

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М. С. Харитонов

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебно-методическое пособие
по выполнению расчетно-графической работы для студентов бакалавриата
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
И. Е. Кажекин

Харитонов, М. С.

Электропривод: учеб.-метод. пособие по выполнению расчетно-графической работы для студентов бакалавриата по напр. подг. 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / М. С. Харитонов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 104 с.

В учебно-методическом пособии по выполнению расчетно-графической работы представлены исходные данные, указания по выполнению расчетов, пример выполнения расчета, требования к структуре, объему, содержанию и оформлению расчетно-графической работы, описание организации защиты и критерии оценивания. Расчетно-графическая работа предназначена для практического закрепления теоретических сведений в области электропривода.

Табл. 16, рис. 46, список лит. – 10 наименований

Учебно-методическое пособие по выполнению расчетно-графической работы рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 30.06.2022 г., Протокол № 6

УДК 621.31

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2022 г.
© Харитонов М. С., 2022 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ.....	6
2 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	8
3 ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ	9
4 ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ	10
5 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ	12
6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ.....	13
6.1 Расчет моментов нагрузки и моментов инерции производственного механизма.....	13
6.2 Выбор типа электропривода.....	14
6.3 Предварительный выбор двигателя по мощности	16
6.4 Определение параметров схемы замещения двигателя	19
6.5 Расчет естественных механических и электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя	27
6.6. Расчет основных элементов силовых цепей электропривода	34
6.7 Тормозные режимы работы электроприводов	38
6.8 Расчет переходных процессов и нагрузочных диаграмм асинхронного электропривода	42
6.9 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке	46
6.10 Разработка схемы управления электроприводом	47
7 ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ.....	51
7.1 Выбор типа электропривода.....	52
7.2 Построение диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма.....	52
7.3 Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу.....	54
7.4 Построение естественных механической и электромеханических характеристик электродвигателя	58
7.5 Расчет пусковых и регулировочных резисторов электропривода	62
7.5.1 Расчет параметров и характеристик режима динамического торможения асинхронного двигателя	69
7.6 Расчет переходных процессов скорости, момента и тока за цикл работы электропривода	74
7.7 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке	85
7.8 Схема управления электроприводом	87

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	91
Приложение 1	92
Приложение 2	93
Приложение 3	97
Приложение 4	99
Приложение 5	100
Приложение 6	101
Приложение 7	103

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Электропривод» является формирование у обучающихся знаний в области структуры, принципа действия, электромеханических свойств, эксплуатационных режимов работы электроприводов.

Задачи изучения дисциплины:

- освоение структуры, конструкции и принципа действия различных типов электрических приводов;
- изучение взаимосвязанных электрических и механических процессов, происходящих в электрическом приводе, и основных способов их математического описания;
- приобретение навыков определения основных параметров и выходных характеристик электрических приводов.

Целью выполнения расчетно-графической работы является практическая апробация теоретических сведений в области методов расчёта параметров электроприводов, их электрических и тепловых режимов.

Задачами выполнения расчетно-графической работы являются:

- приобретение знаний в области структуры, элементной базы, режимов работы, электромеханических и механических характеристик электропривода с асинхронными двигателями;
- формирование умения анализировать и использовать исходную информацию для определения параметров электроприводов и их элементов;
- развитие навыков проектирования электропривода с асинхронным двигателем и расчета режимов работы;

После выполнения расчетно-графической работы студент должен *знать*:

- структурную схему электропривода;
- электрическую часть силового канала;
- физические процессы в электроприводах с асинхронными машинами;
- принципы управления;
- элементы проектирования электропривода;
- возможные режимы работы электроприводов;

уметь:

- анализировать информацию, технические данные, показатели и параметры электроприводов и их элементов, обобщать и систематизировать их, производить необходимые расчеты, используя современную электронно-вычислительную технику;
- обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры работы электропривода;

владеть:

- навыками по эксплуатации и определении работоспособности установленного, эксплуатируемого и ремонтируемого электрооборудования в составе электропривода в соответствии с требованиями нормативно-технических документов;
- методами и техническими средствами эксплуатационных испытаний и диагностики электроприводов.

1 СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Завершенная расчетно-графическая работа должна включать следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание на РГР;
- содержание;
- введение;
- основная часть с разбивкой по разделам;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Титульный лист

Форма титульного листа и образец его заполнения приведены в Приложении 8.

Техническое задание

Расчетно-графическая работа должна выполняться на основе индивидуального задания, содержащего исходные параметры режимов работы технологического оборудования, которые должны быть обеспечены проектируемым электроприводом.

Содержание

Содержание должно отражать все разделы, включённые в РГР, с указанием страниц, на которых они начинаются.

Введение

В разделе «Введение» кратко формулируются цель и задачи расчетно-графической работы, указываются особенности, техническое и практическое значение, основные направления предлагаемых решений. Во введении следует раскрыть актуальность вопросов темы, охарактеризовать проблему, к которой относится тема, перечислить методы и средства, с помощью которых будут решаться поставленные задачи.

Основная часть

Основная (расчетная) часть работы включает следующие вопросы:

- Выбор типа электропривода.

– Расчет мощности электродвигателя и предварительный его выбор, определение оптимального по условию минимизации времени пуска передаточного отношения редуктора.

– Расчет механических и электромеханических характеристик для двигательного и тормозного режимов.

– Расчет и выбор пусковых, тормозных и регулировочных сопротивлений.

– Расчет переходных характеристик $I = f(t)$, $M = f(t)$, $\omega = f(t)$ за цикл работы.

– Построение нагрузочной диаграммы электропривода.

– Проверка выбранного электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности.

– Разработка и составление принципиальной электрической схемы силовой цепи электропривода и системы управления.

Заключение

В заключении сообщаются основные результаты выполненной работы, рекомендации по их использованию.

Список использованных источников

В список использованных источников включаются непосредственно использованные, на которые имеются ссылки в текстовом документе. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте.

Приложения

В приложения следует включать материалы вспомогательного характера. В приложения могут быть помещены:

- таблицы и рисунки большого формата;
- дополнительные расчеты.

Графическая часть РГР должна включать следующие графические материалы:

- кинематическую схему;
- диаграммы скорости и момента производственного механизма;
- принципиальную схему силовой цепи электропривода и системы управления;
- механические и электромеханические характеристики электропривода за цикл работы;
- кривые переходных процессов.

2 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задание к расчетно-графической работе включает данные нагрузочной диаграммы и тахограммы производственного механизма. Система работает в повторно-кратковременном режиме по циклу: пуск, работа на первой технологической скорости, переход на вторую технологическую скорость через пусковые характеристики, работа на второй технологической скорости, динамическое торможение. Исходные данные для расчета выбираются по указанию преподавателя. В таблицах 2.1 и 2.2 представлены примерные варианты исходных данных.

Таблица 2.1 – Данные тахограмм производственных механизмов

№ варианта	Частота вращения механизма n_1 , об/мин	Время работы t_{p1} , с	Частота вращения механизма n_2 , об/мин	Время работы t_{p2} , с	Время паузы t_0 , с
1	20	25	50	30	140
2	45	15	100	18	55
3	25	16	65	24	65
4	35	20	90	30	110
5	50	30	110	40	100
6	75	25	160	30	120
7	115	20	200	25	135
8	65	20	135	32	160
9	55	20	120	30	130
10	85	30	175	45	145
11	35	30	80	15	120
12	40	20	100	30	70
13	20	25	65	25	105
14	15	50	40	10	95
15	35	60	90	60	210

Таблица 2.2 – Данные нагрузки, создаваемой производственным механизмом

№ варианта	Момент механизма, Н · м	Характер нагрузки	КПД передачи при максимальной частоте вращения	Момент инерции механизма, кг · м ²
1	500	активная	0,95	20
2	1500	активная	0,97	60
3	250	активная	0,95	50
4	800	активная	0,97	40

3 ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ

Расчетно-графическую работу по указанию преподавателя допускается выполнять и оформлять в редакторе MS Word или в программном комплексе Mathcad. При необходимости допускается использование MS Excel для расчётов и построения диаграмм. Требования по оформлению РГР различаются в зависимости от используемого программного средства.

Общие требования

Пояснительная записка должна содержать обязательные структурные элементы (раздел 1). Текстовая часть пояснительной записки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание посередине). Ссылки на литературу оформляются в [скобках]. Нумерация источников – сквозная по первому упоминанию. Электрические схемы рекомендуется выполнять в редакторе MS Visio.

Требования при оформлении в MS Word

При оформлении в редакторе MS Word необходимо придерживаться следующих основных требований:

Поля документа: левое - 30 мм, правое - 10 мм, верхнее и нижнее - 15 мм.

Шрифт Times New Roman, размер (кегель) 12–14.

Выравнивание шрифта по ширине.

Расстановка переносов – автоматическая.

Межстрочный интервал – 1,15–1,25.

Отступ первой строки абзаца – 12,5 мм.

Выравнивание рисунков – по центру без отступа.

Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа.

Подписи рисунков и таблиц – по ГОСТ.

Нумерация страниц – по центру внизу страницы.

Требования при оформлении в Mathcad

В случае выполнения расчетов в среде Mathcad допускается оформлять расчетную часть РГР встроенными средствами редактирования. По завершении работы осуществляется вывод электронного документа в формате pdf. Перед началом работы необходимо настроить поля документа: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 15 мм (рисунок 3.1).

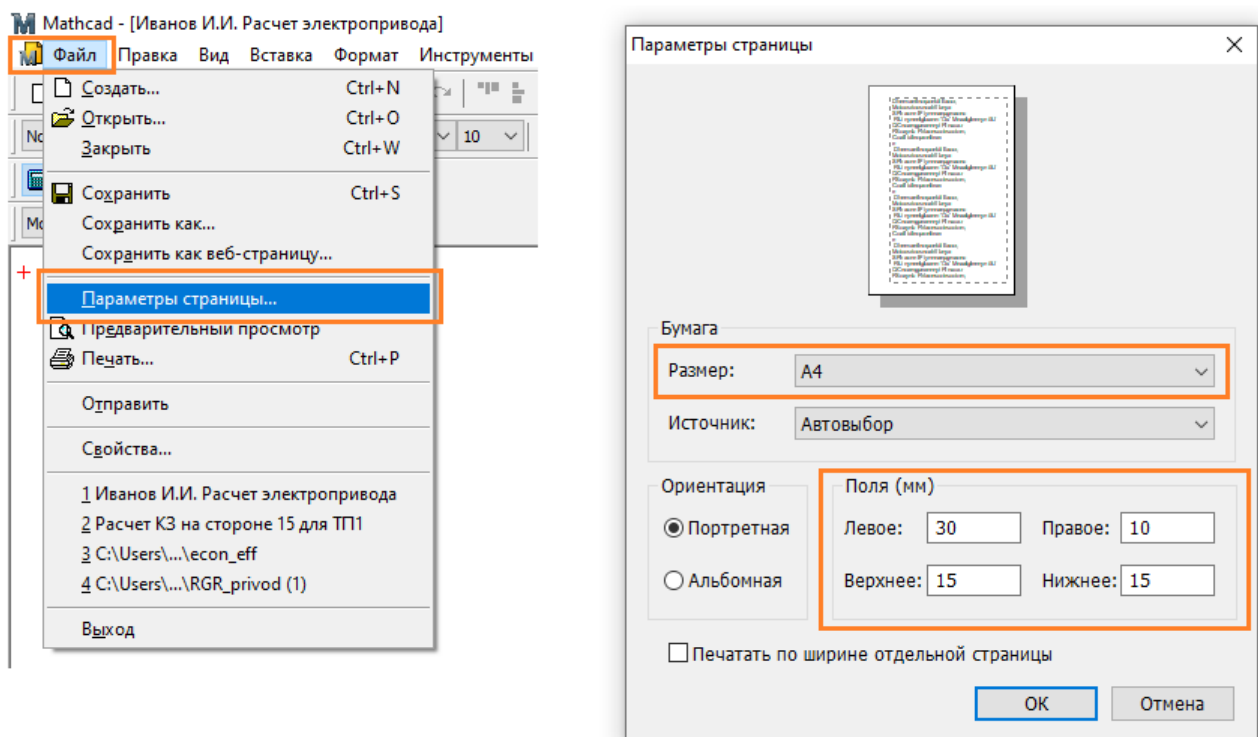


Рисунок 3.1 – Задание полей документа в программе Mathcad

Расчетная часть должна иметь четкую структуру. Таблицы и рисунки должны иметь названия с конкретным указанием отображаемых величин и соответствующих режимов работы электропривода. При построении диаграмм, в частности, механических характеристик и переходных процессов, необходимо вручную задавать шаг сетки по осям диаграммы с целью обеспечения удобства считывания данных. Шаг подбирается под каждую диаграмму индивидуально в зависимости от диапазона значений по оси из числа типовых: (10, 20, 30, ...), (20, 40, 50, ...), (25, 50, 75, ...), (50, 100, 150, ...), (100, 200, 300, ...). Изменение шага осуществляется через меню «Формат» редактируемой диаграммы в разделе «Количество сеток».

4 ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ

Защита РГР проводится после предоставления завершенной работы и устранения всех замечаний по расчетной части. Защита проводится устно в формате собеседования по материалам работы и в форме ответа на контрольные вопросы. Общее количество вопросов зависит от качества ответов студента и уровня владения материалом представленной работы.

Типовые контрольные вопросы:

1. Для каких целей и в каких системах может быть применен спроектированный электропривод?
2. Обоснуйте выбор силовой схемы электропривода.

3. Объясните приведенную в расчетно-пояснительной записке тахограмму и нагрузочную диаграмму.
4. Что представляет собой коэффициент ПВ, %?
5. Дайте краткую характеристику повторно-кратковременного режима работы электропривода.
6. Объясните проведенный расчет скольжений по ступеням регулирования скорости электропривода.
7. Покажите графически отличие активной и реактивной нагрузок.
8. Можно ли с помощью выбранного способа регулирования получить угловые скорости выше номинальных?
9. Какое передаточное отношение редуктора является оптимальным?
10. Поясните, что следует понимать под диапазоном, направлением и плавностью регулирования скорости.
11. Укажите порядок выбора мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.
12. Как пересчитать мощность двигателя на иную продолжительность включения?
13. Как следует поступить, если полученное расчетом эквивалентное значение тока больше номинального тока двигателя?
16. Как проверить двигатель на перегрузочную способность?
17. Какой вид торможения применяется в спроектированном приводе?
18. Назовите и дайте краткую характеристику способам электрического торможения.
19. Напишите уравнение движения электропривода для двигательного и тормозного режимов при реактивном моменте сопротивления.
20. Как привести к валу двигателя момент сопротивления и момент инерции механизма?
21. По каким показателям проверяется правильность выбора двигателя?
22. Укажите порядок расчета тока статора двигателя в функции угловой скорости.
23. Чему равен ток статора асинхронного двигателя при скольжении, равном нулю?
24. Чем вызвана необходимость ограничения бросков тока и момента при пусках, реверсах, торможениях двигателей постоянного тока?
25. Поясните физический смысл и принцип графического определения постоянных времени нагрева и охлаждения двигателя.

