \Delta t_i + \varphi_{ср.i}^2 / 2},$$

где $\omega_{ОН}$, $\omega_{НАЧ.i}$, $\Delta\omega_C$, T_M – скорость идеального холостого хода на основной характеристике $\omega(M)$; начальная скорость вращения ЭП на i -ом интервале (на первом интервале $\omega_{НАЧ.1} = \omega_C$ на основной характеристике); статическое падение скорости и электромеханическая постоянная времени на основной характеристике.

Одновременно строится кривая скорости $\omega(t)$, т.к. $\omega_{КОН.i}(t) = \omega_{НАЧ.i}(t) + \Delta\omega_i(t)$, при этом $\omega_{КОН.i} = \omega_{НАЧ.i+1}$ (например, $\omega_{КОН.1} = \omega_{НАЧ.2}$).

12. Рассчитывается кривая $I(t)$, по уравнению:

$$I(t) = \frac{U - \omega(t) \cdot \varphi(t) \cdot k\Phi_H}{R_{\Sigma}}$$

Рекомендации относительно численного значения величины U изложены в п. 9 настоящих указаний.

13. Рассчитывается зависимость $M(t)$:

$$M(t) = I(t) \cdot \varphi(t) \cdot k\Phi_H.$$

14. Рассчитывается зависимость $\omega_0(t)$:

$$\omega_0(t) = \omega_{ОП} \cdot \left(1 - e^{-t/T_B}\right) + \omega_{ОН} \cdot e^{-t/T_B}.$$

15. Строятся графики переходных процессов (рис. 3).

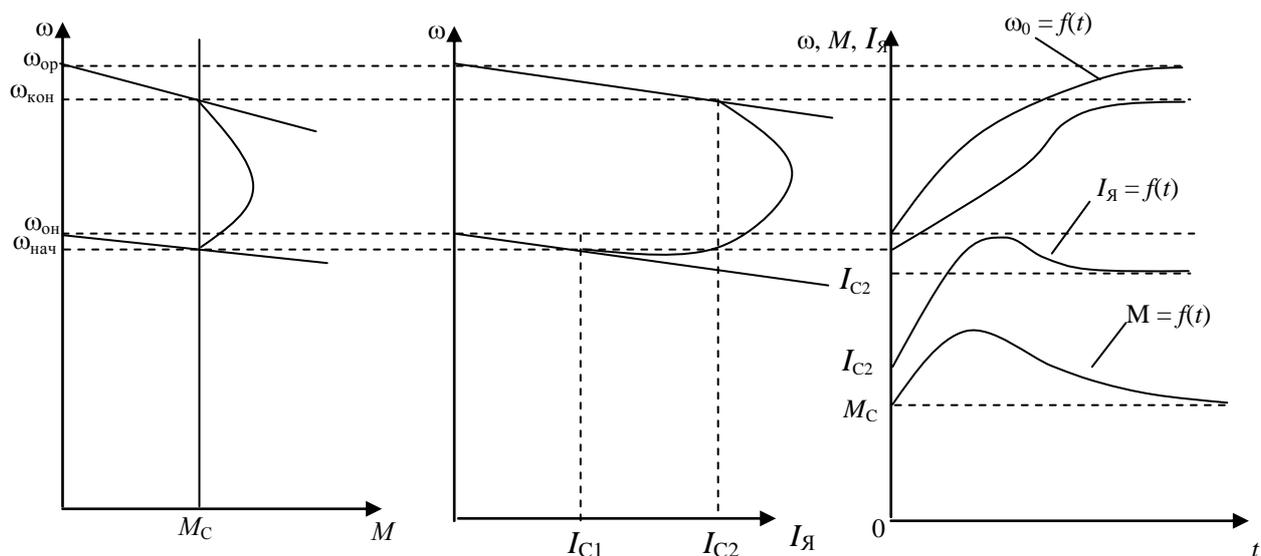


Рисунок 3. Статические характеристики, динамическая характеристика и графики переходных процессов при ослаблении магнитного потока двигателя

Примечание: Методика расчёта переходных процессов при усилении магнитного потока двигателя с целью перевода режима работы ЭП с регулировочной характеристики на основную (рис. 4) идентична выше изложенной. В этом случае при определении величины T_B положить $R_D = 0$.

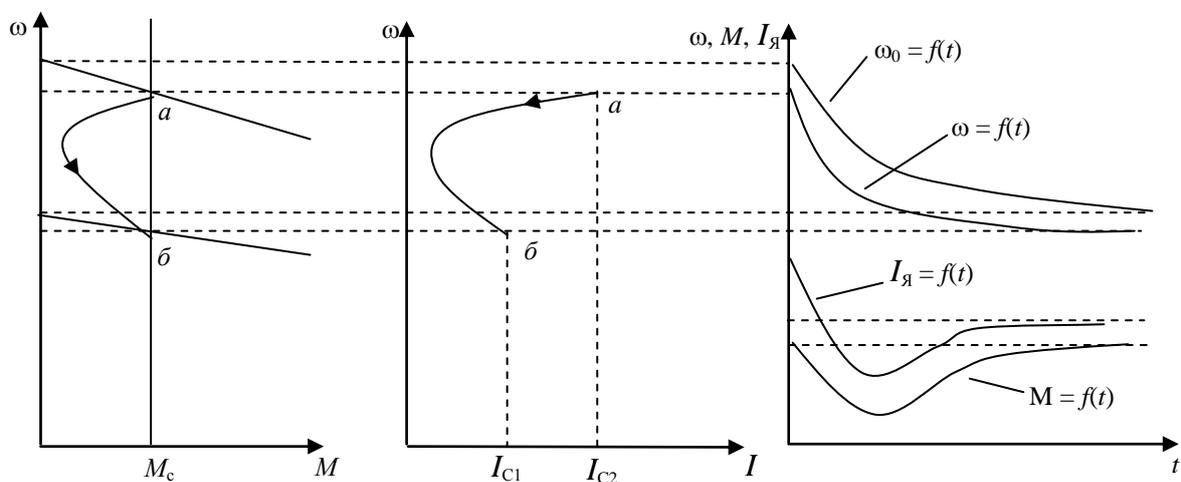


Рисунок 4. Статические характеристики, динамическая характеристика и графики переходных процессов при усилении магнитного потока двигателя

6.3.1 Расчёт переходных процессов в системах ТП–Д и ПЧ–АД

[1, с. 302; 2, с. 225; 21, с. 401]

Расчёт переходных процессов в разомкнутой системе электропривода при питании двигателя от вентильного преобразователя предлагается выполнить в предположении, что управление приводом осуществляется путем линейного изменения во времени скорости

идеального холостого хода (скорости вращения магнитного поля (синхронной скорости) у асинхронных двигателей), т.е. по закону:

$$\omega_0(t) = \omega_{0,HAЧ} + \varepsilon_0 \cdot t,$$

где ε_0 – ускорение скорости идеального холостого хода, определяемое из условия полного использования двигателя по моменту.

Так как скорость нарастания управляющего сигнала ограничивается, электромагнитная инерция силовой цепи двигателя в переходном процессе проявляется незначительно и ею можно пренебречь. Ниже излагается сущность аналитического расчёта при линейном изменении скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$ для случая $M_C \neq const$.

При определении длительности изменения ω_0 необходимо учитывать знак ускорения $\varepsilon_0 > 0$ при пуске в области положительных скоростей и при торможении в области отрицательных скоростей. Ускорение $\varepsilon_0 < 0$ при пуске в области отрицательных скоростей и при торможении в области положительных скоростей.

Следует иметь в виду, что суммарная длительность переходных процессов (пуск, изменение скорости, торможение) не должно превышать (2÷3)% от времени цикла.

Скорость двигателя и его момент в переходных режимах при питании от вентильного преобразователя изменяются по законам:

$$\omega(t) = \omega_{HAЧ} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t}{\beta - \beta_C} + T_M \cdot \left(\varepsilon_{HAЧ} - \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \right) \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \quad (1)$$

$$M(t) = M_{HAЧ} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_C} \right) - T_M \cdot \left(\varepsilon_{HAЧ} - \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \right) \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (2)$$

Эти выражения получены для самых общих условий протекания переходных процессов, имеют общий характер и могут использоваться для расчёта этих процессов. В этих выражениях β и β_C – соответственно коэффициенты жесткости механических характеристик двигателя и РМ.

$$\beta = \frac{\Delta \dot{M}}{\Delta \omega} < 0, \quad \beta_C = \frac{\Delta M_C}{\Delta \omega} \neq 0,$$

где ΔM , ΔM_C , $\Delta \omega$ – приращения момента двигателя и момента статического сопротивления; соответствующие приращениям скорости.

Примечание. При определении β_C значения момента и скорости берутся для точек расположенных в одном квадранте (если точки расположены в разных квадрантах, то отрицательные значения берутся по модулю).

Ускорение идеального холостого хода ε_0 рассчитывается, как уже сказано выше, из условия полного использования двигателя по моменту в переходных процессах:

$$\varepsilon_0 = \frac{M_M \mp M_{C.M.}}{J},$$

где M_M , $M_{C.M.}$ – соответственно максимально допустимый момент двигателя и максимальный статический момент;

Для ДПТ $M_M \leq M_{доп}$ (см. данные двигателя), для АД $M_M \leq 0,85 \cdot M_K$ (критический момент). Знак «+» используется при торможении, знак «-» при разгоне привода.

T_M – электромеханическая постоянная времени электропривода,

$$T_M = \frac{J}{\beta_c + |\beta|};$$

$\varepsilon_{нач}$ – начальное угловое ускорение электропривода, $\varepsilon_{нач} = (M_{нач} - M_{C.нач})/J$, где $M_{нач}$, $M_{C.нач}$ – начальные моменты двигателя и статического сопротивления, соответствующие началу i -го этапа переходного процесса (см. рис. 5).

Для расчёта начального момента сопротивления используют формулу

$$M_{C.нач.i} = \frac{M_{CM}}{i_p \cdot \eta_{HP}} + M_{XX}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2 \text{ а})$$

где M_{CM} – закон изменения момента сопротивления (см. табл. 2).

Расчёт переходных процессов рекомендуется вести в такой последовательности:

А). Разгон системы из неподвижного состояния (рис. 5). В этом случае переходный процесс разбивается на три этапа. На I-м этапе, $0 \leq t \leq t_0$, ротор (якорь) остается неподвижным, поскольку момент двигателя меньше момента сопротивления. Начальная механическая характеристика двигателя проходит через начало координат, конечная – через точку с координатами $\omega = 0$ и $M = M_{C0}$ (ей соответствует $\omega_0 = \omega_{0,кон.I}$).

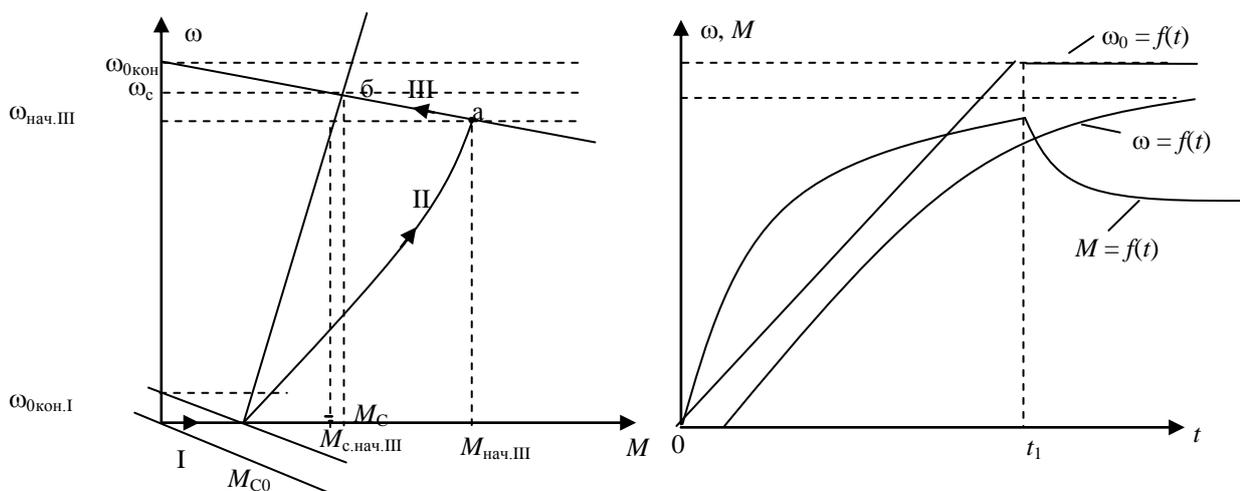


Рисунок 5. Статические и динамическая характеристики, и графики переходных процессов при пуске ЭП

Для данного этапа справедливы начальные условия:

$$\beta_C = \infty, \omega = 0, \varepsilon_{НАЧ} = 0, M_{НАЧ} = 0, \varepsilon_0 > 0.$$

Примечание: При расчёте переходных процессов необходимо учитывать, что ε_0 положительна в четвертом и первом квадрантах и отрицательна во втором и третьем. будет положительная и равна ε_0 торможения.

Момент двигателя на этом этапе изменяется по закону

$$M(t) = -\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t.$$

Заканчивается I-й этап при увеличении M до M_{CO} , когда скорость ω_0 достигает значения:

$$\omega_{0,КОН.I} = \varepsilon_0 \cdot t_I = -M_{CO}/\beta.$$

Длительность этапа:

$$t_0 = t_I = -\frac{M_{CO}}{\beta \cdot \varepsilon_0}.$$

На II-м этапе начало отсчета переносят в t_0 . За время $t_0 \leq t \leq t_1$ (см. рис. 5) происходит разгон двигателя при линейном изменении ω_0 во времени. Начальные условия этого этапа:

$$\omega_{НАЧ} = 0, M_{НАЧ} = M_{CO}, \varepsilon_{НАЧ} = 0, \omega_{0,НАЧ} = -M_{CO}/\beta, \varepsilon_0 > 0.$$

Скорость и момент на данном этапе описываются уравнениями :

$$\omega(t) = \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \left[t - T_M \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right], \quad (3)$$

$$M(t) = M_{CO} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_C} \right) + T_M \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (4)$$

Величина ε_0 имеет то же значение, что и на первом этапе.

Начальная механическая характеристика двигателя на II-м этапе совпадает с конечной характеристикой I-го этапа, конечная характеристика II-го этапа проходит через точку «а» заданного установившегося режима работы.

Заканчивается этап в момент времени t_1 , когда двигатель выходит в точку «а» на характеристику, обеспечивающую заданную скорость РМ, при этом ω_0 достигает значения $\omega_{0, КОН}$ (см. рис. 5).

Длительность II-го этапа:

$$t_{II} = t_1 - t_0 = \frac{\omega_{0,КОН} - \omega_{0,КОН.I}}{\varepsilon_0}.$$

На III-м этапе $t > t_1$ (см. рис. 5) происходит окончательный разгон двигателя до установившегося режима при постоянном значении скорости идеального холостого хода $\omega_{0, \text{кон}}$. Для этого этапа начальные условия:

$$\omega_{\text{нач. III}} = \omega_{\text{кон. II}}, \quad M_{\text{НАЧ. III}} = M_{\text{КОН. II}};$$

$$\varepsilon_0 = 0, \quad \varepsilon_{\text{НАЧ}} = \frac{M_{\text{НАЧ. III}} - M_{\text{С.НАЧ. III}}}{J}.$$

Уравнение скорости на этапе имеет вид:

$$\omega(t) = \omega_{\text{НАЧ}} + T_M \cdot \varepsilon_{\text{НАЧ}} \cdot \left(1 - e^{-t/T_M}\right). \quad (5)$$

Данное уравнение можно представить также в виде:

$$\omega(t) = \omega_C + (\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_C) \cdot e^{-t/T_M}. \quad (6)$$

Уравнение момента имеет вид:

$$M(t) = M_{\text{НАЧ}} + \beta \cdot T_M \cdot \varepsilon_{\text{НАЧ}} \cdot \left(1 - e^{-t/T_M}\right) = M_{\text{НАЧ}} + \frac{\beta}{\beta - \beta_C} \cdot (M_{\text{НАЧ}} - M_{\text{С.НАЧ}}) \cdot \left(1 - e^{-t/T_M}\right). \quad (5')$$

После ряда преобразований получаем:

$$M(t) = M_C + (M_{\text{НАЧ}} - M_C) \cdot e^{-t/T_M}. \quad (7)$$

Длительность этапа:

$$t_{\text{III}} = (3 \div 4) \cdot T_M.$$

Б) Увеличение скорости системы (см. рис. 6). Полагаем, что исходный режим работы был установившимся, двигатель работал на начальной характеристике в точке «а». В данном случае переходный процесс разбивается на два этапа: этап разгона при линейном изменении ω_0 ($0 \leq t \leq t_1$) и при $\omega_0 = \text{const}$ ($t > t_1$).

Начальные условия I-го этапа: $\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_{\text{НАЧ. I}}, M_{\text{НАЧ}} = M_{\text{С.НАЧ. I}}, \varepsilon_0 > 0, \varepsilon_{\text{НАЧ}} = 0$.

Уравнения для скорости и момента в функции времени на данном этапе:

$$\omega(t) = \omega_{\text{НАЧ}} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \left[t - T_M \cdot \left(1 - e^{-t/T_M}\right) \right], \quad (8)$$

$$M(t) = M_{нач} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) + T_M \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (9)$$

I-й этап заканчивается в момент времени (t_1 на рис. 6), когда двигатель выходит на характеристику заданного режима в точке «б».

Длительность этапа :

$$t_1 = t_1 = \frac{\omega_{0,кон} - \omega_{0,нач}}{\varepsilon_0}.$$

Для расчёта переходного процесса нужно определить новое численное значение величины ε_0 .

Дальнейший разгон двигателя протекает при постоянном значении $\omega_0 = \omega_{0,кон}$. Скорость и момент на этом этапе описываются уравнениями (6) и (7).

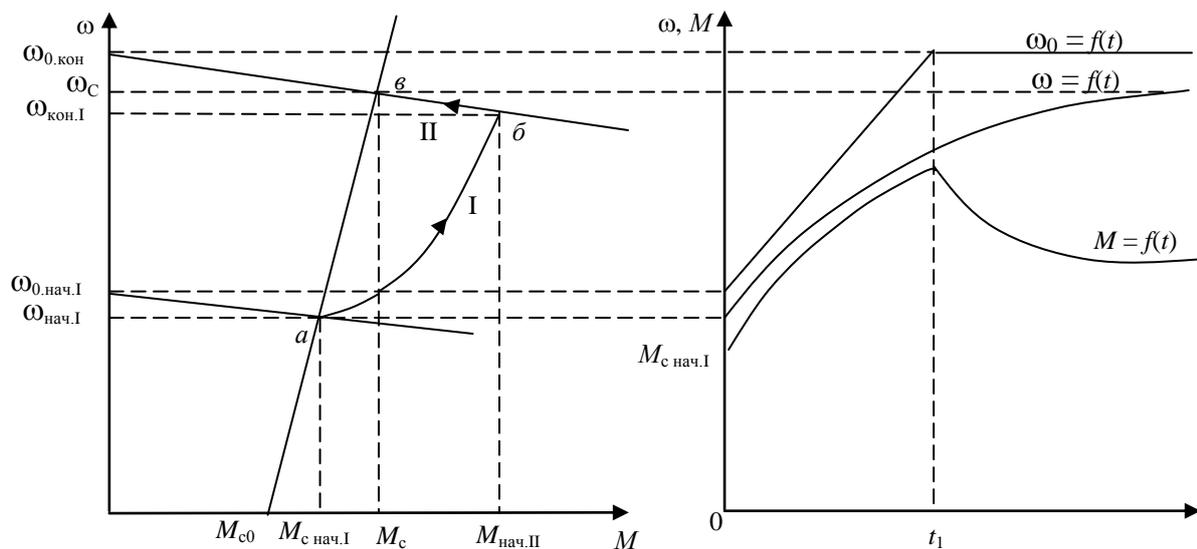


Рисунок 6. Статические характеристики и динамическая характеристика и графики переходных процессов при увеличении скорости привода

В). Торможение системы от начальной скорости $\omega_{нач}$, которую она имела в исходном установившемся режиме работы, до полной остановки представлен на рис. 7. Переходный процесс разбивается на два этапа.

На I-м этапе ($0 \leq t \leq t_2$) ω_0 снижается по линейному закону от $\omega_{0, нач}$ до 0. При торможении ускорение $\varepsilon_0 < 0$ (его рассчитали в самом начале расчёта переходных процессов).

Начальные условия I-го этапа:

$$M_{нач} = M_{нач.I}, \quad \omega_{нач} = \omega_{нач.I}, \quad \varepsilon_{нач} = 0, \quad \varepsilon_0 < 0.$$

Для скорости и момента в функции времени на этом этапе справедливы выражения (8) и (9). Заканчивается этап при $\omega_{0,кон} = 0$, длительность его:

$$t_1 = t_2 = -\frac{\omega_{0,нач}}{\varepsilon_0}.$$

На II этапе ($t > t_2$) переходный процесс протекает при $\omega_0 = 0$. Двигатель работает в режиме динамического торможения. Скорость и момент на данном этапе описываются выражениями (6) и (7). Необходимо отметить, что величины $\omega_{нач}$ и $M_{нач}$, входящие в эти уравнения, определяются координатами точки «б» (см. рис. 7), а ω'_c и M'_c – координатами точки «в» условного установившегося режима. Точка «в» находится в месте пересечения продолжений механических характеристик двигателя и РМ.

Для определения координат точки «в» при моменте $M_c \neq 0$ лучше выполнить построение на миллиметровке, или, что менее точно, на листе в клеточку. Нарисуйте в масштабе механическую характеристику двигателя, проходящую через начало координат, и механизма. Точка их пересечения в четвертом или во втором квадранте даст координаты скорости ω'_c и момента M'_c . Расчёт скорости вращения и электромагнитного момента при торможении на II этапе переходного процесса заканчивают, когда они приблизительно станут равными 0. Далее привод остается неподвижным. Длительность переходного процесса на этом этапе:

$$t_{II} = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{нач} + |\omega'_c|}{|\omega'_c|}$$

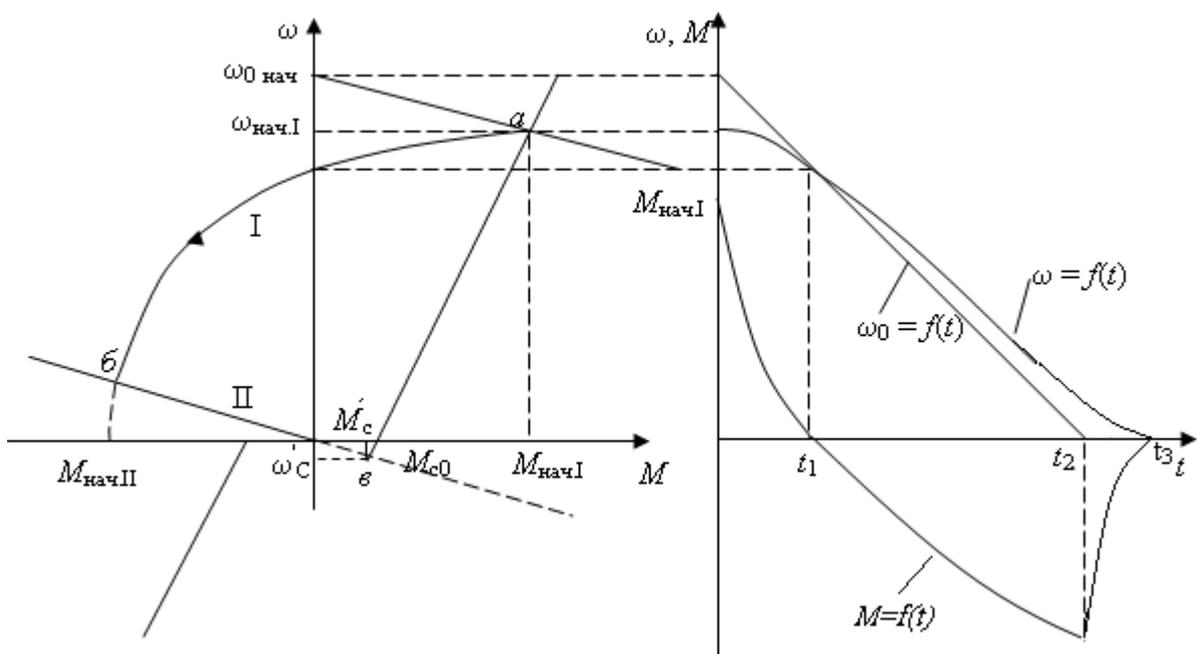


Рисунок 7. Статические и динамическая характеристики, графики переходных процессов при торможении до полной остановки

Г). Снижение скорости системы от начальной скорости исходного установившегося режима до некоторой конечной, ненулевой. Переходный процесс (см. рис. 8) разбивается на два этапа. На I-м этапе ($0 \leq t \leq t_2$) ω_0 снижается от $\omega_{0.нач}$ до $\omega_{0.кон}$ с постоянным замедлением ε_0 . Начальные условия I-го этапа: $\omega_{нач} = \omega_{нач.I}$, $M_{нач} = M_{нач.I}$, $\varepsilon_{нач} = 0$, $\varepsilon_0 < 0$

Начальные условия I-го этапа: $\omega_{нач} = \omega_{нач.I}$, $M_{нач} = M_{нач.I}$, $\varepsilon_{нач} = 0$, $\varepsilon_0 < 0$.

Зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ описываются выражениями (8) и (9). Заканчивается I-й этап при

$$\omega_0 = \omega_{0.кон}, \text{ длительность его: } t_1 = t_2 = \frac{\omega_{0.кон} - \omega_{0.нач}}{\varepsilon_0}.$$

Начальный (исходной) и конечной точками I-го этапа являются соответственно точки «а» и «б» с соответствующими координатами.

На II-м этапе ($t > t_2$) происходит дальнейшее снижение скорости двигателя при работе его с постоянным значением $\omega_0 = \omega_{0.кон}$. Скорость и момент двигателя на данном этапе описываются выражениями (6) и (7). Начальные и установившиеся значения скорости и момента определяются соответственно координатами точек «б» и «в», длительность этапа: $t_{II} = (3 \div 4) T_M$.

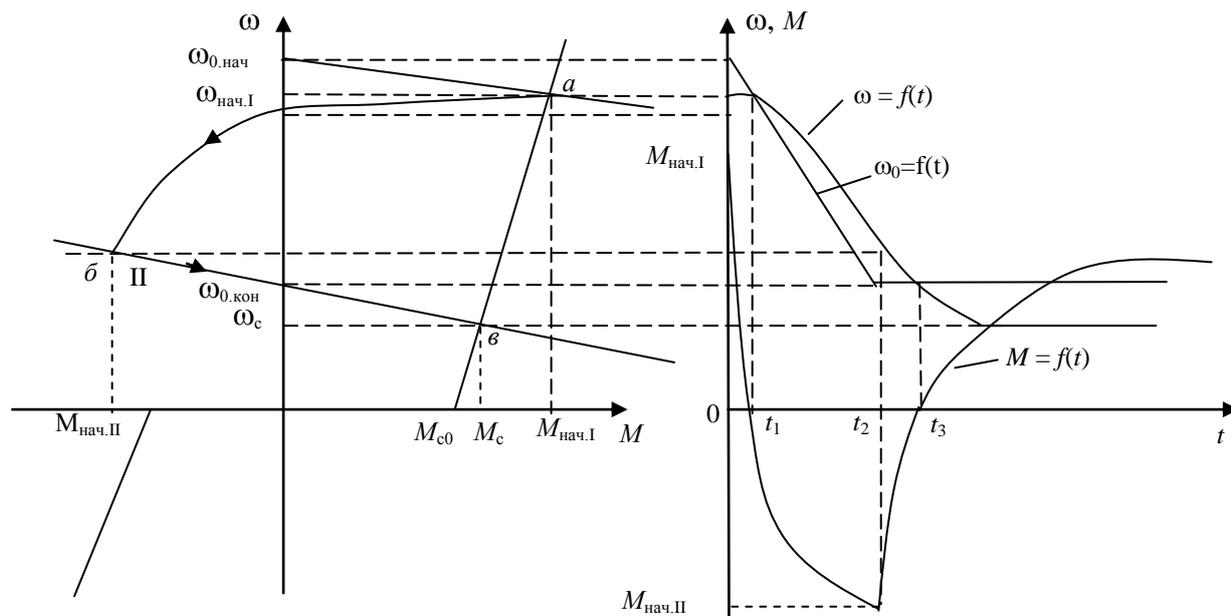


Рисунок 8. Статические и динамические характеристики, и графики переходных процессов при снижении скорости ЭП

Д). Реверс системы. Осуществляется линейным изменением ω_0 от $\omega_{0.нач}$ до $\omega_{0.кон}$ (см. рис. 9) со сменой её знака в процессе изменения.

I-й этап реверса – торможение до нулевой скорости ($0 \leq t \leq t_3$) описан выше. Дальнейший ход переходного процесса определяется соотношением между моментами двигателя и РМ при достижении нулевой скорости в момент времени t_3 .

При $M(0) < M_{с0}$ (этот случай возникает при повышенных значениях $M_{с0}$ и малых значениях ε_0) переходный процесс разгона разбивается на три этапа (рис. 9, а)

а) этап линейного нарастания момента двигателя при нулевой его скорости от значения $M(0)$ до M_{CO} , II-й этап реверса ($t_3 \leq t \leq t_4$);

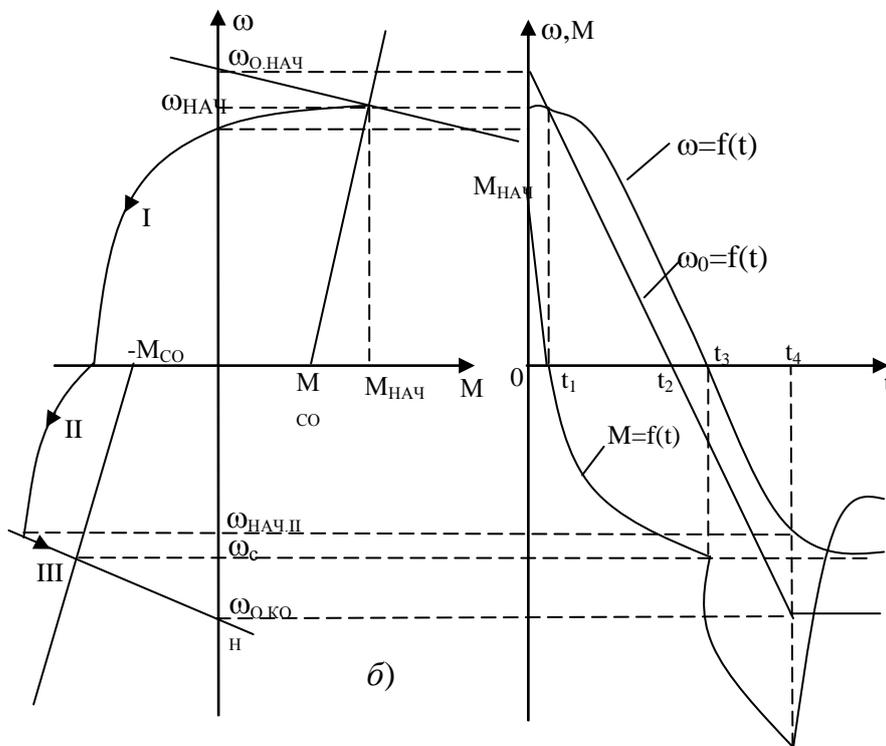
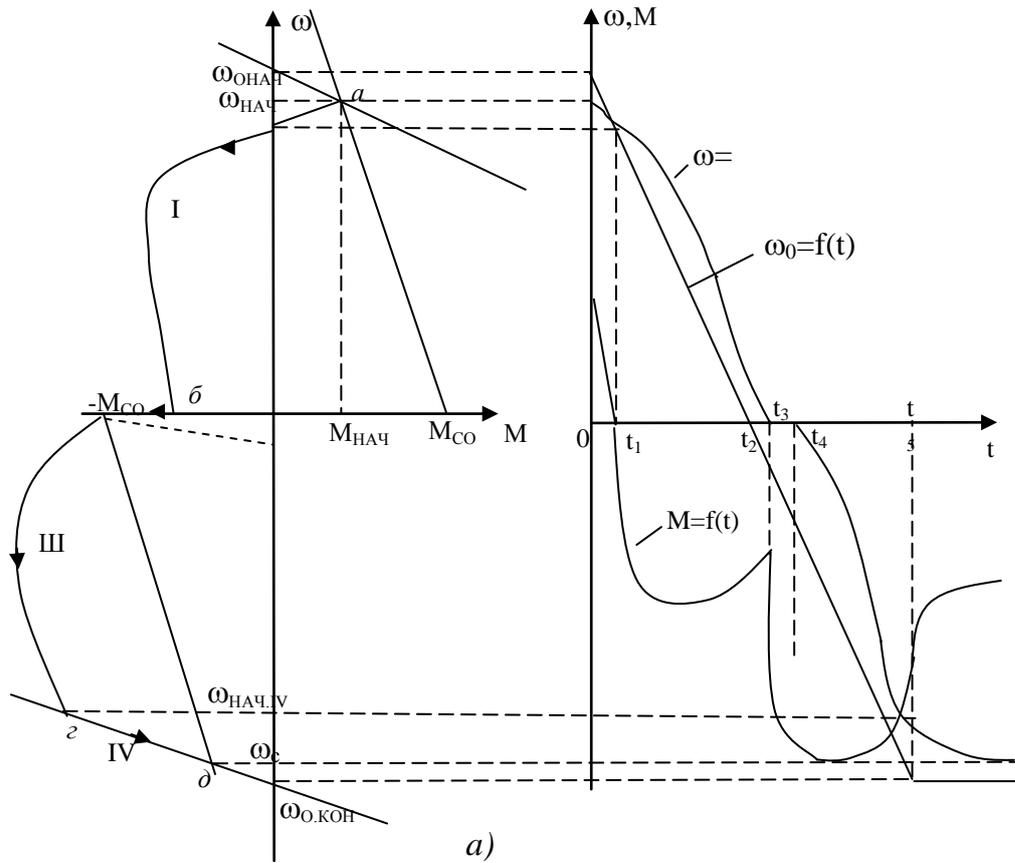


Рисунок 9. Статические, динамические характеристики и графики переходных процессов при реверсе системы: а – при $M < M_{CO}$ ($\omega = 0$); б – при $M > M_{CO}$ ($\omega = 0$)

б) этап разгона при нарастании ω_0 , III-й этап реверса ($t_4 \leq t \leq t_5$); При расчёте применить уравнения (1, 2) или (10, 11).

в) этап разгона при постоянном значении ω_0 , IV-й этап реверса ($t > t_5$). Применить уравнения (6, 7).

$$\text{Длительность II-го этапа: } t_{II} = \frac{M(0) - M_{CO}}{\beta \cdot \varepsilon_0}$$

Определить численное значение $\varepsilon_0 < 0$.

На этом этапе законы изменения скорости и момента:

$$\omega(t) = 0, \quad M(t) = -M(0) - \beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t$$

III-й и IV-й этапы реверса (разгон на отрезке ($t_4 \leq t \leq t_5$) и при $t > t_5$) протекают аналогично описанному в п.1. данного раздела (пуск системы ЭП).

При $M(0) \geq M_{c0}$ (см. рис. 9, б) этап нулевой скорости при разгоне отсутствует. В этом случае переходный процесс разгона разбивается на два этапа:

а) этап разгона при линейном изменении ω_0 во времени (II-й этап реверса, ($t_3 \leq t \leq t_4$);

б) этап разгона при постоянном значении ω_0 (III-й этап реверса, $t > t_4$).

Начальные условия II-го этапа:

$$\omega_{НАЧ} = 0, \quad M_{НАЧ} = -M(0), \quad \varepsilon_{НАЧ} = \frac{M_{НАЧ} - (-M_{CO})}{J}, \quad \varepsilon_0 < 0$$

Скорость и момент на данном этапе описываются выражениями:

$$\omega(t) = \frac{\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t}{\beta - \beta_c} + T_M \left(\varepsilon_{НАЧ} - \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \right) \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right), \quad (10)$$

$$M(t) = M_{НАЧ} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) - T_M \cdot \left(\varepsilon_{НАЧ} - \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \right) \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (11)$$

Длительность II-го этапа:

$$t_{II} = \frac{\omega_{0.КОН} - \omega_{0.НАЧ.II}}{\varepsilon_0},$$

где

$$\omega_{0.НАЧ.II} = -M(0)/\beta.$$

Третий этап протекает аналогично III-му этапу случая, описанного в п. 1 настоящего раздела.

Предпочтительный вариант. Еще одним способом расчёта реверса двигателей будет следующий вариант. Ротор (якорь) двигателя останавливают по способу, предложенному в п. 3 настоящего раздела «Торможение системы от начальной скорости $\omega_{нач}$, которую она имела в исходном установившемся режиме работы, до полной остановки. Затем разгоняют ротор в противоположном направлении (см. 1. Разгон системы из неподвижного состояния). Общее количество этапов переходного процесса при этом будет 5 (см. рис. 10).