5 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ

Критерии оценивания различаются для расчетной части и устных ответов при защите расчетно-графической работы. По результатам выполнения расчетной части и последующей защиты работы выставляется оценка по пятибалльной системе (таблицы 5.1, 5.2).

Таблица 5.1 – Критерии оценивания расчетных заданий

Оценка	Критерий
«Отлично»	Методика и порядок расчета верные. Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки
«Хорошо»	Методика и порядок расчета верные. Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчетах, которые не привели к существенному искажению результата
«Удовлетворительно»	Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчетах или выборе коэффициентов, обусловленные неполным пониманием принципа расчета, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения
«Неудовлетворительно»	Применена неверная методология, нарушен порядок расчета, имеется серьезная системная ошибка, обусловленная непониманием принципа расчета и приведшие к ошибочному результату

Таблица 5.2 – Критерии оценивания устных ответов

Оценка по критериям	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
1	2	3	4	5
Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из них может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно-корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только неко-	В состоянии осуществлять научно-корректный анализ предоставленной	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в иссле-

Оценка по критериям	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
1	2	3	4	5
	торые из имеющихся у него сведений	информации	информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	дование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

6.1 Расчет моментов нагрузки и моментов инерции производственного механизма

Расчет моментов нагрузки и моментов инерции производственного механизма выполняется на основе конструктивных и технологических данных машины, указываемых в задании. Моменты нагрузки и моменты инерции движущихся масс механизма приводятся к валу двигателя с учетом передаточного отношения и КПД редуктора.

По рассчитанным приведенным статическим нагрузкам на валу двигателя и заданном времени рабочего цикла строится нагрузочная диаграмма.

В ряде случаев диаграммы скорости и момента производственного механизма могут быть рассчитаны заранее и представлены, например, в виде таблиц в задании по РГР. В этом случае тахограмма и нагрузочная диаграмма строятся по данным технического задания (рисунок 6.1).

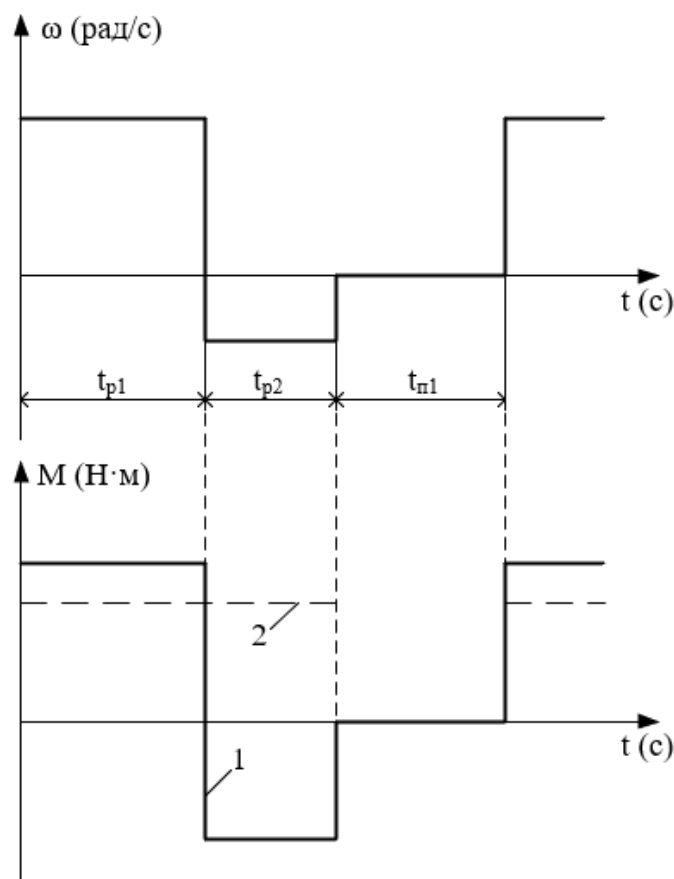


Рисунок 6.1 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма производственного механизма: 1 – реактивная нагрузка; 2 – активная нагрузка

Если в техническом задании приводится частота вращения n_i производственного механизма, то она пересчитывается на угловую скорость в соответствии с выражением:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30} \frac{\text{Рад}}{\text{с}}, \quad (6.1)$$

где n_i – частота вращения производственного механизма на i -м интервале времени, об/мин.

6.2 Выбор типа электропривода

Выбор рода тока, типа и конструктивного исполнения двигателя основывается на анализе технологических требований и условий работы производственного механизма. Основными факторами, определяющими род тока, тип и конструктивное исполнение двигателя, являются:

- показатель регулирования скорости (диапазон, плавность, стабильность скорости и т. д.);
- режим работы производственного механизма;
- производительность и надежность установки;
- основные затраты и эксплуатационные расходы на электрооборудование.

При рабочем проектировании обычно выполняется технико-экономическое сравнение различных вариантов электропривода. В данной работе тип электропривода выбирается без расчета технико-экономических показателей на основании общих соображений о преимуществах и недостатках того или иного варианта применительно к условиям задания. При этом обязательно учитываются первых два пункта основных факторов. Род тока независимо от факторов выбирается переменный, а электропривод – с асинхронным двигателем.

В данной РГР в качестве основного способа регулирования скорости следует выбирать реостатный – как наиболее простой при разработке системы управления. По согласованию с преподавателем способ регулирования скорости может быть изменен.

После определения способа регулирования скорости необходимо в осях координат (ω , M) изобразить рабочие точки установившихся режимов работы механизма с координатами ω_i , M_i (рисунок 6.2).

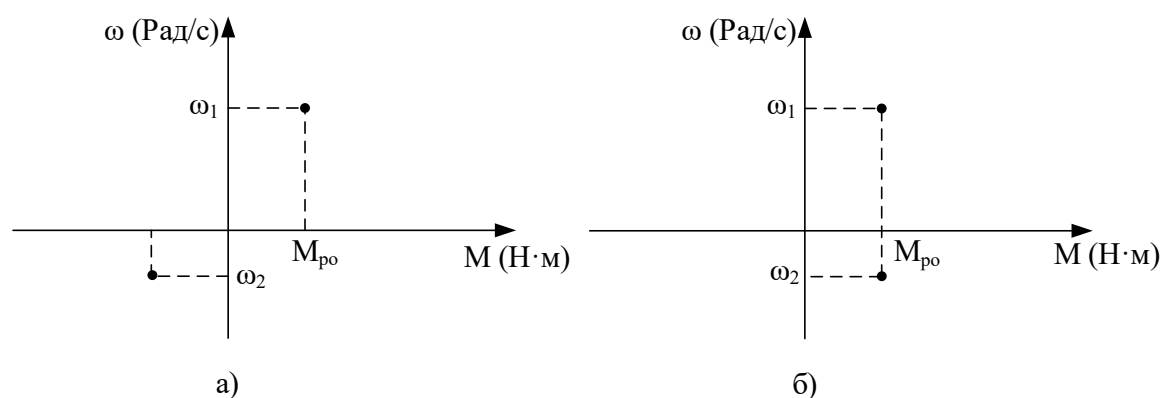


Рисунок 6.2 – Координаты установившихся скоростей работы механизма:
а – реактивная нагрузка; б – активная нагрузка

Определить режим работы электропривода для каждой из заданных скоростей ω_i работы механизма: двигательный режим, режим рекуперативного торможения, режим динамического торможения, режим торможения противовключением. Эскизно изобразить механические характеристики двигателя, приведенные к валу механизма. На рисунке 6.3 в качестве примера изображены механические характеристики асинхронного двигателя, приведенные к валу механизма.

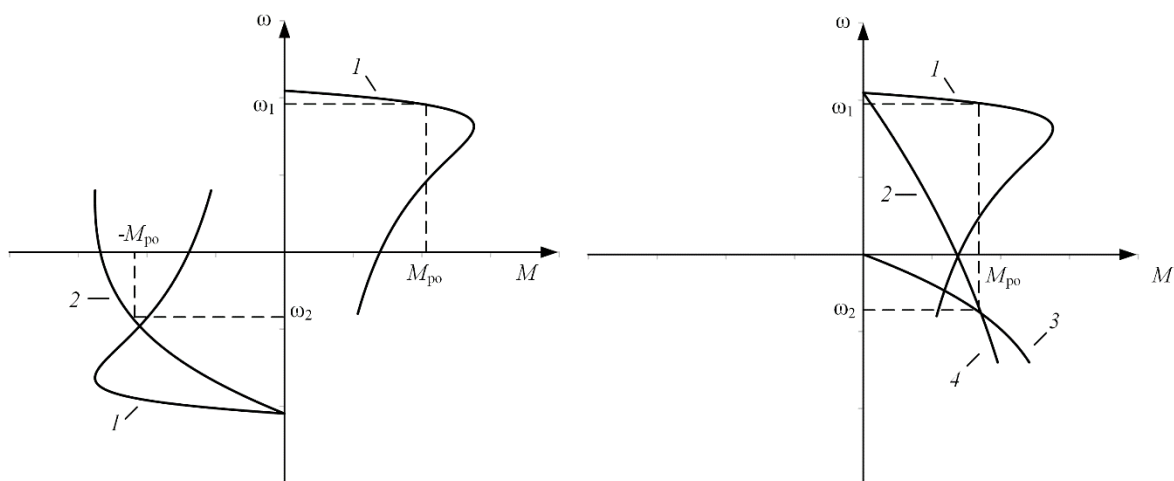


Рисунок 6.3 – Механические характеристики двигателя, приведенные к валу исполнительного механизма: 1 – естественная характеристика; 2 – реостатная характеристика, двигательный режим; 3 – характеристика режима динамического торможения; 4 – реостатная характеристика режима торможения противовключением

Определившись с методами регулирования скорости и режимами работы на регулировочных характеристиках, можно приступить к проектированию электропривода.

6.3 Предварительный выбор двигателя по мощности

Диаграммы скорости и момента производственного механизма, определенные в п. 6.1, обуславливают различные режимы работы электроприводов. Для более точных расчетов и выбора двигателей по мощности полученные нагрузочные диаграммы приводятся к диаграммам, которые классифицируются на восемь номинальных режимов: продолжительный режим работы (S1); кратковременный режим работы (S2); повторно-кратковременный режим работы (S3); повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками (S4); повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением (S5); перемежающийся режим работы (S6); перемежающийся режим работы с частыми реверсами (S7); перемежающийся режим работы с двумя или более угловыми скоростями (S8) [1, 2].

Для повторно-кратковременных (S3–S5) и перемежающихся режимов (S6–S8) работы электродвигателя последовательность выбора двигателя по мощности следующая:

По нагрузочной диаграмме механизма (нагрузки отнесены к валу механизма) определяется среднеквадратичное значение мощности за время работы с помощью формулы [1]:

$$P_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{P_i \cdot \omega_{max}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}} \text{ кВт}, \quad (6.2)$$

где m – число рабочих участков в цикле; P_i – мощность на i -м интервале; t_{pi} – продолжительность i -го интервала; β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м интервале, соответствующий значению угловой скорости ω_i на этом интервале; ω_{max} – максимальная скорость производственного механизма.

При найденных в п. 6.1 угловых скоростях ω_i и моментах M_i производственного механизма мощность:

$$P_i = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (6.3)$$

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной [1]:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{max}}, \quad (6.4)$$

где β_0 – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей различного исполнения приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Значения коэффициента β_0 для двигателей различного исполнения

Исполнение двигателя	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25 ÷ 0,35

Расчетная продолжительность включения находится по формуле:

$$ПВ_{расч} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} \cdot 100 \%, \quad (6.5)$$

где t_{pi} – продолжительность i -го интервала времени работы в цикле; m – число рабочих интервалов в цикле; $t_{пj}$ – продолжительность j -го интервала времени паузы в цикле; n – число пауз в цикле.

Среднеквадратичная мощность на ближайшую каталожную продолжительность включения рассчитывается по формуле:

$$P_k = P_{\Sigma} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ_k}} \text{ кВт}, \quad (6.6)$$

где $P_{Вк}$ – ближайшая к расчетной каталожная продолжительность включения. Каталожная продолжительность включения выбирается из ряда номинальных значений: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %, 100 %.

По полученному значению мощности и максимальной угловой скорости вращения механизма определяется расчетная мощность двигателя:

$$P_{расч} = P_k \cdot \frac{k_3}{\eta_n} \text{ кВт}, \quad (6.7)$$

где $k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы механизма. Большие значения k_3 соответствуют большим изменениям угловой скорости; η_n – коэффициент полезного действия передачи.

По каталогу выбирается несколько электродвигателей **ближайшей большей мощности** с различными номинальными частотами вращения.

Для каждого двигателя вычисляется расчетное передаточное отношение (число) редуктора (например, для редуктора при регулировании скорости вниз от номинальной и реактивной нагрузки):

$$i_{pi} = \frac{\omega_{нд}}{|\omega_{max\ M}|}, \quad (6.8)$$

где $\omega_{нд}$ – номинальная скорость двигателя; $\omega_{max\ M}$ – максимальная скорость производственного механизма.

Промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [3]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 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; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора находится по следующей формуле:

$$i_{ст\ pi} = i_{ст\ i} \cdot 10^x, \quad (6.9)$$

где $i_{ст\ i}$ – стандартное передаточное число редуктора; x – целое число.

Например, стандартными передаточными отношениями являются числа: 1,12; 11,2; 112 и т. д.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается из ряда как **ближайшее меньшее** к расчетному по выражению (6.8):

$$i_{ст\ pi} \leq i_{pi}. \quad (6.10)$$

Для каждого двигателя определяется оптимальное по условию минимизации времени пуска передаточное отношение редуктора:

$$i_{опт\ i} = \sqrt{\frac{J_M}{k \cdot J_{дв}}}, \quad (6.11)$$

где J_M – момент инерции производственного механизма; $J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя; $k = 1,05 \div 1,3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора.

Для каждого двигателя определяется отношение выбранного стандартного передаточного отношения редуктора к оптимальному передаточному отношению:

$$\theta = \frac{i_{ст pi}}{i_{опт i}}. \quad (6.12)$$

Двигатель с θ , наиболее приближенной к единице, принимается в качестве приводного.

6.4 Определение параметров схемы замещения двигателя

6.4.1 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным

В наиболее полных справочниках [4] по асинхронным двигателям приведены следующие физические величины, необходимые для определения параметров его схемы замещения:

P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;

U_{1H} – номинальное фазное напряжение, В;

Π_H – коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка), %;

$\cos\varphi_H$ – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка), о. е.;

R_1' – активное сопротивление обмотки статора, о. е.;

$X'_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, о. е.;

R_2'' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

$X''_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

X'_m – индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление), о. е.

В этом случае нахождение параметров схемы замещения асинхронного двигателя не представляет сколь-нибудь заметных трудностей и выполняется в следующей последовательности.

Номинальный ток статора двигателя определяется по следующей формуле:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H}. \quad (6.13)$$

Определим базисное сопротивление:

$$Z_6 = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}. \quad (6.14)$$

Находятся параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = R'_1 \cdot Z_6 \text{ Ом.} \quad (6.15)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора:

$$X_{1\sigma} = X'_{1\sigma} \cdot Z_6 \text{ Ом.} \quad (6.16)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = R''_2 \cdot Z_6 \text{ Ом.} \quad (6.17)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X'_{2\sigma} = X''_{2\sigma} \cdot Z_6 \text{ Ом.} \quad (6.18)$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_m = X'_m \cdot Z_6 \text{ Ом.} \quad (6.19)$$

Найденные параметры схемы замещения позволяют рассчитать статические характеристики асинхронного двигателя, например, по формуле Клосса, т. е. без учета насыщения зубцов от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях беличьей клетки.

Пример 6.1. Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ определить параметры Т-образной схемы замещения. Двигатель имеет следующие технические данные [4]:

- номинальная мощность $P_n = 4 \text{ кВт}$;
- номинальное фазное напряжение $U_{1н} = 220 \text{ В}$;
- коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка) $\eta_n = 82,0 \%$;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка) $\cos \varphi_n = 0,81 \text{ о. е.}$;
- активное сопротивление обмотки статора $R'_1 = 0,077 \text{ о. е.}$;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора $X'_{1\sigma} = 0,073 \text{ о. е.}$;
- активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, $R'_2 = 0,062 \text{ о. е.}$;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, $X'_{2\sigma} = 0,11 \text{ о. е.}$;
- индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление) $X'_m = 2,0 \text{ о. е.}$

Решение

Номинальный ток статора двигателя по формуле (6.13):

$$I_{1н} = \frac{P_n}{m_1 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{400}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,125 \text{ А.}$$

Базисное сопротивление по формуле (6.14):

$$Z_6 = \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{220}{9,125} = 24,1 \text{ о. е.}$$

Параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора по формуле (6.15):

$$R_1 = R'_1 \cdot Z_6 = 0,077 \cdot 24,1 = 1,856 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора по формуле (6.16):

$$X_{1\sigma} = X'_{1\sigma} \cdot Z_6 = 0,073 \cdot 24,1 = 1,759 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора по формуле (6.17):

$$R'_2 = R''_2 \cdot Z_6 = 0,062 \cdot 24,1 = 1,494 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора по формуле (6.18):

$$X'_{2\sigma} = X''_{2\sigma} \cdot Z_6 = 0,11 \cdot 24,1 = 2,651 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания по формуле (6.19):

$$X_m = X'_m \cdot Z_6 = 2 \cdot 24,1 = 48,2 \text{ Ом.}$$

6.4.2 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Как правило, в каталогах [5] на асинхронные двигатели приводятся следующие технические данные:

P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;

U_{1H} – номинальное фазное напряжение, В;

I_{1H} – номинальный ток статора двигателя, А;

n_H – номинальная частота вращения, об/мин;

S_H – номинальное скольжение, о. е.;

η_H – коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о. е.;

$k_i = I_{\Pi}/I_{1H}$ – кратность пускового тока, о. е.;

$k_{\Pi} = M_{\Pi}/M_H$ – кратность пускового момента, о. е.;

$k_{\max} = M_{\max}/M_H$ – кратность максимального момента, о. е.;

$k_{\min} = M_{\min}/M_H$ – кратность минимального момента, о. е.

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

1) магнитные и механические потери в двигателе составляют $0,02 \cdot P_H$;

2) активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т. е. эффекты вытеснения тока не учитываются.

Определяется ток холостого хода асинхронного двигателя [6]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{1 - p_* \cdot s_H} \right]^2}{1 - \left(p_* \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_* \cdot s_H} \right)^2}}, \quad (6.20)$$

где I_{1H} – номинальный ток статора двигателя, А; $s_H = (n_0 - n_H)/n_0$ – номинальное скольжение, о. е.; n_0 – синхронная частота вращения, об/мин; U_{1H} – номинальное фазное напряжение, В; I_{11} – ток статора двигателя при частичной нагрузке, А, определяется по формуле (6.21); $\cos\varphi_{p*}$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о. е.; η_{p*} – КПД электродвигателя при частичной нагрузке, о. е.; $p_* = P/P_H$ – коэффициент нагрузки двигателя, о. е.; P – мощность двигателя при частичной нагрузке, кВт.

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi_{p*} \cdot \eta_{p*}}. \quad (6.21)$$

Коэффициенты мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10÷15 % меньше номинальной [5]. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них, в силу стандартной дискретной шкалы мощностей, работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке $p_* = 0,75$ практически равны, т. е. $\eta_H \approx \eta_{0,75}$;

- коэффициент мощности при той же нагрузке ($p_* = 0,75$) сильно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рисунке 6.4.

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения:

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{(k_{max})^2 - [(1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1))]}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}, \quad (6.22)$$

где

$$\beta = \frac{R_1}{(C_1 \cdot R'_2)}, \quad (6.23)$$

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} \right). \quad (6.24)$$

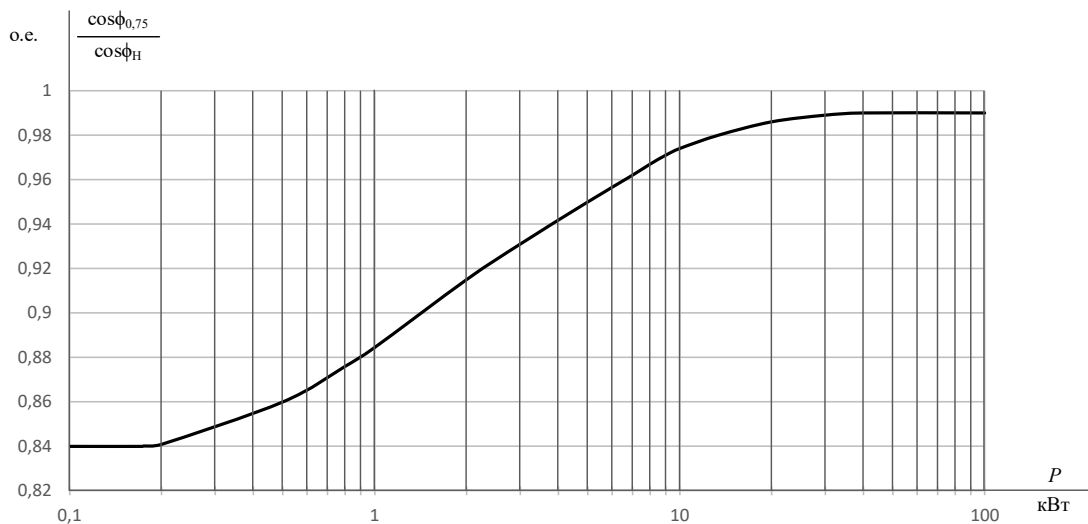


Рисунок 6.4 – Зависимость $\cos\phi_{0,75}/\cos\phi_n$ от мощности асинхронного двигателя

Значение коэффициента β согласно источнику [5] находится в диапазоне $0,6 \div 2,5$.

Определим коэффициент [6]:

$$A_1 = m \cdot U_{1n}^2 \cdot \frac{1 - s_n}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_n}, \quad (6.25)$$

тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\beta + \frac{1}{s_k} C_1}, \text{ Ом.} \quad (6.26)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно найти по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta, \text{ Ом.} \quad (6.27)$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{кн}$:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2}. \quad (6.28)$$

Очевидно, что при отрицательном подкоренном выражении (6.28) первоначально принятое значение β необходимо изменить.

Тогда индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2. \quad (6.29)$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания $X_{кн}$ сопротивления рассеяния фаз статора $X_{1сн}$ и ротора $X'_{2сн}$, воспользуемся соотношениями [6], которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению:

$$X'_{2\sigma\text{H}} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{KH}}}{C_1}, \text{ Ом.} \quad (6.30)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma\text{H}} = 0,42 \cdot X_{\text{KH}}, \text{ Ом.} \quad (6.31)$$

Согласно векторной диаграмме (рисунок 6.6) ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_m = \sqrt{(U_{1\text{H}} \cdot \cos \varphi_{1\text{H}} - R_1 \cdot I_{1\text{H}})^2 + \left(U_{1\text{H}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1\text{H}}} - X_{1\sigma\text{H}} \cdot I_{1\text{H}} \right)^2}, \quad (6.32)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{m\text{H}} = \frac{E_{m\text{H}}}{I_0}. \quad (6.33)$$

Приведенная методика дает удовлетворительное схождение расчетных механических характеристик и механических характеристик, построенных по трем паспортным точкам на рабочем участке механической характеристики, т. е. при изменении скольжения s от 0 до s_{K} .

Используя параметры схемы замещения, можно произвести расчет механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя.

Пример 6.2. Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 определить параметры Т-образной схемы замещения.

Двигатель имеет следующие технические данные [5]:

- номинальная мощность $P_{\text{H}} = 4 \text{ кВт}$;
- номинальное фазное напряжение $U_{1\text{H}} = 220 \text{ В}$;
- синхронная частота вращения $n_0 = 1000 \text{ об/мин}$;
- номинальное скольжение $s_{\text{H}} = 0,051 \text{ о. е.}$;
- коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100 %-ная нагрузка) $\eta_{\text{H}} = 82 \text{ \%}$;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,81 \text{ о. е.}$;
- кратность пускового тока $I_{\text{п}}/I_{1\text{H}} = k_i = 6 \text{ о. е.}$;
- кратность пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{H}} = k_{\text{п}} = 2 \text{ о. е.}$;
- кратность максимального момента $M_{\text{max}}/M_{\text{H}} = k_{\text{max}} = 2,2 \text{ о. е.}$;
- кратность минимального момента $M_{\text{min}}/M_{\text{H}} = k_{\text{min}} = 1,6 \text{ о. е.}$

Решение

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{1 - p_* \cdot s_H} \right]^2}{1 - \left(p_* \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_* \cdot s_H} \right)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{7,29^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 9,125 \cdot (1 - 0,051)}{1 - 0,75 \cdot 0,051} \right]^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,051}{1 - 0,75 \cdot 0,051} \right)^2}} = 4,05 \text{ A,}$$

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{0,75 \cdot 4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,76 \cdot 0,82} = 7,29 \text{ A,}$$

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p*} \cdot \eta_{p*}},$$

$$\cos \varphi_{p*} = 0,94 \cdot \cos \varphi_H = 0,94 \cdot 0,81 = 0,76 \text{ о. е.,}$$

где I_{1H} – номинальный ток статора двигателя; $m_1 = 3$ – число фаз асинхронного двигателя; I_{11} – ток статора двигателя при частичной нагрузке; $\cos \varphi_{p*}$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке (рисунок 6.4); $\eta_{p*} = \eta_H = 0,82$ о. е. – КПД при частичной нагрузке; $p_* = P/P_H = 0,75$ о. е. – коэффициент загрузки двигателя.

Критическое скольжение:

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{(k_{max})^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}$$

$$= 0,051 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3 \cdot (2,2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3 \cdot (2,2 - 1)}$$

$$= 0,255.$$

Значение коэффициента β согласно источнику [5] находится в диапазоне $0,6 \div 2,5$. Принимаем $\beta = 1,3$.

Определим коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{4,05}{2 \cdot 6 \cdot 9,13} = 1,04.$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,051)}{2 \cdot 1,04 \cdot 2,2 \cdot 4000} = 7,55.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K} \right) \cdot C_1} = \frac{7,55}{\left(1,3 + \frac{1}{0,244} \right) \cdot 1,04} = 1,39 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,04 \cdot 1,39 \cdot 1,3 = 1,88 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{кн}}$:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{(1 - 0,255^2) - 1,3^2} = 3,70,$$

тогда

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,70 \cdot 1,04 \cdot 1,40 = 5,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению:

$$X_{2\sigma\text{н}}' = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{5,35}{1,04} = 2,99 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$\begin{aligned} E_m &= \sqrt{(U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{1\text{н}} - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + \left(U_{1\text{н}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1\text{н}}} - X_{1\sigma\text{н}} \cdot I_{1\text{н}} \right)^2} \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,81 - 1,88 \cdot 9,13)^2 + \left(220 \cdot \sqrt{1 - 0,81^2} - 2,25 \cdot 9,13 \right)^2} \\ &= 194,1 \text{ В,} \end{aligned}$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{\text{мн}} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{194,2}{4,05} = 48,0 \text{ Ом.}$$

В таблице 6.2 приведены параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные по каталожным данным (строка 1), заложенные в проектные расчеты этого двигателя [5] (строка 2), а также погрешность δ , % определения каждого из параметров (строка 3).

Таблица 6.2 – Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

Параметр	R_1	$X_{1\sigma}$	R_2'	$X_{2\sigma}'$	X_m
Расчет	1,88	2,25	1,39	2,99	48,0
Проект	1,86	1,76	1,49	2,65	48,2
Погрешность, %	1,17	21,7	8,0	11,4	0,456

Как следует из анализа результатов, приведенных в таблице 6.2, сходимость расчетных параметров схемы замещения и проектных данных завода-изготовителя в основном находится в инженерных допусках.

6.5 Расчет естественных механических и электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя

Естественной электромеханической (механической) характеристикой двигателя называют зависимость угловой скорости двигателя ω от его тока якоря I (момента M), полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя.

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения (рисунок 6.5).

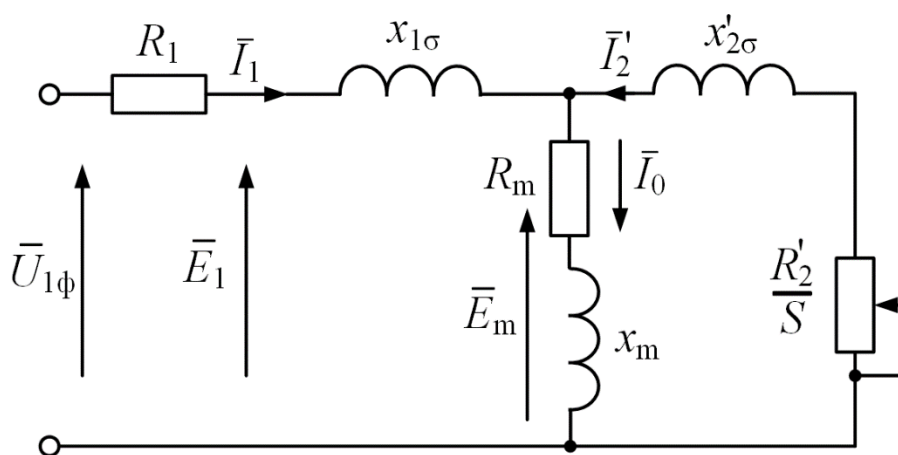


Рисунок 6.5 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - j \cdot x_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - \bar{R}_1 \cdot \bar{I}_1 = 0 \\ \bar{E}_1 + j \cdot x'_{2\sigma} \cdot \bar{I}'_2 + \frac{\bar{R}'_2}{s} \cdot \bar{I}'_2 = 0 \\ \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0, \end{cases} \quad (6.34)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение обмотки статора двигателя, В; E_1 – ЭДС обмотки статора, В; $x_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом; R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; $x'_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; R'_2 – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; I_1 – ток обмотки статора, А; I'_2 – ток обмотки ротора, приведенный к обмотке статора, А; I_0 – ток холостого хода обмотки статора, А.