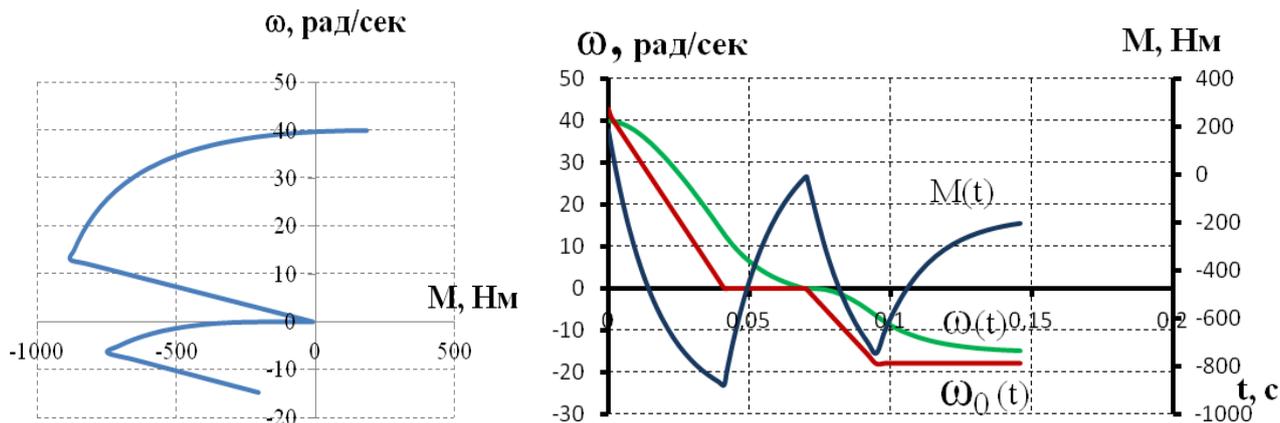


Рисунок 10 Динамические характеристики и графики переходных процессов при реверсе системы

При рассмотрении переходных процессов в зоне отрицательных скоростей можно воспользоваться этой же методикой и этими же формулами расчёта. При этом следует учесть, что скорости (ω и ω_0), ускорения ($\epsilon_{нач}$ и ϵ_0), моменты (двигателя и РМ) будут иметь обратные знаки по сравнению со знаками, которые они имели бы при рассмотрении процесса в зоне положительных скоростей (ускорение будет отрицательно, замедление положительно, движущий момент отрицателен, тормозной положителен и т.д.). Это справедливо как для текущих их значений, так и для значений во всех характерных точках (начальных, установившихся и т.д.). Вместе с этим коэффициенты жесткости β и β_C остаются неизменными. Возможен и другой подход: учитывая, что моменты сопротивления РМ при положительной и отрицательной скоростях одинаковы, расчёт проводят для случая положительных скоростей. Далее – при построении графиков зависимости $\omega(t)$, $M(t)$ – меняют знаки скорости и момента на обратные.

Выводы: После расчёта переходных процессов необходимо оценить быстродействие спроектированной системы, т.е. определить суммарное время переходных процессов $t_{ПП\Sigma}$ и найти его значение в % от времени цикла, где $t_{Ц} = \sum t_{Pi} + t_0 + t_{ПП\Sigma}$ ($\sum t_{Pi}$ – суммарное время работы привода в установившемся режиме), сравнить с заданным быстродействием, определить фактическую ПВ%.

Кроме того, необходимо оценить, не превышает ли максимальные значения момента двигателя в переходных процессах значения $M_{доп}$.

6.4 Комментарии к п. 12 - 24

К п. 12. Двигатель проверяется на нагрев одним из методов, изложенных в работах [1; 2; 4; 21]. При этом необходимо учитывать изменение условий охлаждения при паузах и изменениях скорости, а в случае регулирования скорости потоком возбуждения в диаграмму моментов вводить поправки, которые сделали бы ординаты кривой моментов пропорциональными току.

При проверке двигателя на нагрев по методу эквивалентных величин (тока, мощности, момента) вычисленные эквивалентный ток, момент, мощность следует сравнить с допустимыми по условиям нагрева током, моментом, мощностью, приводимыми в каталогах для номинального ПВ, после пересчета их на фактическую ПВ%, найденную из нагрузочной диаграммы привода.

Ниже приведена методика проверки на нагрев предварительно выбранного двигателя по методу эквивалентного момента. Для проверки необходимо:

1) Выполнить линейризацию построенной в отдельной системе координат кривой $M(t)$ за цикл работы с учетом установившихся режимов стандартными фигурами – треугольник, трапеция, прямоугольник (15-20 фигур).

2) Для каждой стандартной фигуры определить эквивалентный момент $M_{эi}$ или ток $I_{эi}$. При этом

$$M_{эi\Delta} = \sqrt{\frac{M_M^2}{3}}, \quad M_{эi\Delta} = \sqrt{\frac{M_1^2 + M_1M_2 + M_2^2}{3}}, \quad M_{эi\Box} = M_{ci},$$

где M_M, M_1, M_2 – максимальные значения моментов в треугольниках и трапециях.

Аналогично можно определить значения эквивалентных токов якоря для МПТ или тока ротора для АД.

3) Определить эквивалентный момент за цикл:

$$M'_{э} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_{эi}^2 \cdot t_i}{t_{\text{ПП.}\Sigma} \cdot \alpha + t'_1 \cdot \beta_1 + t'_2 \cdot \beta_2 + t'_3 \cdot \beta_3}},$$

где t_i – отрезок времени, на который опирается i -я стандартная фигура; n – число этих фигур;

$t_{\text{ПП.}\Sigma}$ – суммарное время переходных процессов за цикл;

α и β_i – коэффициенты учитывающие ухудшение (улучшение) условий охлаждения двигателя в переходных процессах и в статических режимах работы при $\omega_{ci} \neq \omega_H$;

t'_i – время работы привода в i -м установившемся режиме (см. тахограмму двигателя)

$$\alpha = \frac{1 + \beta_0}{2}; \quad \beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \frac{\omega_{ci}}{\omega_H},$$

где β_0 – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателя во время паузы.

Для двигателей закрытого исполнения с естественным охлаждением или самовентиляцией принимают $\beta_0 \approx 0,5$.

- 4) Определить фактическую продолжительность включения:

$$ПВ\%_{\phi} = \frac{\sum t'_i + t_{III,\Sigma}}{\sum t'_i + t_{III,\Sigma} + t_0}.$$

- 5) Пересчитать найденное значение M'_ϕ на номинальную продолжительность включения:

$$M_{\phi} = M'_{\phi} \sqrt{\frac{(1+a) \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot [\varepsilon_H + \beta_0 \cdot (1 - \varepsilon_H)]}{\varepsilon_H \cdot [\varepsilon_{\phi} + \beta_0 \cdot (1 - \varepsilon_{\phi})]}} - a,$$

где ε_{ϕ} , ε_H , a – относительные продолжительности включения и коэффициент постоянных потерь мощности.

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{ПВ\%_{\phi}}{100}, \quad \varepsilon_H = \frac{ПВ\%_H}{100}, \quad a = \frac{k_H}{V_H},$$

где k_H , V_H – номинальные постоянные и переменные потери мощности [1, с. 345]. Формула действительна для двигателей с естественным охлаждением и самовентиляцией.

- б) Проверить предварительно выбранный двигатель на нагрев.

Условие проверки: $M_{\phi} \leq M_H$. Если $M_{\phi} < M_H$ более, чем на (10-15)%, то можно предполагать, что первоначально выбранный двигатель по мощности завышен. В этом случае нужно сделать дополнительную проверку по условию:

$$|M_{\phi} - M_H| < |M_H - M_{H2}|,$$

где M_{H2} – номинальный электромагнитный момент второго двигателя ближайшей меньшей мощности.

Ранее выбранный двигатель был проверен на перегрузочную способность. Если выбранный двигатель удовлетворяет условиям выполняемых проверок, то его следует рекомендовать к внедрению.

Если двигатель по нагреву не подходит, необходимо или снизить интенсивность переходных процессов (при этом увеличится их длительность и уменьшится производительность РМ), или взять двигатель большей мощности и повторить расчёты.

При проверке двигателей переменного тока по перегрузочной способности обязательно следует учитывать возможное снижение напряжения питающей сети (на 10%).

К п. 13. Для построения структурной схемы электропривода двигателя постоянного тока независимого возбуждения необходимо написать уравнение динамической механической характеристики этого двигателя совместно с уравнением движения в операторной форме в

предположении жестких механических связей и с учетом ЭДС управляемого преобразователя и его передаточной функции.

Структурная схема электропривода с асинхронным двигателем должна быть построена для области рабочих скольжений также на основании уравнения динамической механической характеристики, записанного в операторной форме.

При составлении структурных схем можно воспользоваться уравнением динамической механической характеристики, а также уравнениями обобщенной линеаризованной системы УП–Д [1], подставив в них параметры T_Σ , T_Π и β , соответствующие заданной системе электропривода. Примеры структурных схем обобщенной линеаризованной системы УП–Д приведены в [1, с. 427-454].

На приведенных в проекте структурных схемах **указать численные значения** входящих в них величин.

К п. 14. Точность поддержания скорости привода в установившемся режиме работы (статическая ошибка по скорости) определяется по соотношению:

$$\delta\% = \frac{\omega_{0P} - \omega_c(M_C)}{\omega_{0P}} \cdot 100\% = \frac{\Delta\omega_c(M_C)}{\omega_{0P}},$$

где ω_{0P} , $\omega_c(M_C)$, $\Delta\omega_c(M_C)$ – скорость идеального х.х., статическая скорость и статическое падение скорости вращения при $M = M_H$ **на i -ой регулировочной характеристике.**

К п. 15. При выборе замкнутой системы рекомендуется принимать систему с подчиненным регулированием координат. Выполнить поставленные в задании требования помогает применение стандартных настроек. Поскольку на практике чаще всего используется стандартная настройка на технический оптимум, когда соотношение постоянных времени контуров регулирования $a = 2$, в курсовом проекте также рекомендуется контур скорости настраивать на технический оптимум. При отсутствии такой возможности последовательную коррекцию нужно дополнить параллельной.

При питании двигателя постоянного тока в разомкнутой системе от тиристорного преобразователя рекомендуется применить замкнутую систему ТП–Д с подчиненным контуром регулирования тока и внешним контуром регулирования скорости (рис. 15).

При частотном управлении асинхронным двигателем может быть использована система частотного регулирования момента с автономным инвертором напряжения (АИН), дополненная отрицательной обратной связью по скорости. Структурная схема системы представлена (см. рис. 16, а), где $W_{pc}(p) = K_{pc}/(T_\Phi p + 1)$ – передаточная функция пропорционального регулятора скорости, причем в ней учтена малая постоянная времени T_Φ фильтра в цепи обратной связи по скорости. Принципиальная блок-схема изображена на рис. 16, б.

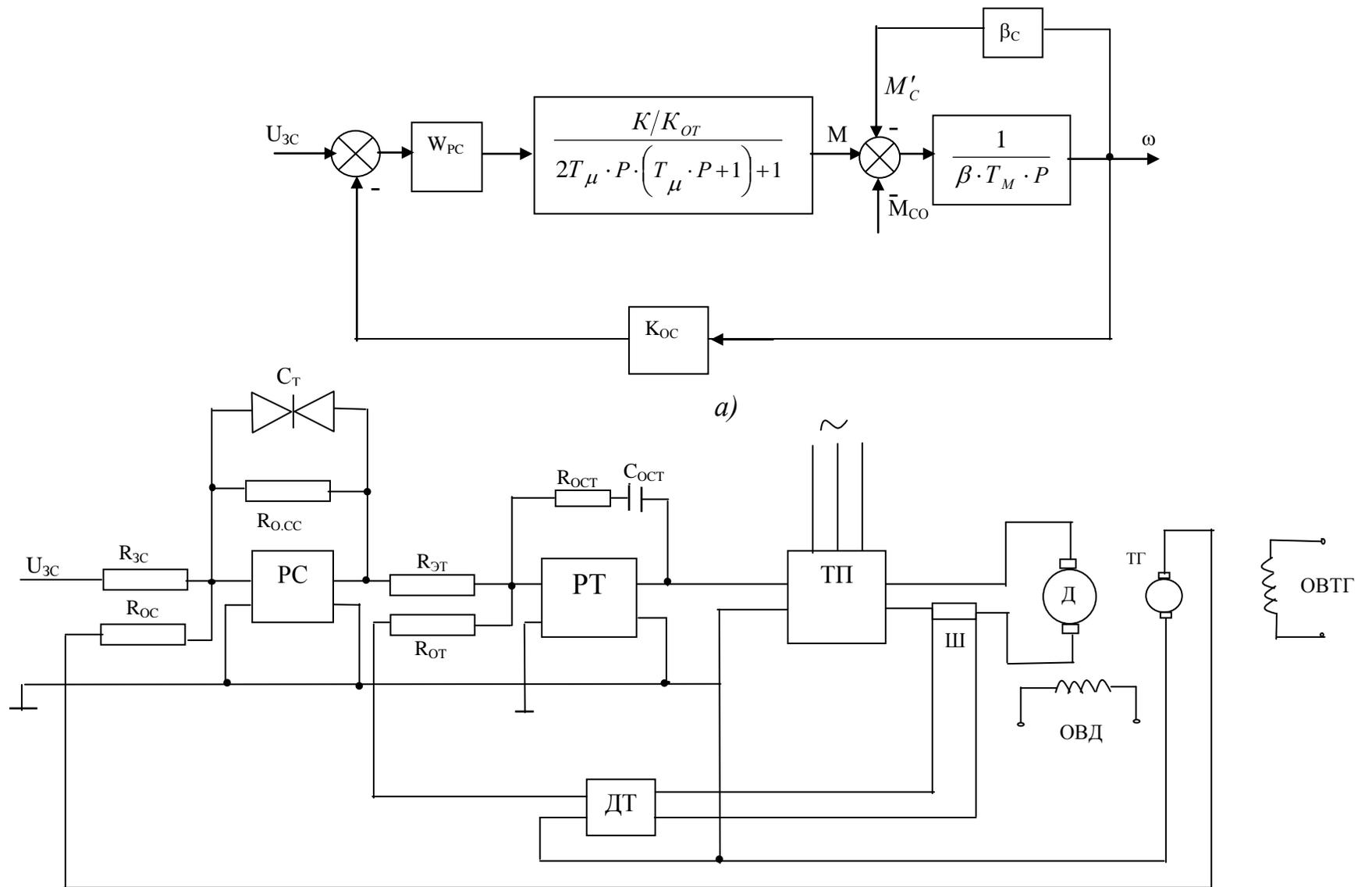


Рисунок 15. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы системы ТП–Д с подчиненным контуром регулирования тока и внешним контуром регулирования скорости