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений асинхронного двигателя, удовлетворяющая системе уравнений (6.34), изображена на рисунке 6.6.

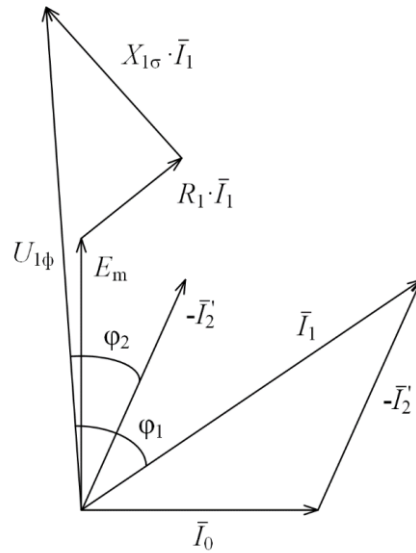


Рисунок 6.6 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Ток ротора I_2' , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью, получаемой непосредственно из схемы замещения асинхронного двигателя:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}, \quad (6.35)$$

где $X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Уравнение $I_2 = f(s)$ называется электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представляет интерес другая электромеханическая характеристика: $I_1 = f(s)$, отражающая зависимость тока статора I_1 от скольжения s . Ток статора I_1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания I_0 и вектора тока ротора I_2' (рисунок 6.6):

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{00} + \bar{I}_2'. \quad (6.36)$$

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя I_0 реактивным, ток статора I_1 через приведенный ток ротора I_2' можно найти по формуле [7]:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (6.37)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}. \quad (6.38)$$

Основной выходной координатой силового привода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя определяется по выражению:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R'_2 \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]}, \quad (6.39)$$

где m_1 – число фаз статора.

Механическая характеристика (6.39) асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые находятся при условии $dM/ds = 0$.

Тогда критический момент:

$$M_k = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2})}, \quad (6.40)$$

критическое скольжение:

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}}. \quad (6.41)$$

Знак «+» означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

Уравнение механической характеристики асинхронного двигателя (6.39) можно преобразовать к более удобному для пользования выражению – формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \alpha \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot \alpha \cdot s_k}, \quad (6.42)$$

где $\alpha = R_1/R'_2$ – коэффициент.

Двигатели средней и большой мощности имеют малое активное сопротивление R_1 , в этом случае коэффициентом α можно пренебречь, а выражение (6.42) преобразуется в упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}. \quad (6.43)$$

Задаваясь скольжением s , можно по выражениям (6.42) или (6.43) построить механические характеристики асинхронного двигателя.

Естественные механическая и электромеханическая характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя представлены на рисунке 6.7.

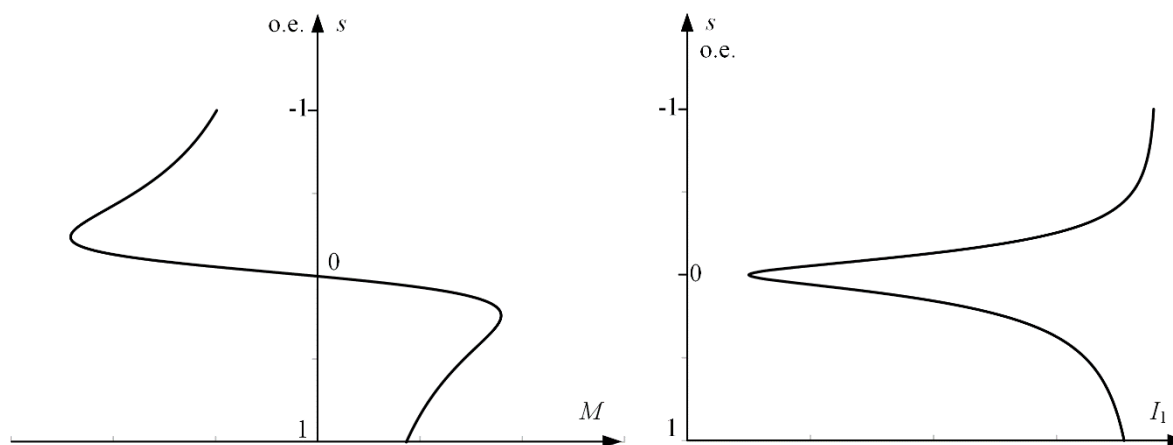


Рисунок 6.7 – Статические характеристики асинхронного двигателя:
а – механическая, б – электромеханическая

Пример 6.3. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа 4А112МВ6У3 рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую статические характеристики.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя $P_H = 4$ кВт;
- номинальное фазное напряжение $U_{1\phi H} = 220$ В;
- номинальное скольжение $s_H = 0,051$ о. е.;
- номинальный ток обмотки статора $I_{1H} = 9,13$ А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора $R_1 = 1,88$ Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора $X_{1\sigma} = 2,25$ Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора $R'_2 = 1,39$ Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, $X'_{2\sigma} = 2,99$ Ом;
- номинальное скольжение $s_H = 0,051$ о. е.;
- кратность пускового тока $I_n / I_{1H} = k_i = 6$ о. е.;
- кратность максимального момента $M_{\max} / M_H = k_{\max} = 2,2$ о. е.;
- кратность минимального момента $M_{\min} / M_H = k_{\min} = 1,6$ о. е.

Решение

Определим синхронную угловую скорость двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением (6.39):

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R'_2 \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,39}{104,7 \cdot \left[\left(1,88 + \frac{1,39}{s} \right)^2 + (2,25 + 2,99)^2 \right]}.$$

Механическая характеристика, рассчитанная по формуле (6.39), приведена на рисунке 6.8.

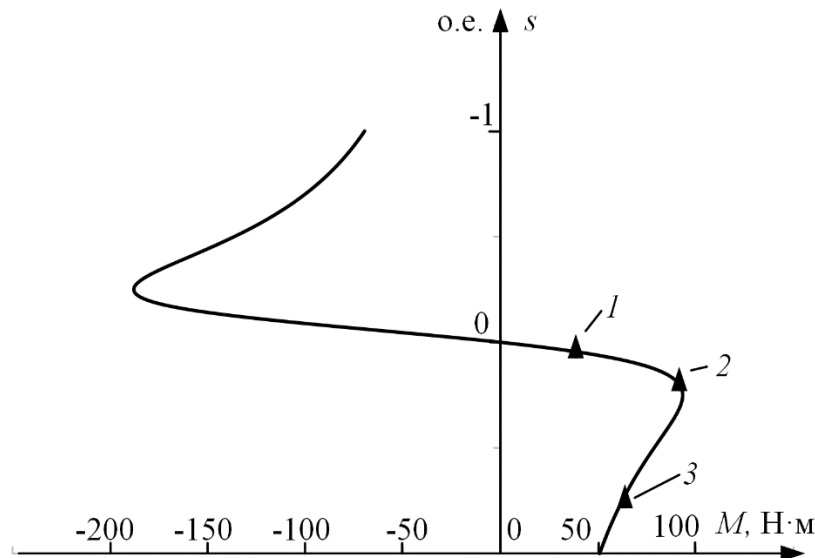


Рисунок 6.8 – Естественная механическая характеристика АД: 1 – момент номинальный; 2 – момент максимальный; 3 – момент минимальный

Определим дополнительные параметры двигателя:

– Критический момент двигательного режима:

$$M_K = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2})}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot (1,88 + \sqrt{1,88^2 + 5,24^2})} = 93,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– Критическое скольжение:

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \pm \frac{1,39}{\sqrt{1,88^2 + 5,24^2}} = \pm 0,246 \text{ о. е.}$$

– Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 104,7 \cdot (1 - 0,051) = 99,4 \frac{\text{Рад}}{\text{с}}.$$

– Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{4000}{99,4} = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– Максимальный момент двигателя:

$$M_k = k_{max} \cdot M_H = 2,2 \cdot 40,3 = 88,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Минимальный момент двигателя:

$$M_{min} = k_{min} \cdot M_H = 1,6 \cdot 40,3 = 64,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найденные координаты точек с номинальным, максимальным и минимальным моментом нанесены на рассчитанный график (рисунок 6.8) естественной механической характеристики асинхронного двигателя в виде треугольников.

Вывод. Анализ расчетов показывает, что контрольные точки, найденные в соответствии с каталожными данными двигателя, хорошо совпадают с рассчитанным графиком механической характеристики асинхронного двигателя, поэтому методику определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным можно считать приемлемой.

Определим зависимость тока ротора I'_2 , приведенного к обмотке статора, от скольжения s :

$$I'_2 = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,8 + \frac{1,39}{s}\right)^2 + 5,24^2}}.$$

График электромеханической характеристики $I'_2 = f(s)$, рассчитанный по уравнению (6.35), приведен на рисунке 6.9.

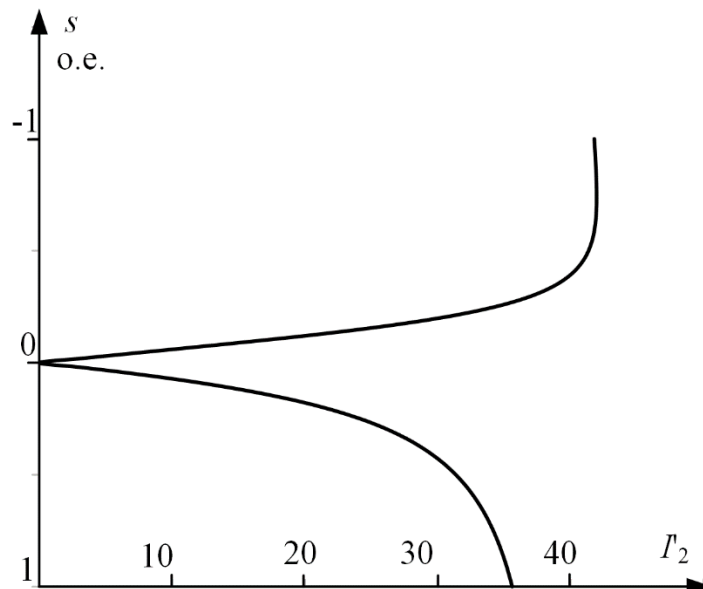


Рисунок 6.9 – График электромеханической характеристики $I'_2 = f(s)$

Электромеханическую характеристику $I_1 = f(s)$ рассчитаем по выражению (6.37) с учетом тока I'_2 , найденного по уравнению (6.35), тогда

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}$$

$$= \sqrt{4,05^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 4,05 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{5,17}{\sqrt{\left(1,88 + \frac{1,39}{s}\right)^2 + 5,24^2}}.$$

Электромеханическая характеристика $I_1 = f(s)$ приведена на рисунке 6.10.

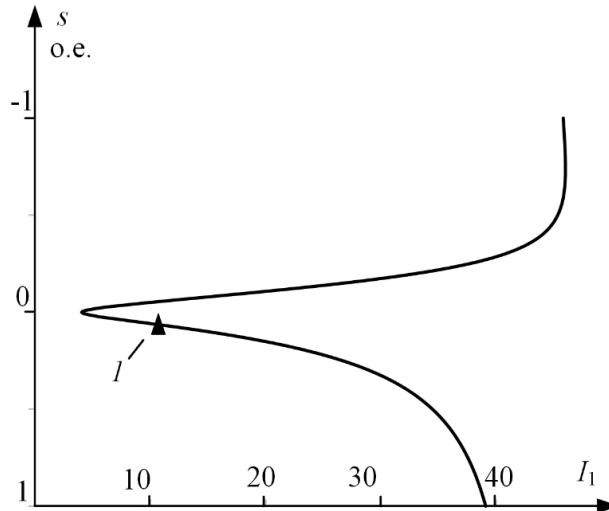


Рисунок 6.10 – График естественной электромеханической характеристики: $I_1 = f(s)$ асинхронного двигателя: I – координаты точки с номинальными параметрами двигателя

Определим номинальный ток статора асинхронного двигателя $I_{1н}$ при номинальном скольжении $s_n = 0,051$ в соответствии с электромеханической характеристикой.

Номинальный ток ротора двигателя при номинальном скольжении:

$$I_{2н}' = \frac{U_{1фн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(1,88 + \frac{1,39}{0,051}\right)^2 + 5,24^2}} = 7,42 \text{ А.}$$

Синус угла между вектором фазного напряжения $\bar{U}_{1ф}$ и сопряженным вектором тока ротора $-\bar{I}_2'$ (см. рисунок 6.7):

$$\sin \varphi_{2н} = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{5,17}{\sqrt{\left(1,88 + \frac{1,39}{0,051}\right)^2 + 5,24^2}} = 0,0595.$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}$$

$$= \sqrt{4,05^2 + 7,42^2 + 2 \cdot 4,05 \cdot 7,42 \cdot 0,00595} = 9,06 \text{ А.}$$

Вывод. Значение номинального тока статора асинхронного двигателя, определенное по его электромеханической характеристике, практически совпадает со значением, рассчитанным по каталожным данным: $I_{1н} = 9,13 \text{ А}$ (см. пример 6.1). Это подтверждает правильность методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным.

6.6. Расчет основных элементов силовых цепей электропривода

Расчет величины добавочного сопротивления ротора двигателя $R'_{2д}$ удобно производить по расчетной формуле метода отрезков, записанного для асинхронного двигателя:

$$R'_{2ди} = R'_2 \cdot \left(\frac{s_{иi}}{s_e} - 1 \right) \text{ Ом.} \quad (6.44)$$

где $s_{иi} = (\omega_0 - \omega_{иi})/\omega_0$ – скольжение двигателя при моменте M_{ci} на реостатной характеристике, о. е.; s_e – скольжение, соответствующее моменту M_{ci} на естественной характеристике, о. е.; R'_2 – активное фазное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом.

Величина регулировочного сопротивления, непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по формуле:

$$R_{2i} = \frac{R'_{2ди} - R'_2}{k_e^2} \text{ Ом,} \quad (6.45)$$

где k_e – коэффициент трансформации ЭДС, который можно приближенно определить, зная номинальное линейное напряжение статора $U_{1лн} = \sqrt{3} \cdot U_{1фн}$ и ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора $E_{2рн}$:

$$k_e \approx 0,95 \cdot \frac{U_{1лн}}{E_{2рн}}. \quad (6.46)$$

Расчет величины добавочного сопротивления ротора асинхронного двигателя $R'_{2д}$ можно произвести и аналитически, найдя его из формулы Клосса (6.42), заменив для простоты вычислений $a \cdot s_k$ на $q = a \cdot s_k$:

$$M = M_k \cdot \frac{2 \cdot (q + 1)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot q}, \quad (6.47)$$

где s – текущее скольжение ротора.

Скольжение ротора критическое:

$$s_{ки} = \frac{R'_2 + R'_{2ди}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}}. \quad (6.48)$$

Решая выражение (6.48) при заданных s_{ni} и M_{ci} относительно s_{ki} , получим:

$$s_{ki} = s_{ni} \cdot \left(\frac{(1+q) \cdot M_k}{M_{ci}} - q + \sqrt{\left(\frac{(1+q) \cdot M_k}{M_{ci}} - q \right)^2 - 1} \right). \quad (6.49)$$

Тогда из выражения (6.48):

$$R'_{2di} = s_{ki} \cdot \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} - R'_2 \text{ Ом.} \quad (6.50)$$

Проверка сопротивлений по нагреву выполняется, как правило, после расчета переходных процессов.

Для асинхронных двигателей пуск, реверс, торможение, а также регулирование скорости должны осуществляться при наложенных на ток и момент ограничениях:

- Ограничение момента осуществляется путем ограничения тока якоря.

- Ограничение тока необходимо также для защиты двигателя от перегрузок в переходных режимах. Максимальный ток двигателя $I_{дв.мах}$ следует ограничить из-за возникающих динамических усилий в обмотках и нагрева обмоток большим пусковым током [8].

- Для некоторых производственных механизмов необходимо ограничивать на допустимом уровне ускорение $(d\omega/dt)_{доп}$ рабочих органов в переходных режимах [8].

Таким образом, ток двигателя определяется допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности, допустимой перегрузкой двигателя по току и допустимым ускорением перемещения рабочего органа производственного механизма. Если дополнительных условий не задано, то максимальный ток ротора двигателя определяется из условия ограничения динамических усилий в обмотках и нагрева обмоток большим пусковым током.

В асинхронных электроприводах с фазным ротором с релейно-контакторной схемой управления ток ротора ограничивают введением на время пуска в цепь обмотки ротора двигателя добавочных сопротивлений. Введение сопротивления пускового резистора в цепь ротора уменьшает пусковой ток и настолько увеличивает $\cos\phi_p$, что пусковой момент возрастает. Кратности момента становятся почти равными кратностям тока. Схема силовых цепей при реостатном пуске асинхронного двигателя приведена на рисунке 6.11.

Схема содержит двигатель M , контакт пускателя KM , три последовательно включенных добавочных сопротивления $R_{2д1}$, $R_{2д2}$, $R_{2д3}$, которые шунтированы замыкающими контактами $KM1$, $KM2$ и $KM3$.

Максимальные пусковые пики моментов $M_{мах}$ асинхронных двигателей желательно принимать из условия:

$$M_{мах} = 0,85 \cdot M_k. \quad (6.51)$$

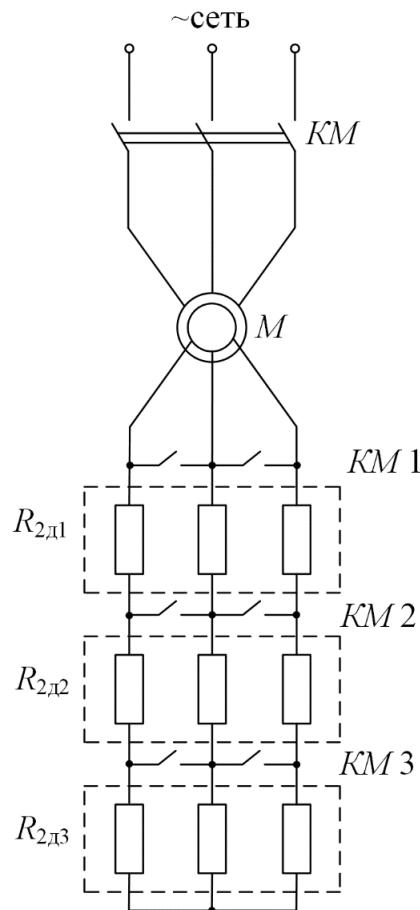


Рисунок 6.11 – Схема силовых цепей асинхронного двигателя

Для двигателей малой мощности допускается принимать пики момента, равные критическому M_k .

Момент переключения $M_{пер}$ следует выбирать из условия:

$$M_{пер} = (1,1 - 1,3) \cdot M_H. \quad (6.52)$$

Примерный вид механических характеристик при пуске асинхронного двигателя в три ступени пусковых сопротивлений приведен на рисунке 6.12.

Порядок построения пусковых характеристик следующий:

- строится естественная или регулировочная характеристика 4 с заданной рабочей скоростью ω_{yi} . Строится первая пусковая механическая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: синхронная скорость ω_0 при моменте двигателя, равном нулю ($M = 0$), и допустимый момент M_{max} при скорости, равной нулю ($\omega = 0$);

- определяется момент переключения $M_{пер}$, который принимается равным:

$$M_{пер} = (1,1 \div 1,3) \cdot M_H.$$

- в точке с координатами $(M_{пер}, \omega_{п1})$ происходит шунтирование первого пускового сопротивления $R_{д1}$, и двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Таким образом, характеристика 2 проходит через две точки:

синхронной скорости ω_0 при моменте двигателя, равном нулю ($M = 0$), и максимальном моменте M_{\max} при скорости, равной $\omega_{п1}$.

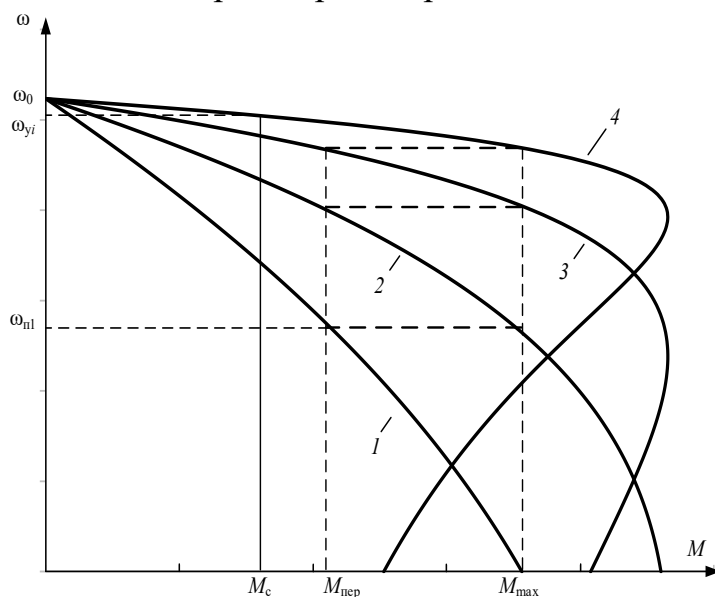


Рисунок 6.12 – Механические характеристики реостатного пуска асинхронного двигателя в три ступени

Шунтирование второго $R_{2д2}$ и третьего $R_{2д3}$ пускового сопротивления также необходимо производить при моменте переключения $M_{пер}$. Бросок момента при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен максимальному моменту M_{\max} . Если этого не происходит, то момент переключения $M_{пер}$ необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если момент переключения становится меньше $1,1 \cdot M_n$, то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений.

Все построения удобно выполнять в программной среде MathCAD в численных значениях параметров асинхронного двигателя, тогда за 2–3 итерации удастся построить все пусковые характеристики и определить пусковые сопротивления. Подробнее описано в Приложении 2.

Конечный график пусковых статических характеристик должен выглядеть так, как показано на рисунке 6.12: в этом случае при заданном числе пусковых ступеней переходный процесс будет протекать за меньшее время по сравнению с другими вариантами построения пусковых механических характеристик.

Расчет величин пусковых сопротивлений $R'_{2ди}$ можно произвести аналитически, последовательно в соответствии с уравнениями (6.49), (6.50).

Значение пускового сопротивления $R_{2ди}$, непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по формуле:

$$R_{2ди} = \frac{R'_{2ди}}{k_e^2} \text{ Ом.} \quad (6.53)$$

6.7 Тормозные режимы работы электроприводов

В электроприводах с релейно-контакторными схемами управления применяются все три вида электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

Рекуперативное торможение обычно применяется для реверсивных электроприводов с активной нагрузкой, при работе электропривода в четвертом квадранте – с угловой скоростью, большей скорости идеального холостого хода (синхронной скорости). Электромеханическая и механическая характеристики режима рекуперативного торможения являются продолжением характеристик двигательного режима работы электрических машин и рассчитываются по уравнениям (6.35), (6.37), (6.42) – для асинхронного двигателя.

Торможение противовключением применяется для реверсивных электроприводов, в которых замедление электропривода переходит в режим пуска в противоположном направлении или только для быстрой неавтоматической остановки. Режим торможения противовключением используется также для работы с установившейся скоростью электроприводов с активной нагрузкой в четвертом квадранте.

Динамическое торможение, как правило, применяется для нереверсивных электроприводов. Оно применяется и для реверсивных электроприводов с реактивной нагрузкой, требующих автоматической остановки. Для электроприводов с активной нагрузкой режим динамического торможения используется для работы с малой установившейся скоростью в четвертом квадранте. Схема включения асинхронной электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рисунке 6.13.

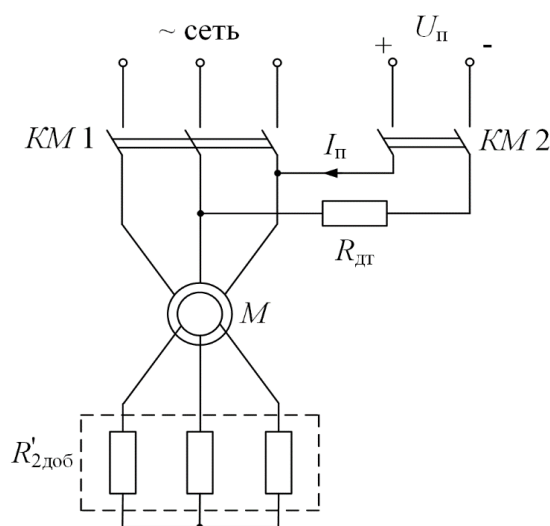


Рисунок 6.13 – Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

В электроприводах с асинхронными двигателями режим динамического торможения возникает при отключении обмоток статора от сети переменного

напряжения контактором KM и подключении ее через добавочное сопротивление динамического торможения $R_{дт}$, которое ограничивает ток статора на допустимом уровне, к источнику постоянного напряжения контактором $KM 2$.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной в режиме динамического торможения, определяется уравнением [9]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кдт}}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}}, \quad (6.54)$$

где $v = \omega / \omega_0$ – относительная скорость;

$$v_k = \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{X_{mн} + X'_{2\sigma}}, \quad (6.55)$$

относительная критическая скорость;

$$M_{кдт} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot X_{mн}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (X_{mн} + X'_{2\sigmaн})}, \quad (6.56)$$

критический момент асинхронного двигателя в режиме динамического торможения.

Значение постоянного тока намагничивания, эквивалентное переменному току статора I_1 , определяется из условия:

$$I_n = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1 \approx 1,23 \cdot I_1. \quad (6.57)$$

Из выражения (6.57) следует, что постоянный ток, создающий магнитный поток, должен быть больше переменного тока намагничивания статора I_1 . Это объясняется размагничивающим действием ротора [8].

Решим (6.56) относительно тока статора I_1 :

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{кдт} \cdot (X_{mн} + X'_{2\sigmaн})}{3 \cdot X_{mн}^2}}. \quad (6.58)$$

Задаваясь критическим моментом асинхронного двигателя в режиме динамического торможения $M_{кдт}$, при известных параметрах схемы замещения асинхронного двигателя, можно найти эквивалентный ток статора I_1 , а затем и постоянный ток динамического торможения I_n . Очевидно, что критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения не должен превышать максимальный момент пусковых характеристик двигательного режима работы электрической машины:

$$M_{кдт} \leq M_{max} = 0,85 \cdot M_k. \quad (6.59)$$

Для двигателя с фазным ротором при активной нагрузке рабочего органа производственного механизма можно регулировать скорость в режиме динамического торможения изменением добавочного сопротивления $R'_{2доб}$.

Порядок расчета добавочного сопротивления $R'_{2\text{доб}}$, включаемого в цепь обмотки ротора, следующий:

– для найденной по выражению (6.1) установившейся скорости ω_{y1} определяем относительное значение установившейся скорости:

$$v_{y1} = \frac{\omega_{y1}}{\omega_0} \text{ о. е.}, \quad (6.60)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость двигателя;

– рассчитываем значения момента сопротивления рабочего органа производственного механизма, приведенного к валу двигателя:

$$M_{ci} = \frac{M_i}{i_{\text{ст.р}}} \cdot \eta_{\text{п}} \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.61)$$

– задаемся критическим моментом асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, равном критическому моменту асинхронного двигателя в двигательном режиме работы:

$$M_{\text{кдт}} = M_{\text{к}}; \quad (6.62)$$

– зная критический момент динамического торможения $M_{\text{кдт}}$ и параметры схемы замещения асинхронного двигателя, можно найти ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} \cdot (X_{\text{тн}} + X'_{2\sigma\text{н}})}{3 \cdot X_{\text{тн}}^2}}. \quad (6.63)$$

– найдем значение постоянного тока намагничивания, эквивалентное переменному току статора I_1 , в соответствии с выражение (6.57):

$$I_{\text{п}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1 \approx 1,23 \cdot I_1; \quad (6.64)$$

– для найденных значений относительной скорости v_{y1} , критического момента двигателя в режиме динамического торможения $M_{\text{кдт}}$ и момента сопротивления M_{ci} определим относительную скорость $v_{\text{к}}$, для чего решим уравнение (6.54) относительно $v_{\text{к}}$:

$$v_{\text{к}} = \frac{M_{\text{кдт}}}{M_{ci}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{кдт}}}{M_{ci}}\right)^2 - v_{y1}}; \quad (6.65)$$

– из уравнения (6.55) определяем добавочное сопротивление:

$$R_{2\text{доб}} = v_{\text{к}} \cdot (X_{\text{тн}} + X'_{2\sigma\text{н}}) - R'_2; \quad (6.66)$$

– сопротивление динамического торможения, непосредственно включаемое в роторную цепь двигателя, находится по формуле (6.53):

$$R_{2\text{доп}} = \frac{R'_{2\text{доп}}}{k_e^2} \text{ Ом}. \quad (6.67)$$

Очевидно, что включение сопротивления $R_{2\text{доб}}$ в роторную цепь двигателя возможно только для двигателей с фазным ротором.