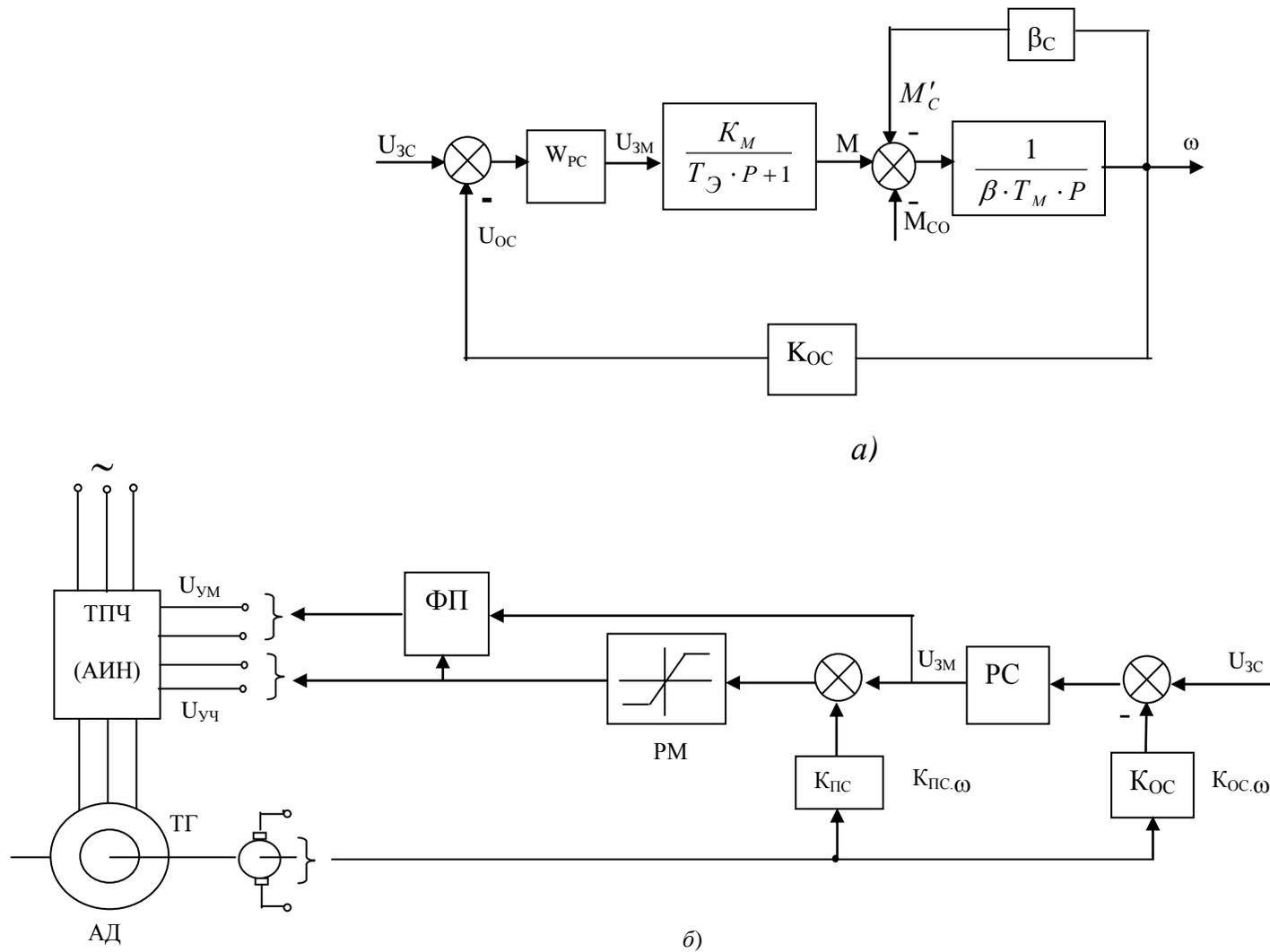


Рисунок 16. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы системы ПЧ–АД с автономным инвертором напряжения

К п. 16. При синтезе замкнутой системы, настраиваемой на технический оптимум методом последовательной коррекции, должны быть определены желаемая передаточная функция разомкнутой системы $W_{раз}(p)$, передаточная функция объекта регулирования $W_{op}(p)$, включающая в себя управляемый преобразователь, двигатель и механическую часть электропривода, характеризующую суммарным приведенным моментом инерции J , а также передаточная функция регулятора (скорости, тока): $W_p(p) = W_{раз}(p)/W_{op}(p)$.

Эти передаточные функции могут быть найдены по формулам, приведенным в работе [1], там же показано, как определить тип требуемого регулятора.

Для системы УП–Д и, следовательно, ТП–Д, желаемые передаточные функции разомкнутых контуров регулирования скорости и тока определяются по формулам:

$$W_{PA3.C}(p) = \frac{1/K_{OC}}{4 \cdot T_{\mu} p \cdot (2 \cdot T_{\mu} p + 1)}, \quad W_{PA3.T}(p) = \frac{1/K_{OT}}{2 \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)}.$$

Передаточные функции объектов регулирования тока и скорости имеют вид [1, с. 467, 528]:

$$W_{OP.C}(p) = \frac{k\Phi_H / K_{OT}}{T_M p \cdot \beta \cdot (2 \cdot T_{\mu} p + 1)}, \quad W_{OP.T}(p) = \frac{k_{\Pi} / R_{я\Sigma}}{(T_{\mu} p + 1) \cdot (T_{я} p + 1)},$$

где k_{Π} – коэффициент усиления преобразователя,

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta E_{\Pi}}{\Delta U_{\gamma}} \approx \frac{U_{\Pi H}}{U_{\gamma H}} = const, \quad U_{\gamma H} = 12 \text{ В};$$

T_{μ} – малая некомпенсированная постоянная; $T_{\mu} = (0,005 \div 0,01) \text{ с}$;

$R_{я\Sigma}$ – суммарное сопротивление якорной цепи (цепи выпрямленного тока);

T_M – электромеханическая постоянная электропривода;

β – жесткость естественной характеристики двигателя;

$k\Phi$ – коэффициент ЭДС двигателя;

K_{OC} , K_{OT} – коэффициенты обратной связи по скорости и току.

Передаточные функции регуляторов тока и скорости определяют по формулам:

$$W_{PT}(p) = \frac{W_{PA3.T}(p)}{W_{OP.T}(p)} = \frac{(T_{я} p + 1) \cdot R_{я\Sigma}}{2 \cdot T_{\mu} p \cdot K_{OT} \cdot K_{\Pi}} = \frac{T_{я} p + 1}{T_{\Pi} p},$$

здесь $T_{\Pi} = (K_{OT} \cdot K_{\Pi} \cdot 2 \cdot T_{\mu}) / R_{я\Sigma}$ – постоянная интегрирования ПИ-регулятора, т.е. необходим ПИ-регулятор,

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{PA3.C}(p)}{W_{OP.C}(p)} = \frac{K_{OT} \cdot \beta \cdot T_M}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{OC} \cdot k\Phi_H} = K_{PC}.$$

В этом случае необходим П-регулятор скорости с коэффициентом K_{PC} .

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{OC} = \frac{U_{3С.М}}{\omega_{03.М}},$$

где $\omega_{03.М}$ – скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая наибольшей заданной установившейся скорости.

В системе ПЧ–АД с замкнутым контуром регулирования скорости передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{PA3.C}(p)}{W_{OP.C}(p)} = \frac{K_{OM} \cdot \beta \cdot T_M}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{OC}}, \quad K_{OM} \approx \frac{M_H}{12},$$

где K_{OM} – коэффициент обратной связи по моменту.

К п. 17. Для уменьшения объема расчётов замкнутой системы электропривода расчёт параметров предлагается выполнить только для регулятора скорости, ориентируясь на пример 7.1 и 7.2 в работе [1]. Напряжение задания скорости $U_{ЗС.М}$, соответствующее наибольшей заданной установившейся скорости, принять равным 12 В. Напряжения, соответствующие двум другим установившимся скоростям, должны быть пропорционально уменьшены.

Коэффициент усиления тахогенератора $k_{ТГ}$ определяют, выбрав по справочнику тахогенератор постоянного тока, например типа ТНГ. При затруднениях принять $k_{ТГ} = 0,5$ В·с.

Коэффициент усиления регулятора скорости при настройке токового контура и контура скорости на технический оптимум ($a_T = 2, a_c = 2$)

$$K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot \beta \cdot T_M}{a_T \cdot a_c \cdot T_\mu \cdot K_{OC} \cdot k\Phi_H} = \frac{K_{OT} \cdot \beta \cdot T_M}{4 \cdot T_\mu \cdot K_{OC} \cdot k\Phi_H}$$

здесь K_{OT} – коэффициент обратной связи по току. Его можно определить, зная параметры датчика тока и шунта, включенного в цепь якоря двигателя. В курсовом проекте предлагается коэффициент датчика тока $K_{ДТ}$ принять равным 50, **ток шунта** – равным **двойному** номинальному току двигателя и считать напряжение на шунте $U_{ш}$ при этом токе равным 75 мВ (0,075 В). Тогда

$$K_{OT} = K_{ш} \cdot K_{ДТ} \cdot \frac{R_{ЗТ}}{R_{OT}} = \frac{U_{ш}}{I_{ш}} \cdot K_{ДТ} \cdot \frac{R_{ЗТ}}{R_{OT}}$$

Приняв $R_{ЗТ} = R_{OT}$ (см. схему), получаем:

$$K_{OT} = \frac{U_{ш}}{I_{ш}} \cdot K_{ДТ} = \frac{0,075}{2 \cdot I_H} \cdot K_{ДТ}, \quad K_{ДТ} = 50.$$

Задавшись далее $R_{OCC} = 100 \text{кОм}$, определяем

$$R_{ЗТ} = \frac{R_{OCC}}{K_{PC}}$$

Затем определяем ЭДС тахогенератора при $\omega = \omega_{ОЗ.М}$:

$$E_{ТГ.М} = K_{ТГ} \cdot \omega_{ОЗ.М}, \quad K_{ТГ} = 0,5.$$

Необходимое сопротивление:

$$R_{OC} = \frac{R_{ЗС} \cdot E_{ТГ.М}}{U_{ЗС.М}}$$

К п. 18. Расчёт статических механических характеристик в замкнутых системах УП–Д (при настройке контура регулирования скорости и подчиненного контура регулирования тока (момента) на технический оптимум можно выполнить по приведенным ниже уравнениям.

Для системы ТП–Д:

$$\omega = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{4 \cdot T_\mu}{T_M \cdot \beta} \cdot M = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{4 \cdot T_\mu \cdot k\Phi_H}{T_M \cdot \beta} \cdot I_{Я} = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{M}{\beta_3} = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{k\Phi_H \cdot I_{Я}}{\beta_3},$$

где $\beta_3 = \frac{T_M \cdot \beta}{4 \cdot T_\mu}$ – модуль жесткости статической механической характеристики замкнутой системы;

β – модуль жесткости естественной характеристики двигателя.

Для системы ПЧ–АД

$$\omega = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{M}{\beta_3} = \frac{U_{ЗС}}{K_{OC}} - \frac{2 \cdot M \cdot T_\mu}{\beta \cdot T_M}; \quad \beta_3 = \frac{T_M \cdot \beta}{2 \cdot T_\mu}$$

Примеры расчётов статических механических характеристик в замкнутых системах приведены в работах [1, 2].