Пример 6.4. Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ рассчитать и построить механическую характеристику динамического торможения.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя $P_H = 4$ кВт;
- номинальное фазное напряжение $U_{1H} = 220$ В;
- номинальное скольжение $s_H = 0,051$ о. е.;
- номинальный ток обмотки статора $I_{1H} = 9,13$ А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора $R_1 = 1,88$ Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора $X_{1\sigma} = 2,25$ Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора $R'_2 = 1,393$ Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, $X'_{2\sigma} = 2,99$ Ом;
- индуктивное сопротивление контура намагничивания $X_{mH} = 48,0$ Ом;
- кратность пускового тока $I_H/I_{1H} = k_i = 6$ о. е.;
- кратность максимального момента $M_{\max}/M_H = k_{\max} = 2,2$ о. е.;
- кратность минимального момента $M_{\min}/M_H = k_{\min} = 1,6$ о. е.

Решение

- Определим синхронную угловую скорость двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{Рад}}{\text{с}}; \quad (6.68)$$

- Найдем номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{4000}{99,4} = 40,3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.69)$$

- Определим максимальный момент двигателя:

$$M_K = k_{\max} \cdot M_H = 2,2 \cdot 40,3 = 88,6 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.70)$$

- Определим критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения:

$$M_{\text{кдт}} = 0,85 \cdot M_K = 0,85 \cdot 88,6 = 77,3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.71)$$

- Найдем эквивалентный переменный ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} \cdot (X_{mH} + X'_{2\sigma H})}{3 \cdot X_{mH}^2}} \quad (6.72)$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 77,3 \cdot (48,0^2 + 2,99)}{3 \cdot 48,0^2}} = 10,8 \text{ А};$$

- Определим относительную критическую скорость:

$$v_k = \frac{R'_2}{X_{mH} + X'_{2\sigma H}} = \frac{1,39}{48,0 + 2,99} = 0,273 \text{ о. е.} \quad (6.73)$$

Добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует ($R'_2_{\text{доб}} = 0$), т. к. в данном случае асинхронный двигатель – с короткозамкнутым ротором;

– Расчет механической характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, произведем в соответствии с выражением (6.54), подставляя в него значения относительной скорости от -1 до 1 :

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кдт}}}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}} = \frac{2 \cdot 75,3}{\frac{0,273}{v} + \frac{v}{0,273}}. \quad (6.74)$$

Механическая характеристика динамического торможения асинхронного двигателя приведена на рисунке 6.14.

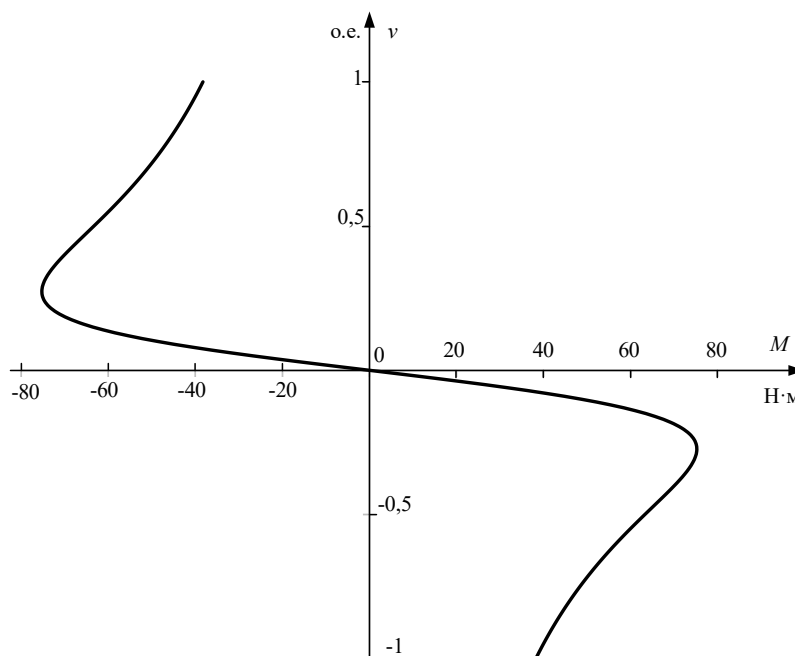


Рисунок 6.14 – Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Как следует из анализа рисунка 6.14, механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения располагаются во втором и четвертом квадрантах. Торможение электродвигателя при любой скорости производится моментом, превышающим номинальный момент двигателя $M_H = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

6.8 Расчет переходных процессов и нагрузочных диаграмм асинхронного электропривода

В РГР должен быть выполнен расчет переходных процессов для тока, электромагнитного момента и угловой скорости двигателя за цикл работы электропривода. Метод расчета переходных процессов выбирается в

соответствии с типом электропривода, формой механической характеристики производственного механизма и двигателя.

Переходные процессы электропривода с асинхронным двигателем *на линейных участках* статических характеристик двигателя и производственного механизма рассчитываются по формулам:

$$I = I_{уст} + (I_{нач} - I_{уст}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (6.75)$$

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (6.76)$$

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (6.77)$$

где $I_{нач}$ – начальное значение тока двигателя, А; $I_{уст}$ – установившееся значение тока двигателя при моменте нагрузки $M_c = M_{уст}$, А; $\omega_{уст}$ – установившаяся угловая скорость двигателя при моменте нагрузки $M_c = M_{уст}$, рад/с; $\omega_{нач}$ – начальное значение угловой скорости, рад/с; T_M – электромеханическая постоянная времени электропривода, с.

На рисунке 6.15 показаны реостатные механические характеристики асинхронного привода, которые можно принять линейными, это связано с величиной включенного сопротивления. Расчет электромеханических постоянных времени T_{mi} для каждой из реостатных характеристик осуществляется в соответствии со следующими выражениями:

$$T_{mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega_i}{\Delta M_i} \text{ или } T_{mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яцi}}{c^2}, \quad (6.78)$$

где $\Delta\omega_i$, ΔM_i – соответствующие друг другу приращения скорости и момента на i -й характеристике; $R_{яцi}$ – суммарное сопротивление якорной цепи на соответствующей характеристике, Ом; c – коэффициент ЭДС, В·с/рад; J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м²;

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{д} + J_{м} \cdot \frac{1}{i_{ст.р}^2}, \quad (6.79)$$

где $k = (1,05 \div 1,3)$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора; $J_{дв}$ – момент инерции двигателя, кг·м²; $J_{м}$ – момент инерции производственного механизма, кг·м²; $i_{ст.р}$ – стандартное передаточное отношение редуктора.

Время $t_{ппi}$ работы двигателя на i -й характеристике при изменении момента в пределах от $M_{нач}$ до $M_{кон}$ определяется по формуле

$$t_{ппi} = T_{mi} \cdot \ln \frac{M_{нач} - M_{уст}}{M_{кон} - M_{уст}}, \quad (6.80)$$

где $M_{нач}$, $M_{кон}$ – начальное и конечное значения моментов асинхронного двигателя, взятые из линейной части графика механической характеристики.

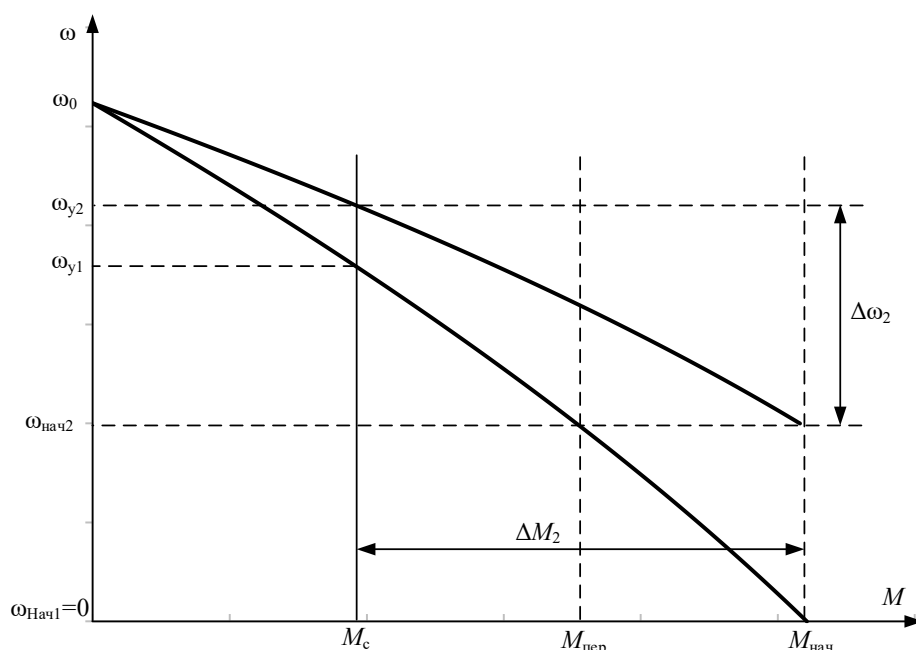


Рисунок 6.15 – Реостатные механические характеристики двигателя

Так, например, для определения времени переходного процесса при пуске двигателя из неподвижного состояния до скорости $\omega_{\text{нач}2}$ (см. рисунок 6.15) в уравнение (6.80) необходимо подставить $M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}}$, $M_{\text{кон}} = M_{\text{пер}}$ и $M_{\text{уст}} = M_{\text{с}}$.

$M_{\text{с}}$ – значение момента в точке физически установившегося режима работы электродвигателя.

Если рассматривается участок, где конечное значение равно установившемуся, то время рассчитанное по выражению (6.80) будет равно бесконечности. В таком случае пользуются теоретическим временем вхождения в 5 %-ную зону:

$$t_{\text{пп}i} = 3 \cdot T_{\text{м}i}. \quad (6.81)$$

Если переходный процесс протекает на нелинейном участке механической характеристики асинхронного двигателя, то его определяют, например, так называемым методом пропорций. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости $d\omega$ и времени dt малыми конечными приращениями $\Delta\omega$ и Δt .

График нелинейной механической характеристики асинхронного двигателя $M_{\text{д}} = f(\omega)$ и линейной механической характеристики механизма $M_{\text{с}} = f(\omega)$ приведен на рисунке 6.16.

Построения для расчета переходных процессов методом конечных приращений ведутся в следующей последовательности:

- строятся механические характеристики электродвигателя $M_{\text{д}} = f(\omega)$ и производственного механизма $M_{\text{с}} = f(\omega)$;
- графически находится динамический момент электропривода $M_{\text{дин}}(\omega) = M_{\text{д}}(\omega) - M_{\text{с}}(\omega)$;

– кривую динамического момента $M_{\text{дин}}(\omega)$ заменяют ступенчатой с участками:

$$M_{\text{дин.ср.}i} = \frac{M_{\text{дин.маx.}i} + M_{\text{дин.мин.}i}}{2}, \quad (6.82)$$

где $M_{\text{дин.маx.}i}$, $M_{\text{дин.мин.}i}$ – максимальное и минимальное значения динамического момента на i -м участке. Точность расчетов тем выше, чем на большее число участков разбита кривая $M_{\text{дин}}(\omega)$;

– определяют время переходного процесса, которое требуется для достижения скорости $\omega_i = \omega_{\text{нач}i} + \Delta\omega_i$ на каждом участке:

$$\Delta t_i = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{дин.ср.}i}}, \quad (6.83)$$

где $\Delta\omega_i$ – приращение скорости на i -м участке. Полученные на отдельных участках элементарные промежутки времени суммируются для определения полного времени переходного процесса:

$$t = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta t_i, \quad (6.84)$$

где m – число участков разбиения механической характеристики;

– по графику электромеханической характеристики $I_1 = f(\omega)$ определяют значения тока I_{1i} , соответствующие конечной угловой скорости ω_i каждого участка.

Все производимые расчеты удобно представить в виде таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Пример таблицы для результатов вычислений при построении графиков переходных процессов

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{\text{дин}i}$	Время п.п. на рассматриваемом участке, Δt_i	Время с начала п. п., t_i	Конечное значение $M_{\text{дв}}$ на участке	Конечное значение тока I_1 на участке
1	0	0	$M_{\text{дин}1}$	0	0	$M_{\text{п}}$	$I_{1\text{кз}}$
1–2	ω_1	ω_1	$M_{\text{дин}2}$	t_1	t_1	M_2	I_{12}
2–3	ω_2	$\omega_2 - \omega_1$	$M_{\text{дин}3}$	t_2	$t_1 + t_2$	M_3	I_{13}

По итогам расчетов строятся кривые $M_{\text{д}} = f(t)$, $\omega = f(t)$, $I_1 = f(t)$ за цикл работы. Расчетные данные используются далее для проверки двигателя и основных элементов силовой цепи по нагреву и кратковременной перегрузке.

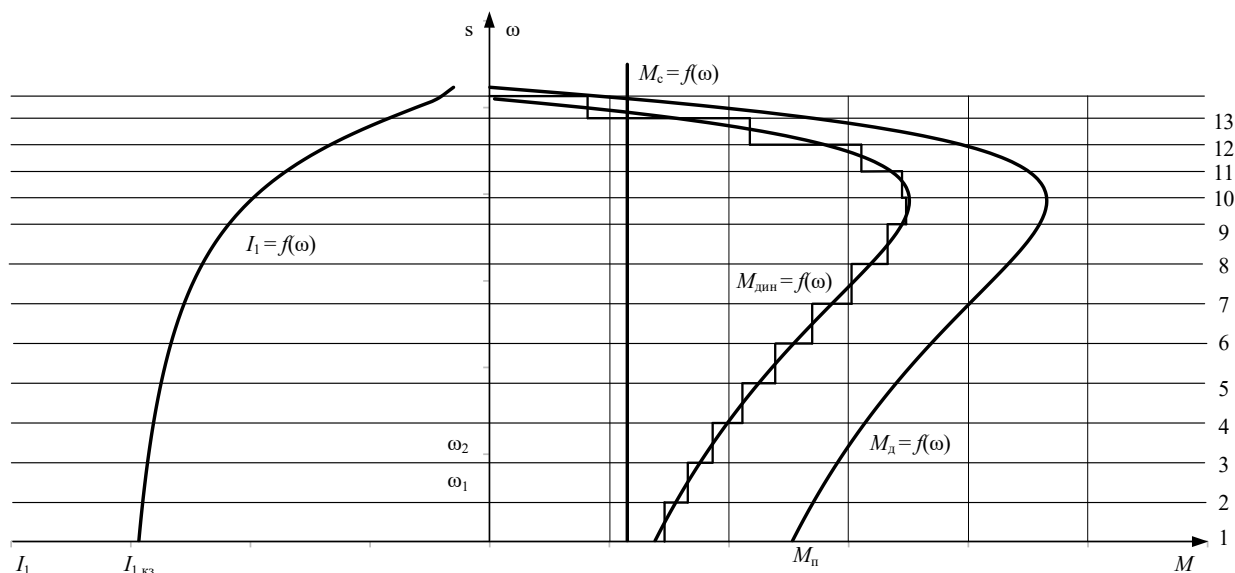


Рисунок 6.16 – Метод конечных приращений для построения графиков переходных процессов

6.9 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Проверка двигателя по нагреву производится на основе рассчитанной нагрузочной диаграммы электропривода и его режима работы.

Обычно применяются методы среднеквадратичного (эквивалентного) тока и момента. Среди этих методов в качестве основного следует применять метод эквивалентного тока, и лишь в тех случаях, когда момент двигателя пропорционален току, проверку можно выполнять методом эквивалентного момента.

В общем виде эквивалентный ток двигателя за рабочий цикл можно вычислить по следующему уравнению:

$$I_3 = \sqrt{\frac{\int_0^{\sum t_p + \sum t_{np}} I^2(t) \cdot dt}{\sum t_i \cdot \beta_i}}, \quad (6.85)$$

где I_3 – искомое значение эквивалентной величины тока, А; $\sum t_p$ – суммарное время работы за цикл, с; $\sum t_{np}$ – суммарное время переходных процессов за цикл, с; t_i – время работы на i -м участке, с; β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м участке.

Суммарное время состоит из рабочего времени и интервала времени пауз при продолжительном режиме и только из рабочего времени при повторно-кратковременном и кратковременном режимах. Необходимо отметить, что при повторно-кратковременном и кратковременном режимах эквивалентные величины пересчитываются соответственно на каталожные значения продолжительности включения и длительности работы в соответствии с выражением (6.6):

$$I_{\kappa} = I_{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\varepsilon}}{ПВ_{\kappa}}} \text{ А.} \quad (6.86)$$

Пересчитанная величина тока I_{κ} сопоставляется с номинальной величиной тока $I_{\text{н}}$ выбранного двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$I_{\kappa} \leq I_{\text{н}}, \quad (6.87)$$

где I_{κ} – пересчитанная на каталожную эквивалентная величина тока, А; $I_{\text{н}}$ – номинальное значение тока, А.

Асинхронный двигатель должен быть также проверен по допустимой нагрузке из условия, что:

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} \leq \lambda, \quad (6.88)$$

где M_{max} – максимальное значение момента; $M_{\text{н}}$ – номинальное значение момента; λ – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту.

Если окажется, что условия (6.87) или (6.88) не выполняются, то необходимо выбрать двигатель большей мощности из условия перегрузки.

6.10 Разработка схемы управления электроприводом

Автоматизация процесса пуска двигателя значительно облегчает управление электроприводами, предотвращает возможные ошибки при пуске двигателя и ведет к повышению производительности механизмов.

На рисунке 6.17 приведены графики переходных процессов скорости и тока при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором в две ступени пусковых сопротивлений.

Анализ этих графиков показывает, что автоматическое выключение пусковых сопротивлений должно производиться в определенные моменты времени (t_1 и t_2), при определенных скоростях ($\omega_{\text{п1}}$ и $\omega_{\text{п2}}$) и определенном токе $I_{\text{пер}}$. Очевидно, что управление пуском двигателя может осуществляться по *принципам времени, скорости и тока*.

Принцип времени предполагает, что в электрической схеме имеются контролирующие время аппараты, которые в заданные моменты времени t_1 и t_2 формируют сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений $R_{\text{д3}}$ и $R_{\text{д2}}$ (см. рисунок 6.11).

Принципы скорости и тока предполагают, что электрическая схема электропривода автоматически контролирует соответственно скорость двигателя и его ток и при заданных значениях переменных формирует сигналы на шунтирование пусковых сопротивлений.

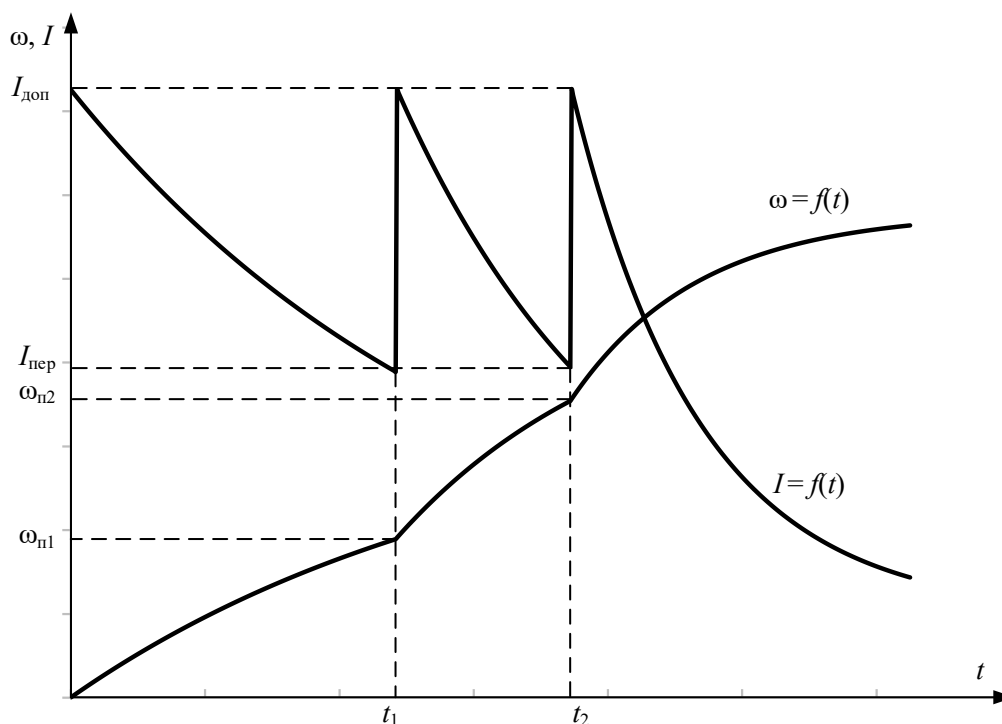


Рисунок 6.17 – Примерные графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя в две ступени

Кроме этих трех принципов управления, на практике получило распространение управление по принципу пути, мощности, счета операций и т. д.

В релейно-контакторных электроприводах наиболее распространенными датчиками времени, скорости и тока являются соответствующие реле или контакторы. Так, наиболее распространенным датчиком времени является реле времени, в качестве датчика тока чаще всего используют реле тока, обмотка которого непосредственно включается в якорную цепь двигателя. Датчиком скорости в релейно-контакторных схемах управления электроприводами служит непосредственно сама обмотка двигателя, ЭДС которой пропорциональна скорости вращения. Контролирующими же ЭДС двигателя аппаратами являются силовые контакторы.

Управление пуском асинхронного двигателя с фазным ротором по принципу времени.

Схема силовых цепей электропривода приведена на рисунке 6.18. Питание асинхронного двигателя осуществляется от трехфазной сети переменного тока через рубильник $QF1$. Пуск асинхронного двигателя и регулирование его скорости осуществляются с помощью силовых контактов цепи обмотки статора KM ; в роторную цепь двигателя M включены два регулировочных резистора — $R_{2доб1}$, $R_{2доб2}$ и два пусковых резистора — $R_{2доб3}$, $R_{2доб4}$, которые шунтируются силовыми контактами схемы: регулировочным $KM3$ и ускорения $KM1$, $KM2$.

Так как рассматриваемый электропривод работает в интенсивном режиме с частыми пусками и торможениями двигателя, то схема управления электроприводом выполнена на постоянном токе. Выпрямитель $VD1...VD4$ однофазный, подключен к сети переменного тока через автомат $QF2$.

Электропривод работает следующим образом. Перед его пуском включают автоматы $QF1$ и $QF2$. На схему силовых цепей подается напряжение переменного тока, а на схему управления – напряжение постоянного тока U . Подача напряжения на схему управления приводит к включению реле времени $KT1$, которое размыкает свои контакты в цепях контакторов $KM1$. Схема подготовлена к включению.

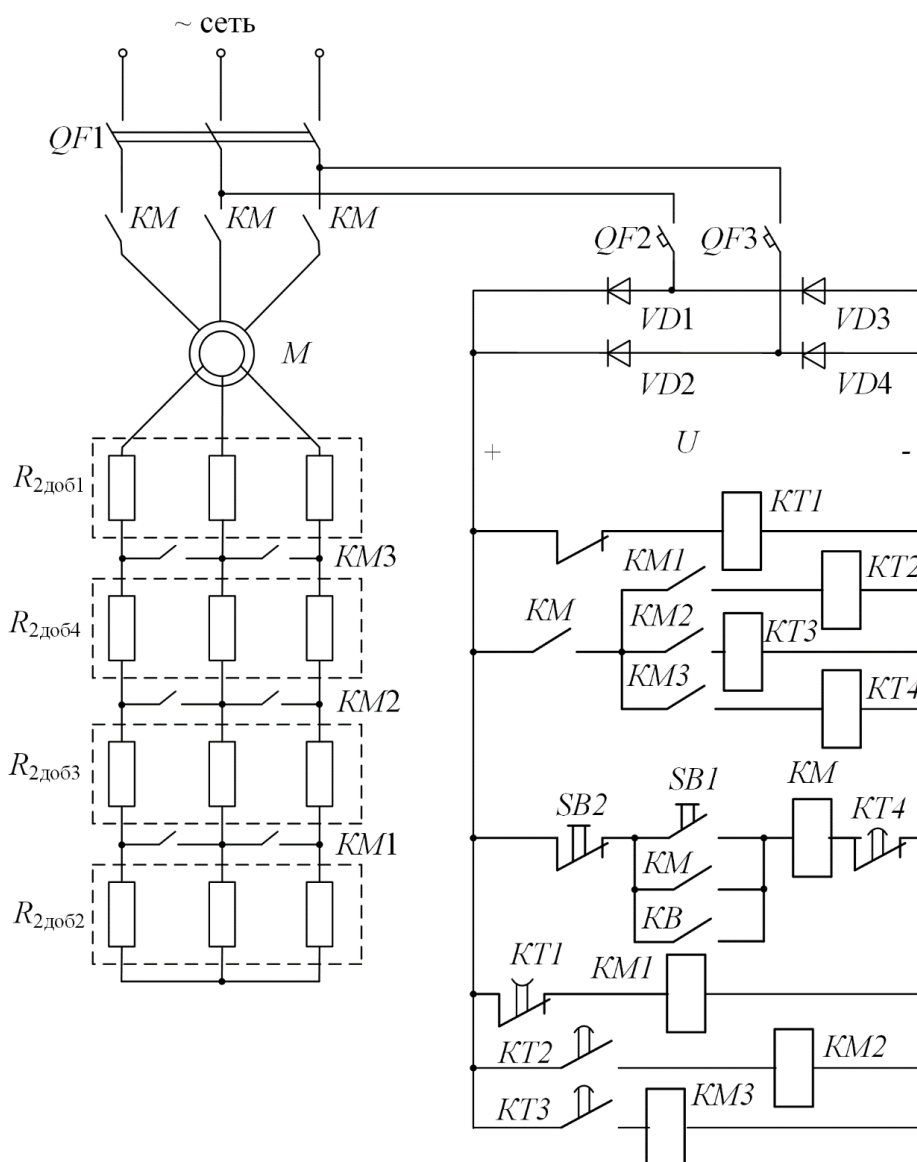


Рисунок 6.18 – Схема силовых цепей асинхронного электропривода

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки $SB1$. Если $KT4$ находится в выключенном состоянии, то срабатывает контактор KM , подключая обмотку статора асинхронного двигателя M к сети переменного

напряжения, и он начинает разгоняться по первой технологической характеристике с полностью введенными сопротивлениями в цепи обмотки ротора. Кроме того, замыкаются вспомогательные замыкающие контакты KM в цепи реле времени $KT2$, $KT3$, $KT4$ и размыкается размыкающий контакт KM в цепи реле времени $KT1$. Реле времени $KT1$, потеряв питание вследствие размыкания контакта KM , начинает отсчет выдержки времени разгона по первой технологической характеристике до первой технологической скорости $\omega_{д1}$.

Через сумму времени разгона на первой технологической характеристике и времени работы на скорости $\omega_{д1}$ размыкающий контакт $KT1$ замкнется и включится контактор $KM1$. Контактор $KM1$, включившись, закорачивает резисторы $R_{2доб2}$ в цепи обмотки ротора двигателя и одновременно своим замыкающим контактом подает напряжение питания на катушку реле времени $KT2$. Последнее включается и начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике.

По истечении времени замыкающий контакт реле времени $KT2$ замыкается. Получает питание контактор $KM2$; он, включившись, своим замыкающим контактом $KM2$ шунтирует первые пусковые резисторы $R_{2доб3}$. Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику. Получает питание реле времени $KT3$, и своим замыкающим контактом $KT3$ начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени контакт $KT3$ замыкается. Получает питание обмотка контактора $KM3$, замыкается контакт $KM3$ в роторной цепи асинхронного двигателя, шунтирующий резисторы $R_{2доб4}$, двигатель переходит на вторую технологическую характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости $\omega_{д2}$, определяемой нагрузкой $M_{с1}$.

Кроме того, замыкается контакт $KM3$ в цепях схемы управления электроприводом, включается реле времени $KT4$, и оно начинает отсчет выдержки времени пуска и работы электропривода на второй технологической характеристике.

По истечении этого времени реле времени $KT4$ размыкает свой размыкающий контакт в цепи силового контактора KM . Силовой контактор KM теряет питание и отключает обмотку статора двигателя M от трехфазной сети переменного напряжения, а в цепях схемы управления выключает все реле времени и, как следствие, все силовые контакторы.

К тому же можно преждевременно произвести остановку электропривода, для этого необходимо нажать кнопку $SB2$ «Стоп». Контактор KM потеряет питание, и произойдут процессы, описанные выше.

Торможение электродвигателя происходит *выбегом*, т. е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Повторное включение двигателя может произойти через интервал времени паузы $t_{\text{п}}$ при управлении от внешних устройств замыканием контакта KB или нажатием кнопки $SB1$ на пульте управления электроприводом.

Достоинством схемы управления, осуществляющей пуск двигателя в функции времени, является отсутствие опасности застревания двигателя на пусковых характеристиках. Простота и надежность в работе, так же как и возможность применения однотипных реле времени, привели к широкому применению электроприводов, управляемых в функции времени.

Выбор принципа автоматизации управления процессами пуска, торможения и регулирования скорости в релейно-контакторных системах управления электроприводами определяется особенностями их работы и условиями эксплуатации. Приведенные на рисунке 6.18 принципиальные схемы управления процессами пуска электроприводов разработаны для идеального электропривода. В реальном электроприводе изменяются нагрузка на валу электродвигателя, температура окружающей среды и элементов электропривода, моменты инерции механизма, напряжение питания и другие параметры (давление, влажность и т. д.). Изменение этих параметров необходимо учитывать при разработке системы управления электроприводом и ее защиты.