К п. 19. Анализ динамических качеств замкнутой системы необходим для проверки соответствия качества динамических процессов заданным. Определяют установившуюся динамическую ошибку и суммируют её со статической ошибкой, т.е. находят $\Delta\omega_{\Sigma 3} = \Delta\omega_{C3} + \Delta\omega_{Д3}$. Установившаяся динамическая ошибка $\Delta\omega_{Д3} = 4 \cdot T_{\mu} \cdot \varepsilon_o$. Статическая ошибка по скорости в замкнутой системе $\Delta\omega_{C3} = M_c / \beta_3$.

Время I-го согласования текущего и установившегося значения скорости находится по выражению $t = 4,7 \cdot T_{\mu}$ или определяется по кривой $\omega(t)$ при пуске вхолостую. Перерегулирование по скорости при пуске вхолостую также находится по кривой $\omega(t)$ или определяется по соотношению:

$$\Delta\omega_M = 0,043 \cdot (\omega_{O3.M} - \omega_{НАЧ}),$$

где $\omega_{НАЧ} = \omega_{O3.M} - M_c / \beta_3$.

К п. 20. Составить принципиальные схемы разомкнутой и замкнутой систем. На них следует показать питающий трансформатор (при наличии такового), вентильный преобразователь со всеми основными элементами, электродвигатель, датчики и регуляторы тока (момента) и скорости. Систему управления вентилями преобразователя приводить не следует (условно она может быть изображена прямоугольниками).

К п. 21. Расчёт энергетики выполнить для спроектированной разомкнутой системы электропривода. Для этого необходимо определить:

- а) полезно затраченную энергию и потери за цикл в установившихся режимах работы – W_y и ΔW_y ;
- б) общий расход энергии за цикл, час, год – $W_{ц}$, $W_{ч}$, $W_{г}$. Расход электроэнергии за год $W_{г}$ 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 – $\Delta W_{д}$ и $\Delta W_{п}$ (показать отдельно);
- г) отношение суммарных потерь энергии за цикл к общему расходу энергии, % – $\Delta W_{ц} / W_y$;
- д) КПД и коэффициент мощности электропривода в каждом установившемся режиме работы, а также потребление реактивной энергии за цикл.

Независимо от типа проектируемой системы электропривода 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 ($tg \varphi_i$ определяется по найденному коэффициенту мощности $\cos \varphi_i$ (см. далее)).

Примечание: в системе ТПД-Ч 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:

$$W_{\text{ц}} = W_y + \Delta W_y + \Delta W_{\text{ТП}} - W_c.$$

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

$$W_y = \sum_1^n M_{ci} \cdot \omega_{ci} \cdot t_{pi}, \text{ Вм} \cdot \text{с}.$$

Расчёт потерь энергии и энергетических показателей в установившихся режимах работы.

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

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

Потери энергии в двигателе определяются по уравнению [1, с. 338]

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

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.

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

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

Потери энергии в ТП [1, с. 346]:

$$\Delta W_{\text{ТП}} = \sum_1^n \left[\Delta P_{\text{ХХ}} + (\Delta P_{\text{КЗ}} + \Delta P_{\text{РН}}) \cdot \left(\frac{I_{ci}}{I_{\text{НП}}} \right)^2 + \Delta P_T \cdot \frac{I_{ci}}{I_{\text{НП}}} \right] \cdot t_{pi}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{ХХ}}$, $\Delta P_{\text{КЗ}}$, $\Delta P_{\text{РН}}$, ΔP_T – соответственно потери мощности х.х. и к.з. согласующего трансформатора (токоограничивающих реакторов), потери при номинальном токе якоря в реакторах (уравнительных и сглаживающих дросселях), а также в тиристорах;

$I_{\text{НП}}$ – номинальный ток преобразователя.

$$\Delta P_{\text{РН}} = \Delta P_{\text{уд}} + \Delta P_{\text{сд}}; \quad \Delta P_{\text{уд}} = I_H^2 \cdot R_{\text{уд}}; \quad \Delta P_{\text{сд}} = I_H^2 \cdot R_{\text{сд}},$$

здесь I_H – номинальные токи уравнительных 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:

$$\cos \varphi_i \approx \frac{U_{di}}{E_{do} \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ИТ}}^2} + 0,15 \frac{I_H}{I_{ci}} \sqrt{1 - \frac{U_{di}^2}{E_{do}^2}}}},$$

где U_{di} , $K_{пт}$, I_H – напряжение на якоре двигателя в i -м режиме работы; коэффициент искажения тока; номинальный ток двигателя: $U_{di} = \dot{A}_{do} \cdot \cos \alpha_i$, $K_{\dot{e}0} \approx 0,78$ (при $m = 6$).

Система ПЧ–АД. Потери энергии в АД и ПЧ в установившемся режиме $\Delta W_y = \Delta W_{АД} + \Delta W_{ПЧ}$.

Потери энергии в асинхронном двигателе [1, с. 346]:

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

где ΔP_{MH} – механические потери при номинальной скорости $\Delta P_{MH} = K_H - \Delta P_{C1H} - 3 \cdot I_{\mu H}^2 \cdot R_1$;

ΔP_{C1H} – потери в стали статора при номинальной частоте;

$$I_{\mu H} - \text{номинальный ток намагничивания } I_{\mu H} \approx I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_H + \sqrt{\lambda_H^2 - 1}} \right); \quad (4)$$

ω_{opi} – скорость идеального х.х. при работе двигателя на регулировочной характеристике, соответствующей i -му установившемуся режиму;

$$s_i - \text{скольжение двигателя, соответствующее этому режиму } s_i = \frac{\omega_{opi} - \omega_{ci}}{\omega_{opi}}.$$

Постоянные потери мощности в двигателе

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

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

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

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

здесь S_H – номинальная полная мощность, потребляемая ПЧ из сети;

X_i – коэффициент загрузки ПЧ по току, $X_i = I_{ii} / I_{нп}$; где $I_{ii}, I_{нп}$ – ток статора и номинальный ток ПЧ, двигателя при работе с установившейся скоростью в i -м режиме.

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

Приведенный ток ротора при работе с установившейся скоростью.

$$I_{2i}' = \sqrt{\frac{M_{ci} \cdot \omega_{opi} \cdot s_i}{3 \cdot R_2'}}$$

При отсутствии в паспортных данных ПЧ сведений об энергетических показателях принять $\cos \varphi_H = 0,85 \div 0,87$, $\eta_H = 0,87 \div 0,9$.

К п. 22. Затраты на электроэнергию рассчитать по её годовому расходу W_r и стоимости электроэнергии руб./кВт ч.

К п. 23. При составлении заключения о рациональности спроектированной системы электропривода для заданной рабочей машины и заданных условий рекомендуется привести таблицу, отражающую все основные его показатели: время переходных процессов (пуска, торможения, реверса), статическую ошибку по скорости $\delta\%$, динамическую ошибку по скорости,

перерегулирование, время i -го согласования, расход энергии за час работы и потери энергии за час в процентах от потребленной энергии.

В заключение работы сравнить технические показатели спроектированного электропривода с предъявляемыми к нему требованиями и сделать вывод о целесообразности внедрения его для привода рабочей машины.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица П.1 Допустимые нагрузки краново-металлургических двигателей серии Д, закрытых с естественным охлаждением параллельного возбуждения без стабилизирующей обмотки

Тип двигателя	ПВ = 15%			ПВ = 25%			ПВ _н = 40%			ПВ = 60%			М _{доп} , Н·м
	Р _{доп} , кВт	I _{доп} , А	n _н , об/мин	Р _{доп} , кВт	I _{доп} , А	n _н , об/мин	Р _н , кВт	I _н , А	n _н , об/мин	Р _{доп} , кВт	I _{доп} , А	n _н , об/мин	
Тихоходные, U _н = 220В													
Д12	3,6	22	1100	3	17	1100	2,4	14	1230	2,5	11	1230	57
Д21	5,2	32	980	4,5	26	980	3,6	20,5	1080	2,9	16	1100	90
Д22	7,2	14	1070	6	33	1030	4,8	26	1150	3,6	20	1140	108
Д31	10,5	60	810	8,5	47	800	6,8	37	880	5,4	29	870	201
Д32	14,5	82	740	12	65	730	9,5	51	800	7,5	39	790	319
Д41	19	105	680	16	85	660	13	69,5	720	9,5	50	720	476
Д806	24,5	130	680	20	104	695	16	84	710	12	62	705	678
Д808	37	190	605	30	150	610	22	112	630	17	85	625	1290
Д810	50	255	580	40	205	585	29	148	600	22,5	115	590	1915
Д812	66,5	335	535	53,5	270	540	38	192	565	28,5	145	560	2800
Д814	100	495	540	80	395	545	55	280	560	38,5	96	550	4270
Д816	125	620	525	97	480	525	70	350	535	47	240	530	6040
Д818	165	820	460	130	650	460	83	415	470	58	292	465	7950
Тихоходные, U _н = 440В													
Д21	4,7	15	1200	4	12	1190	3,1	9,5	1300	2,5	7,5	1310	54
Д31	8,6	26	845	7	20	830	5,2	14,5	910	4,3	12,5	900	128
Д41	18	50	685	15	40	670	12,5	34	720	9	23,5	725	349
Д808	37	95	605	30	75	610	22	56	630	11	42,5	625	1030
Д810	50	127	580	40	102	585	29	74	590	22,5	57	590	1511
Д812	63	160	540	51	130	545	36	92	560	27	70	565	2060
Д814	100	246	540	80	196	545	55	138	550	38,5	98	550	3390
Д816	125	310	525	97	240	525	70	175	530	47	120	530	4760
Д818	165	410	460	130	325	460	83	205	460	58	146	465	6370
Быстроходные двигатели, U _н = 220 В													
Д21	6,8	39	1370	5,5	31	1360	4,4	24,5	1500	3,4	19	1500	79
Д22	10	56	1480	8	44	1430	6,5	34	1570	5	28	1520	119
Д31	15	82	1320	12	64	1300	9,5	50,5	1420	7	38	1410	183
Д32	20	106	1180	16	84	1130	13	68	1240	10	52	1200	305
Д41	27	140	1090	22	114	1060	17,5	90,5	1160	13	68	1130	438
Д806	33	170	1050	27,5	140	1050	21	110	1060	15	80	1050	645
Д808	43	220	790	35	175	800	26	134	825	19	96	815	1180
Быстроходные двигатели, U _н = 440 В													
Д22	9	25	1480	7	20	1420	5,6	15,5	1550	4	12	1520	79
Д32	19	50	1200	15	40	1160	12	31,5	1240	9	25	1240	235
Д806	33	85	1050	27,5	70	1050	21	55	1060	15	40	1050	510

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица П.2 Основные обмоточные данные краново-металлургических двигателей серии Д

Тип двигателя	U_H , В	N	2а	w_B	Φ_H , мВб	I_{BH} , А	$R_{я} + R_{доп}$, Ом	R_{OB} , Ом	$n_{МАКС}$, об/мин	J_D , кг*м ²
Тихоходные										
Д12	220	990	2	1800	4,6	0,65	1,63	260	3600	0,05
Д21	220	920	2	1650	5,8	1,24	0,95	128	3600	0,125
Д21	440	1610	2	1650	5,6	1,24	3,54	128	3600	0,125
Д22	220	696	2	1480	7,4	1,18	0,57	130	3600	0,155
Д31	440	1476	2	1700	8,8	1,42	2,08	107	3600	0,3
Д31	220	738	2	1700	8,8	1,42	0,42	107	3600	0,3
Д32	220	558	2	1470	13,2	1,6	0,28	94	3300	0,425
Д41	220	492	2	1480	17	2,2	0,17	70	3000	0,8
Д41	440	984	2	1480	17	2,2	0,695	70	3000	0,8
Д806	220	372	2	1400	25	2,7	0,1085	65	2600	1,0
Д808	220	278	2	1250	38	3,93	0,054	44,4	2300	2,0
Д808	440	556	2	1250	38,6	3,93	0,210	44,4	2300	2,0
Д810	220	234	2	1500	47,5	3,85	0,0356	46,2	2200	3,625
Д810	440	468	2	1500	46,8	3,85	0,146	46,2	2200	3,625
Д812	440	418	2	1350	57,3	5,1	0,099	34,4	1900	7,0
Д812	220	210	2	1350	57,2	5,1	0,023	34,4	1900	7,0
Д814	220	608	8	1200	82,1	6,25	0,0129	35,2	1700	10,25
Д814	440	1216	8	1200	82,1	6,25	0,052	34	1700	10,25
Д816	220	504	8	1160	104	7,44	0,084	24,7	1600	16,25
Д816	440	1008	8	1060	102,5	7,44	0,0324	24,7	1600	16,25
Д818	220	504	8	1000	111	10,2	0,0066	17,3	1500	27,5
Д818	440	1008	8	1000	111,5	10,2	0,026	17,3	1500	27,5
Быстроходные										
Д21	220	690	2	1650	5,8	1,24	0,531	128	3600	0,125
Д22	220	522	2	1480	7,45	1,18	0,322	130	3600	0,155
Д22	440	1044	2	1145	7,45	3,6	1,69	42	3600	0,155
Д31	220	492	2	1700	8,8	1,42	0,194	107	3600	0,3
Д32	220	372	2	1470	13,2	1,6	0,125	94	3300	0,425
Д32	440	738	2	1140	13,2	4,3	0,534	36	3300	0,425
Д41	220	310	2	1480	17	2,16	0,072	70	3000	0,8
Д806	220	246	2	1400	25	2,7	0,047	65	2600	1,0
Д806	440	492	2	1400	25	2,7	0,205	65	2600	1,0
Д808	220	210	2	1250	37,2	3,9	0,0295	44,4	2300	2,0

Примечание: Двигатели допускают увеличение скорости вращения в 2 раза за счет ослабления магнитного потока. При этой скорости максимальный момент не должен превышать $0,8 \cdot M_{доп}$ при $U_H = 220$ В и $0,64 \cdot M_H$ при $U_H = 440$ В. Сопротивления обмоток даны при $t_{OC} = 20^{\circ}C$; рабочая температура обмоток $t_{нагр} = 115^{\circ}C$; число пар полюсов $p_{II} = 2$.

Для обмоток и коллектора применена электрическая изоляция нагревостойкости класса Н. Расчётная рабочая температура обмоток с учётом запаса по нагреву принимается $115^{\circ}C$.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица П.3 Технические данные металлургических асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии МТКН, $U_H = 380/220$ В, ПВ% $_H = 40\%$ закрытое обдуваемое исполнение

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	22	15	30	22	28	37
ω_H 1/с	95,3	94,25	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	71,5	73	77,5	73,5	81	78	82,5	80	83,5	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
<u>Статор</u>													
I_{IH} А	9,6	12,8	20,8	28,4	21,9	36,1	29	51	40	70	60	67	87
I_{XX} А	8	9,6	14,4	20	16	30	28	31	26	42	43	39	45
R_1 Ом	262	161	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	114	0,88	0,64	0,84	0,43	0,53	0,27	0,51	0,2	0,31	0,23	0,17
<u>Ротор</u>													
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	101	0,48	0,64	0,33	0,51	0,24	0,33	0,31	0,24
X'_2 Ом	143	112	0,88	0,56	0,65	0,36	0,42	0,35	0,41	0,25	0,27	0,46	0,37
K_r (* 10^4)	303	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	1,075	1,425

Примечание: Сопротивления обмотки даны в нагретом состоянии, $\omega_{\max} = 2,5\omega_0$.

Таблица П.4 Технические данные крановых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии МТКФ, $U_H = 380/220$ В, ПВ% $_H = 40\%$ закрытое обдуваемое исполнение

Параметр	011-6	012-6	111-6	112-6	211-6	311-6	312-6	311-8	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	92,15	92,7	93,7	92,15	95,3	97,4	72,25	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 %	61,5	67	72	74	75,5	77,5	81	73,5	78	82,5	83,5	80	80,5
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
<u>Статор</u>													
I_{IH} А	5,3	7,2	9,4	14	20	28	36	22	29	51	80	40	60
I_{XX} 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 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
<u>Ротор</u>													
I'_{2H} А	3,27	4,87	7,5	11,3	16,1	23	31	15	21,4	45,4	53,5	32,6	43,2
R'_2 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 Ом	3,17	2,32	1,65	1,12	1,02	0,56	0,36	0,65	0,42	0,35	0,25	0,41	0,28
K_r (* 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 кг·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, $\omega_{\max} = 2,5\omega_0$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица П.5. Технические данные АД с короткозамкнутым ротором 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
4АС160	20,0	0,87	0,87	2,2	5,3	3,6	0,037	0,072	0,055	0,13	0,13
4АС180	21,0	0,86	0,92	2,2	5,7	4,2	0,044	0,086	0,059	0,11	0,19
4АС180	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	0,11	1,00
4АС250	63,0	0,870	0,93	2,2	6,4	3,9	0,019	0,070	0,069	0,12	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
4АС132	8,5	0,80	0,80	2,1	5,8	2,0	0,062	0,073	0,076	0,12	0,058
4АС160	12,0	0,825	0,85	2,1	7,7	2,5	0,065	0,092	0,087	0,10	0,14
4АС160	16,0	0,84	0,85	2,1	7,8	3,1	0,060	0,098	0,093	0,13	0,18
4АС180	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
4АС160	9,0	0,815	0,80	2,0	7,4	2,4	0,079	0,14	0,110	0,15	0,058
4АС160	12,5	0,825	0,79	2,0	9,6	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: $x_\mu = \frac{X_\mu}{Z_H}$; $r_1 = \frac{R_1}{Z_H}$; $x_1 = \frac{X_1}{Z_H}$; $r'_2 = \frac{R'_2}{Z_H}$; $x'_2 = \frac{X'_2}{Z_H}$; $Z_H = \frac{U_{\Phi H}}{I_{1H}}$.

Таблица П.6. Технические данные АД с короткозамкнутым ротором серии 4МТ при $U_H = 380$ В, ПВ%_н = 40%

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	I_{1H} , А	$\cos \varphi_H$	M_K , Н·м	$2p$	R_1 , Ом	I_{XX} , А	R_K , Ом	X_K , Ом	J_D , кг·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: $R_K = R_1 + R'_2$; $X_K = X_1 + X'_2$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица П.7. Основные технические данные асинхронных короткозамкнутых двигателей серии 4А $U_H = 380/220$ В

Типоразмер двигателя	P_H , кВт	s_H , %	$\cos\varphi_H$	η_H	Параметры схемы замещения, о.е.			
					r_1	x_1	r'_2	x'_2
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 $\omega_0=157$ 1/с								
4А80	1,1	5,4	0,81	0,75	0,12	0,078	0,068	0,12
4А80	1,5	5,8	0,83	0,77	0,12	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 $\omega_0=104,7$ 1/с								
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: определение параметров схемы замещения указано в Примечании к таблице П.5.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица П.8 Основные данные горизонтальных цилиндрических одноступенчатых редукторов

Типоразмер	Исполнение	Межосевое расстояние, мм	η_n	Передаточные числа, i		
ЦОН-15		150	0,96	2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0		
ЦОН-20		200				
ЦОН-25		250				
ЦОН-30		300	0,97			
РЦ1-150А	I	150	0,96	8		
РЦ1-150А	II		0,96	6,61		
РЦ1-150А	III		0,97	5,6		
РЦ1-150А	IV		0,97	4,5		
РЦ1-150А	V		0,97	3,95		
РЦ1-150А	VI		0,97	3,5		
РЦ1-150А	VII		0,97	2,81		
РЦ1-150А	VIII		0,98	2,3		
РЦ1-150А	IX		0,98	1,83		
ГО-I		100	0,97	3,95 5,6 8,9		
ГО-II		150				
ГО-III		200				
ГО-IV		250				
ГО-V		300				
ГО-VI		400				

Таблица П.9 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	3,55	4,0	4,5	5,0	5,5	6,3	7,1	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	33,5	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	39,2	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	49,5	45,4	38,9	35,5	30,8	26,2	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	13,5	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	57,5	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	103	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	97,6	85,2	75,5	60,8	56,5	43,4	37,3	32,6	
	1000	173,5	160,7	157	138,8	138,3	126,1	109	93,6	87,2	68,8	54,4	49,2	41,2	
	1500	–	–	202	197,5	186,8	176,2	141,2	132,5	99,1	97,1	78,7	70,9	59,4	

Таблица П.10 Коэффициент условий работы K_R для редукторов типа ЦОМ

Характер нагрузки	Режим работы редуктора				
	Непрерывный			Прерывистый	Непрерывный (0,5 ч в сутки или прерывистый)
	24 ч в сутки	8 ч в сутки	3 ч в сутки		
Спокойная	1,25	1,0	0,8	0,7	0,6
Умеренные толчки	1,5	1,25	1,0	0,8	0,7
Сильные толчки	2,0	1,75	1,5	1,25	1,2

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Таблица П.11 Зависимость коэффициента k_1 для редуктора типа ГО от характера нагрузки

Спокойная нагрузка	$K_1=1,0$
Умеренные толчки	$K_1=1,25$
Сильные толчки	$K_1=2,0$

Зависимость коэффициента режима работы k_2 для редуктора типа ГО от продолжительности включения (ПВ)

ПВ%	15	25	40	60	100
k_2	0,36	0,48	0,62	0,77	1,0

Таблица П.12 Мощности P_{HP} и масса m редукторов на быстроходном валу (без масла)

Типоразмер редуктора	Скорость вращения быстроходного вала, n_n , об/мин	Передаточное число, i					
		3,95		5,6		8,9	
		P , кВт	m , кг	P , кВт	m , кг	P , кВт	m , кг
ГО-I	750	2,3	31	1,5	44	-	-
	1000	3,0		2,0			
	1500	4,5		3,2			
ГО-II	750	8	85	5,5	93	3,4	100
	1000	10,5		7,5		4,6	
	1500	16		11,2		6,7	
ГО-III	750	15	102	10,3	110	6,3	120
	1000	20		14		8,7	
	1500	30		21		12,6	
ГО-IV	750	27,5	145	19	159	11,6	170
	1000	36		25,5		16	
	1500	55		38		23	
ГО-V	750	51	250	35	275	21	290
	1000	68		47		30	
	1500	100		72		43	
ГО-VI	750	90	415	62	433	38	455
	1000	118		83		52	
	1500	180		125		76	

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Таблица П.13 Зависимость коэффициента K_1 для редуктора РЦ1-150А от характера нагрузки

Характер нагрузки	Продолжительность работы в сутки, ч		
	3	8	24
Спокойная	1,25	1,0	0,8
Умеренные толчки	1,0	0,8	0,65
Сильные толчки	0,65	0,55	0,5

Таблица П.14 Мощность редуктора РЦ1-150А на быстроходном валу, кВт

Скорость вращения б/х вала n_n , об/мин	ПВ%	Исполнение редуктора								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
600	15	7,0	9,3	11,9	16,3	19,1	22,3	28,9	34	41
	25	5,9	7,8	10,0	13,6	15,9	18,6	24,9	28,9	34
	40	4,8	6,2	8,1	10,0	12,8	14,8	19,1	22,8	27,4
	100	2,8	3,8	4,9	6,7	8,0	9,3	12	15	19
1000	15	10,4	13,8	17,3	23,4	26,8	31,2	39,6	47	57
	25	8,8	11,4	14,4	19,6	22,7	26	32,7	39	46
	40	7,0	9,2	11,7	15,6	18,1	20,8	26,3	31,2	36,5
	100	4,5	6,0	7,8	10,8	12,8	15	19	23,5	29
1500	15	14,6	18,9	23,8	31	36	41	51	61	73
	25	12,3	16,1	20,3	26	29,7	34	43	51	61
	40	9,9	12,9	16,1	20,8	23,7	27,2	34	41	49
	100	6,5	8,9	11,3	15,3	18	21	26,5	33	40

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Таблица П.15 Основные технические данные тиристорных преобразователей переменного тока в постоянный [13]

Параметры	КТЭУ			ЭКТ			КТЭ			ТЕ, ТЕР			
Изготовитель	ПО "ХЭМЗ"			ПО «ХЭМЗ»			ЗПО «Преобразователь»			ПО «Уралэлектротяжмаш»			
Номинальное выходное напряжение ТП, В	230			230			230			230			
	460			460			460			460			
Номинальный выпрямленный ток, А	25	50	100	25	50	100	25	50	100	100	200	320	500
	200	320	500	200	320	500	200	320	500				

Примечание: Схема силовой части преобразователя – трехфазная мостовая. Преобразователи выпускаются в реверсивном и нереверсивном исполнениях.

Таблица П.16 Основные технические данные тиристорных агрегатов серии ТЕ, ТЕР с естественным охлаждением

Тип агрегата	Параметры сети	Выходные параметры			
		Номинальный выпрямленный ток, А	Максимальный выпрямленный ток, А	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальная мощность кВт
Нереверсивные					
ТЕ4-63/230	190-220	63	141,75	230	14,5
ТЕ4-63/460	380			460	29
ТЕ4-100/230	190-220	100	225	230	23
ТЕ4-100/460	380			460	46
ТЕ4-160/230	190-220	160	360	230	36,8
ТЕ4-160/460	380			460	73,6
ТЕ4-200/230	190-220	200	450	230	46
ТЕ4-200/460	380			460	92
Реверсивные					
ТЕ4-63/230	190-220	63	141,75	230	14,5
ТЕ4-63/460	380			460	29
ТЕ4-100/230	190-220	100	225	230	23
ТЕ4-100/460	380			460	46
ТЕ4-160/230	190-220	160	360	230	36,8
ТЕ4-160/460	380			460	73,6
ТЕ4-200/230	190-220	200	450	230	46
ТЕ4-200/460	380			460	92

Примечание: Номинальный КПД $\eta_H=0,96$.

Таблица П.17 Преобразователи частоты серии Триол АТ02, (асинхронный транзисторный общепромышленный модернизированный электропривод)

Назначение: Частотное автоматическое управление асинхронным электроприводом общепромышленных механизмов (насосы, вентиляторы, компрессоры, транспортеры и т. п.)

Изготовитель: Корпорация Триол С.Петербург, Москва, Харьков

Напряжение питающей сети	3x380 В	частота 50 Гц
Выходное напряжение	3x(0 ÷ 380) В	КПД _н 0,95
Выходная частота	0,5-100 Гц	cosφ _н 0,95

Мощность ПЧ, кВт	7	10	15	20	30	50	72	100	120	150	170
Мощность двигателя, кВт	4,5	7,5	11	15	22	37	55	75	90	110	90
	5,5										132
Выходной ток, А	10	15	22	30	45	75	110	150	180	220	260

Таблица П.18 Преобразователи частоты серии Триол АТ05 (асинхронный транзисторный интеллектуальный электропривод)

Назначение: Частотное управление производственными машинами и механизмами, работающими в динамичных режимах разгона, торможения, реверсирования с высокими темпами изменения скорости и широким диапазоном изменения нагрузки с асинхронными трехфазными электродвигателями мощностью от 5,5 до 132 кВт.

Производимый ряд Триол АТ05 содержит 11 моделей: 5К5; 7К5; 11К; 15К; 22К; 37К; 55К; 75К; 90К; М11; М13.

Изготовитель: Корпорация Триол С. - Петербург, Москва, Харьков

Напряжение питающей сети	3x380 В	частота 50 Гц
Выходное напряжение	3x(0 ÷ 380) В	КПД 0,95
Выходная частота	0, ÷ 400 Гц	cosφ 0,95

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

Примечание: Электроприводы Триол АТ05 – высокочастотные, реализующие 4-х квадрантное управление приводным АД, в том числе, режим рекуперативного торможения с возвратом энергии в питающую сеть. Отличительной особенностью Триол АТ05 является наличие реверсивного управляемого диодно-транзисторного (IGBT) сетевого выпрямителя.

В приводах Триол АТ05 реализованы:

- оптимизированные алгоритмы высокочастотного ШИМ-управления,
- законы частотного регулирования АД.

Предусматривают работу в ручном и автоматическом режимах.

Для приема управляющих и задающих сигналов и управления внешними устройствами преобразователь содержит:

- 6 дискретных входов;
- 2 аналоговых входа;
- не менее 2 программируемых релейных выходов;
- 2 аналоговых выхода;
- не менее 1 канала последовательной связи через интерфейс RS485.

Обмен данными происходит через интерфейс RS485 по каналу последовательной связи в соответствии с протоколом «Modbus».

Шкафы преобразователя частоты Триол АТ05 выпускаются со степенью защиты IP21 и IP54.

Применяются для управления производственными машинами и механизмами с большой инерционной массой и частой работой в тормозном режиме, а именно:

- подъемно-транспортными машинами и механизмами (подъемные краны разных типов, краны-перегружатели, лебедки, лифты и т. д.);
- механизмами горнодобывающих машин;
- строительными машинами и механизмами;
- центрифугами в производстве сахара, в химическом производстве и т. п.
- мешалками в химической, пищевой и других отраслях промышленности;
- моталками прокатного, целлюлозно-бумажного производств.

Полное описание преобразователя частоты электроприводов АТ05 приведено в [30]. Руководство по эксплуатации. Электропривод транзисторный регулируемый асинхронный Триол АТ04-АТ-06, АТ16.

ПРИЛОЖЕНИЕ М

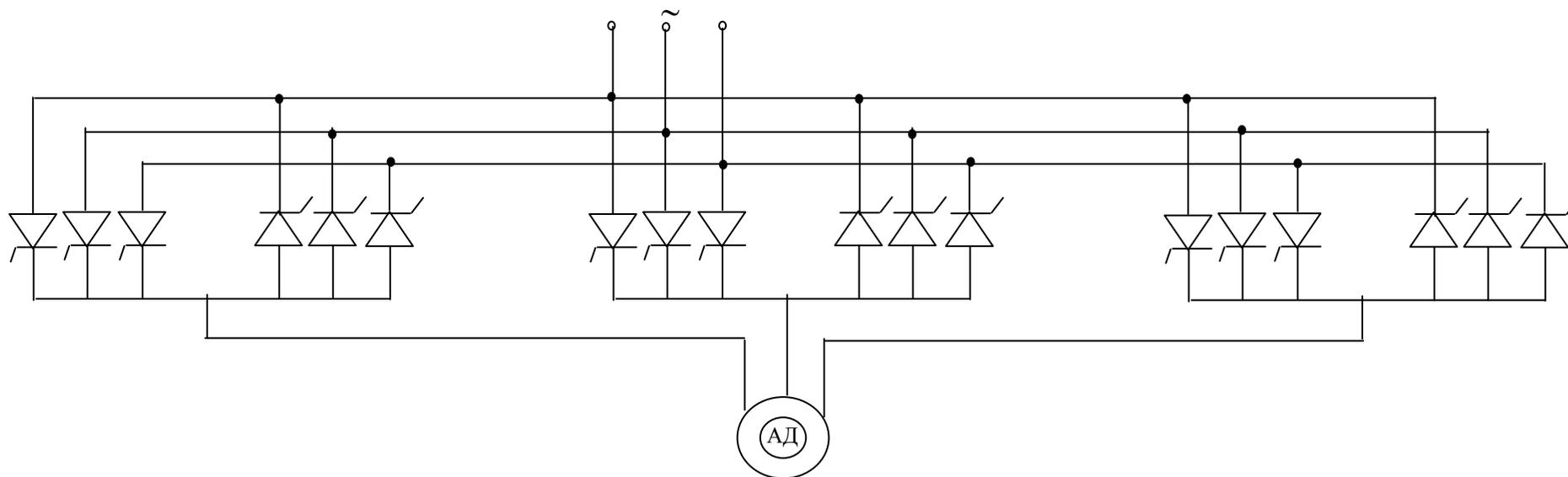
Таблица П.19 Основные технические данные преобразователей частоты с непосредственной связью серии ТТС (трехфазный статический)

Назначение: Частотное управление асинхронными двигателями серии МАП.

Изготовитель: ПО "Электровыпрямитель", г. Саранск, Россия

Тип преобразователя	Мощность, кВт	Напряжение питания, В	Число фаз	Частота питающей сети, Гц	Номинальный ток, А	η_n при активной нагрузке	cos ϕ в номинальном режиме при активной нагрузке	Диапазон регулирования напряжения	Диапазон регулирования частоты	Диапазон плавного регулирования частоты	Диапазон ступенчатого изменения частоты	Минимальная мощность источника питания, кВт	Охлаждение	ПВ%
ТТС-63-350-50	40	380	3	50	63	0,94	0,8	50-350	3-50	3-20	20,50	320	естест. воздуш.	100
ТТС-160-350-50	100	380	3	50	160	0,95	0,8	50-350	3-50	3-20	20,50	320	воздуш. принуд	100

Преобразователи выполнены по трехфазной мостовой схеме на 18 тиристорах, образующих 3 выпрямительные группы. Силовая схема имеет вид:



ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Таблица П.20 Основные технические данные преобразователей частоты серии ТТЕ и ТТП с естественным и принудительным охлаждением.

Назначение: Частотное управление асинхронным электроприводом насосных, компрессорных, вентиляторных установок с двигателями серии АИ, 2А, 4А.

Изготовитель: Запорожский электроаппаратный завод объединения "Преобразователь", Украина

Тип преобразователя	Номинальный выходной ток, А	Номинальная выходная мощность, кВА	Номинальное выходное напряжение, В	Номинальная выходная частота, Гц	η_n не ниже	$\cos \varphi$ не ниже	Рабочий диапазон изменения выходной частоты	Диапазон изменения выходного напряжения	Способ регулирования выходного напряжения.
ТТЕ-16-380-50 УХЛЧ	16	10,5	380	50(60)	0,9	0,94	5-60	5-380	ШИР
ТТЕ-25-380-50 УХЛЧ	25	16,5	380	50(60)	0,91	0,94	5-60	5-380	ШИР
ТТЕ1-25-380-50 УХЛЧ	25	16,5	380	50(60)	0,92	0,88	5-60	5-380	Амплитудное
ТТЕ1-63-380-50 УХЛЧ	63	41,5	380	50(60)	0,925	0,94	5-60	5-380	ШИР
ТТЕ1-63-380-50 УХЛЧ	63	41,5	380	50(60)	0,92	0,88	5-60	5-380	Амплитудное
ТТП-160-380-50 УХЛЧ	160	105	380	50(60)	0,935	0,94	5-60	5-380	ШИР
ТТП1-160-380-50 УХЛЧ	160	105	380	50(60)	0,94	0,88	5-60	5-380	Амплитудное
ТТП1-250-380-50 УХЛЧ	250	165	380	50(60)	0,95	0,88	5-60	5-380	Амплитудное
ТТП1-400-380-50 УХЛЧ	400	263,5	380	50(60)	0,95	0,88	5-60	5-380	Амплитудное
ТТП1-630-380-50 УХЛЧ	630	414,5	380	50(60)	0,96	0,88	5-60	5-380	Амплитудное

Т - трехфазный вход

Т – трехфазный выход

Е – естественное воздушное

П – принудительное воздушное

Выполнение на базе инверторов напряжения со звеном постоянного тока.

ПРИЛОЖЕНИЕ П

Таблица П.21 Основные технические данные преобразователей частоты серии ЭКТ (электропривод комплектный тиристорный)

Тип преобразователя	I_H , А	U_H , В	f_H , Гц	S_H , кВА	Диапазон регул. частоты	Диапазон регул. напряжения	Рабочий диапазон рег. частоты	Рабочий диапазон рег. 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 380В; Номинальная частота 50, 60 Гц; число фаз 3. кратность перегрузки по току 1,5 – 2,0; номинальный КПД $\eta_n \approx 0,88$; $\cos\phi_n \approx 0,88$; Д – динамическое торможение; Р – рекуперативное торможение.

Таблица П.22 Технические данные трансформаторов серии ТСП. Номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 380$ В [13]

Тип трансформатора	S_H , кВА	Вентильная обмотка		Параметры тиристорного преобразователя		Потери мощности, Вт		U_{K3} , %	I_{XX} , %
		$U_{2H\Phi}$, В	$I_{2H\Phi}$, А	U_H , В	I_H , А	ΔP_{XX}	ΔP_{K3}		
ТСП-10/0,7	7,3	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
		236	20,5	460	25				
ТСП-25/0,7	29,1	118	82	230	100	210	1100	5,5	8
		236	41	460	50				
ТСП-63/0,7	58	118	164	230	200	330	1900	5,5	6
		236	82	460	100				
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

Примечание: ТСП - трансформатор трехфазный сухой преобразовательный.

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

Таблица П.23 Технические данные сглаживающих реакторов серии СРОЗ3 [13]

Тип реактора	Параллельное соединение ветвей обмотки реактора		Последовательное соединение ветвей обмотки реактора		$\Delta P_{\text{МН}}$, Вт
	$I_{\text{Н}}$, А	$L_{\text{Н}}$, мГн	$I_{\text{Н}}$, А	$L_{\text{Н}}$, 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: СРОЗ3 – сглаживающий реактор однофазный сухой в защищенном исполнении.

Таблица П.24 Технические данные токоограничивающих реакторов серии РТСТ, $U_{\text{Н}} = 410$ В [13]

Тип реактора	$I_{\text{НФ}}$, А	$L_{\text{Н}}$, мГн	$R_{\text{Р}}$, мОм
РТСТ-20,5-20,02	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-660-0,60	660	0,064	2,1
РТСТ-820-0,05	820	0,05	1,4

Примечание: РТСТ – реактор трехфазный сухой токоограничивающий.

Таблица П.25 Технические данные сглаживающих реакторов серии ФРОС

Тип	$I_{\text{Н}}$, А	$L_{\text{Н}}$, 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 (0,5 кВ); Т – для тиристорных агрегатов



ПРИЛОЖЕНИЕ С - Образец 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 «Электрический привод»
тема: «Расчёт регулируемого электропривода производственной установки с двигателем постоянного тока в системе ТП – Д»

Вариант № __

Выполнил студент _____ И.О. Фамилия
подпись, дата

Группа _____

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Руководитель (должность, ученая степень, звание) _____ В.Г. Лопатин
подпись, дата

Лысьва 20__