7 ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Задание на проектирование: разработать электропривод производственного механизма, удовлетворяющего следующим техническим условиям и требованиям:

1. В качестве регулируемого электропривода принять привод переменного тока индивидуального изготовления с параметрическим регулированием скорости изменением активного сопротивления в цепи обмотки ротора.

2. Кинематическая схема электропривода имеет вид:

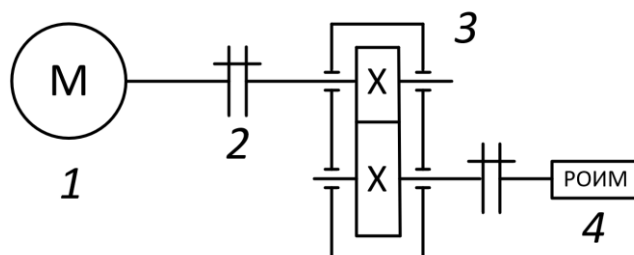


Рисунок 7.1 – Кинематическая схема электропривода: 1 – асинхронный двигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – рабочий орган

3. Электропривод должен обеспечить следующие технологические частоты вращения рабочего органа производственного механизма и время работы на этих частотах вращения:

Первая технологическая частота вращения механизма $n_{m1} = 20$ об/мин.

Время работы на первой технологической частоте вращения $t_{p1} = 20$ с.

Вторая технологическая частота вращения механизма $n_{m2} = 80$ об/мин.

Время работы на второй технологической частоте вращения $t_{p2} = 30$ с.

Время паузы $t_{п} = 110$ с.

Момент сопротивления механизма $M_{мех} = 500$ Н · м.

Характер нагрузки – реактивная.

КПД передачи при максимальной частоте вращения – 0,95.

Момент инерции механизма $J_{м} = 20$ кг · м².

7.1 Выбор типа электропривода

Основными факторами, определяющими род тока, тип и конструктивное исполнение двигателя, являются:

- показатели регулирования скорости (диапазон, плавность, стабильность скорости и т. д.);
- режим работы производственного механизма;
- производительность и надежность установки;
- основные затраты и эксплуатационные расходы на электрооборудование.

В данной работе расчет электропривода производится с асинхронным двигателем с фазным ротором, без учета технико-экономических показателей, на основании технического задания.

7.2 Построение диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма

Построим диаграммы скорости и нагрузочную диаграмму производственного механизма. Для этого рассчитаем время полного цикла работы электропривода и угловые скорости производственного механизма.

Время цикла работы механизма

$$t_{ц} = t_{p1} + t_{p2} + t_{п}, \quad (7.1)$$

где t_{p1} – время работы с частотой вращения $n_1 = 20$ об/мин; t_{p2} – время работы с частотой вращения $n_2 = 80$ об/мин; $t_{п}$ – время паузы;

$$t_{ц} = t_{p1} + t_{p2} + t_{п} = 20 + 30 + 110 = 160 \text{ с.}$$

Произведем пересчет частот вращения n_i рабочего органа производственного механизма на угловые скорости ω_i в соответствии с выражением

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}. \quad (7.2)$$

Первая технологическая скорость механизма

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3.14 \cdot 20}{30} = 2,09 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Вторая технологическая скорость механизма

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3.14 \cdot 80}{30} = 8,37 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

По данным расчетов произведем построение тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма, результаты построений приведены на рисунках 7.2 и 7.3.

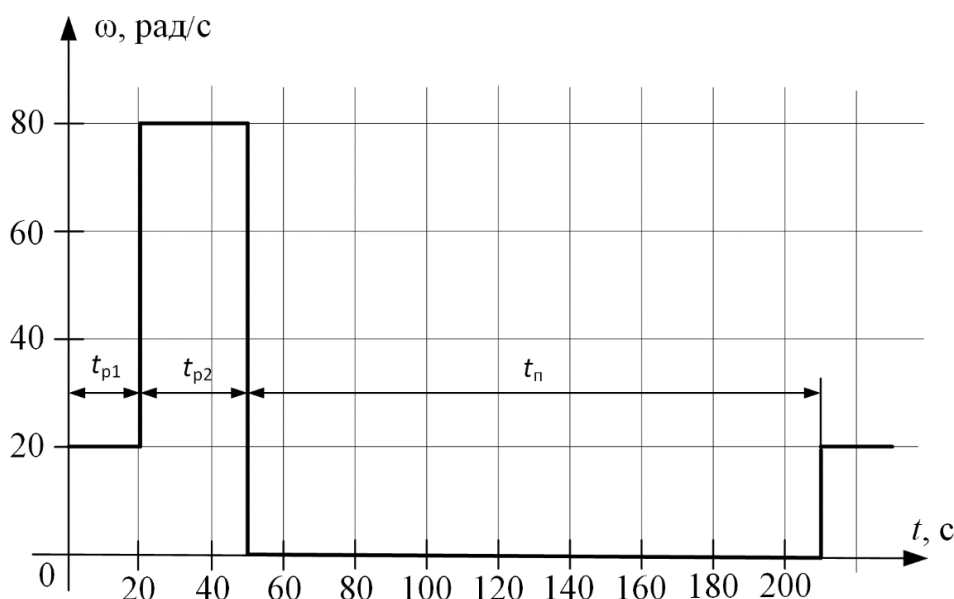


Рисунок 7.2 – Диаграмма скорости производственного механизма

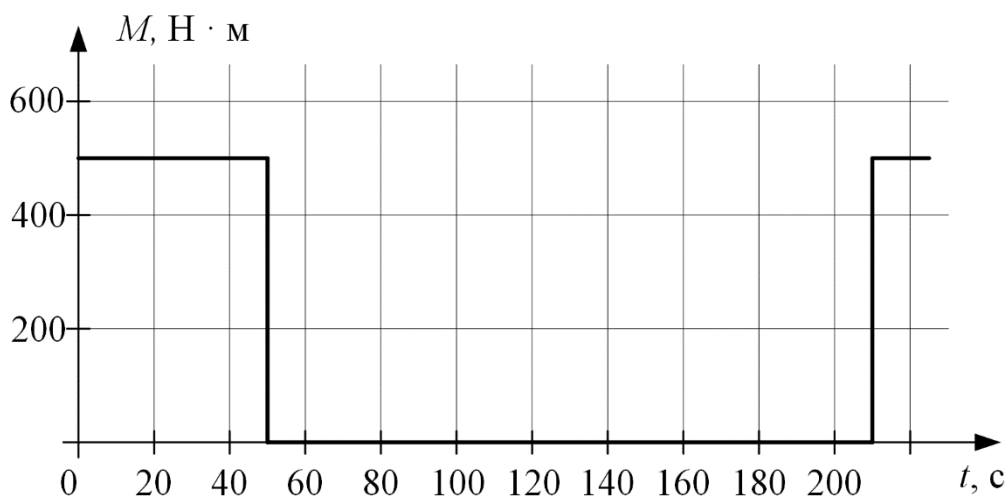


Рисунок 7.3 – Нагрузочная диаграмма производственного механизма для реактивной нагрузки

7.3 Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу

Анализ приведенных тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма показывает, что рассматриваемый электропривод работает в повторно-кратковременном режиме работы. Для повторно-кратковременного режима работы электродвигателя последовательность выбора двигателя по мощности следующая.

По нагрузочной диаграмме механизма (нагрузки отнесены к валу механизма) определяется среднеквадратичное значение мощности за время работы с помощью формулы [1]:

$$P_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{P_i \cdot \omega_{max}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}} \text{ кВт}, \quad (7.3)$$

где m – число рабочих участков в цикле; P_i – мощность на i -м интервале; t_{pi} – продолжительность i -го интервала; β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м интервале, соответствующий значению угловой скорости ω_i на этом интервале; ω_{max} – максимальная скорость производственного механизма.

При найденных угловых скоростях ω_1 , ω_2 и заданном моменте M_i производственного механизма определяем мощность при работе на каждой технологической скорости:

$$P_i = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3} \text{ кВт}. \quad (7.4)$$

Мощность при работе на первой технологической скорости:

$$P_1 = M_1 \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3} = 500 \cdot 2,09 \cdot 10^{-3} = 1,05 \text{ кВт}.$$

Мощность при работе на второй технологической скорости:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot 10^{-3} = 500 \cdot 8,37 \cdot 10^{-3} = 4,19 \text{ кВт}.$$

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной [1]:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{max}}, \quad (7.5)$$

где β_0 – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре.

Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей различного исполнения приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Значения коэффициента β_0 для двигателей различного исполнения

Исполнение двигателя	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
Исполнение двигателя	β_0
Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25 ÷ 0,35

Для асинхронного двигателя с фазным ротором, выполненного в закрытом самовентилируемом исполнении, коэффициент ухудшения теплоотдачи $\beta_0 = 0,45 \div 0,55$. Принимаем $\beta_0 = 0,5$.

Тогда для каждой из технологических скоростей:

$$\beta_1 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \cdot \frac{2,09}{8,37} = 0,625,$$

$$\beta_2 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_2}{\omega_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \cdot \frac{8,37}{8,37} = 1.$$

Среднеквадратичное значение мощности за время работы:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 \cdot \omega_{\max}}{\omega_1}\right)^2 \cdot t_{p1} + \left(\frac{P_2 \cdot \omega_{\max}}{\omega_2}\right)^2 \cdot t_{p2}}{\beta_1 \cdot t_{p1} + \beta_2 \cdot t_{p2}}} \text{ кВт.} \quad (7.6)$$

Найдем расчетную продолжительность включения:

$$\text{ПВ}_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} \cdot 100\%, \quad (7.7)$$

где t_{pi} – продолжительность i -го интервала времени работы в цикле; m – число рабочих интервалов в цикле; $t_{пj}$ – продолжительность j -го интервала времени паузы в цикле; n – число пауз в цикле.

В данном случае $n = 1$, тогда

$$\text{ПВ}_{\text{расч}} = \frac{20 + 30}{20 + 30 + 110} \cdot 100\% = 31,25 \, \%.$$

Пересчитаем среднеквадратичную мощность на ближайшую каталожную продолжительность включения:

$$P_k = P_3 \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_k}} \text{ кВт,} \quad (7.8)$$

где ПВ_k – ближайшая к расчетной каталожная продолжительность включения. Она выбирается из ряда номинальных значений: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %, 100 %.

Проводим расчеты для $\text{ПВ}_{k1} = 25 \, \%$ и $\text{ПВ}_{k2} = 40 \, \%$.

Каталожные мощности:

$$P_{k1} = P_3 \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_3}{\text{ПВ}_{k1}}} = 3,59 \cdot \sqrt{\frac{31,3}{25}} = 4,01 \text{ кВт,}$$

$$P_{k1} = P_3 \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_3}{\text{ПВ}_{k1}}} = 3,59 \cdot \sqrt{\frac{31,3}{40}} = 4,17 \text{ кВт.}$$

Определяем расчетную мощность двигателя:

$$P_{\text{расч}} = P_k \cdot \frac{k_3}{\eta_{\text{п}}}, \quad (7.9)$$

где k_3 – коэффициент запаса, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы механизма: принимаем $k_3 = 1,1$; η_n – коэффициент полезного действия передачи, $\eta_n = 0,95$;

При $P_{B_{K1}} = 25 \%$

$$P_{расч1} = P_{K1} \cdot \frac{k_3}{\eta_n} = \frac{4,01 \cdot 1,1}{0,95} = 4,65 \text{ кВт.}$$

При $P_{B_{K2}} = 40 \%$

$$P_{расч2} = P_{K2} \cdot \frac{k_3}{\eta_n} = \frac{3,17 \cdot 1,1}{0,95} = 3,67 \text{ кВт.}$$

По каталогу выбираем несколько электродвигателей ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения. Тип и основные параметры двигателей сведем в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Основные параметры двигателей

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Момент инерции, кг·м ²	ПВ, %
МТН112-6	5	930	0,056	40
МТФ112-6	5,8	915	0,27	25
МТМ211-6	5	920	0,115	40
МТН112-6	5,3	885	0,27	25
МТ112-6	5	925	0,0675	25
МТФ112-6	5	930	0,068	40

Для каждого из выбранных двигателей вычислим:

– номинальную скорость:

$$\omega_{ндi} = \frac{\pi \cdot n_{ди}}{30}. \quad (7.10)$$

– передаточное отношение (число) редуктора:

$$i_{pi} = \frac{\omega_{ндi}}{|\omega_{max м}|}, \quad (7.11)$$

где $\omega_{нд}$ – номинальная скорость двигателя; $\omega_{max м}$ – максимальная скорость производственного механизма;

– промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [3]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 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; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора можно найти следующим образом:

$$i_{стp} = i_{сти} \cdot 10^x, \quad (7.12)$$

где $i_{сти}$ – стандартное передаточное число редуктора; x – целое число.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается ближайшим меньшим к расчетному:

$$i_{стр} \leq i_p; \quad (7.13)$$

– оптимальное по условию минимизации времени пуска передаточное отношение редуктора:

$$i_{опт} = \sqrt{\frac{J_m}{k \cdot J_{дв}}}, \quad (7.14)$$

где J_m – момент инерции производственного механизма; $J_m = 20$; $J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя; $k = 1,05 \div 1,3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора. Принимаем $k = 1,1$;

– отношение стандартного передаточного отношения редуктора $i_{стр}$ к оптимальному передаточному отношению $i_{опт}$:

$$\theta = \frac{i_{стр}}{i_{опт}}. \quad (7.15)$$

Данные расчетов по каждому двигателю сведем в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Данные расчетов к выбранным двигателям

Тип двигателя	Ном. скорость двигателя $\omega_{нд}$	i_p	$i_{стр}$	$i_{опт}$	Θ_i
МТН112-6	97,3	11,6	11,2	18,1	0,62
МТФ112-6	95,8	11,4	11,2	8,2	1,36
МТМ211-6	96,3	11,5	11,2	12,3	0,91
МТН112-6	92,6	11,1	10,0	8,2	1,22
МТ112-6	96,8	11,6	11,2	16,4	0,68
МТФ112-6	97,3	11,6	11,2	16,4	0,69

Двигатель с Θ_i , наиболее приближенной к единице, принимается в качестве приводного. Для дальнейших расчетов выбираем двигатель типа МТМ211-6 с паспортными данными, которые сведем в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 – Паспортные данные двигателя МТМ211-6

P_n , кВт	n_n , об/мин	$U_{1лн}$, В	$\cos\phi_n$, о. е.	$I_{1н}$, А	R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$k_{max} = M_{max}/M_n$, о. е.
5,0	920	380	0,75	13,6	1,41	1,29	2,5
9,7	215	16,2	0,58	0,66	1,76	0,115	120
I_0 , А	$E_{2н}$, В	$I_{2н}$, А	R_2 , Ом	$X_{2\sigma}$, Ом	k_e , о. е.	$J_{дв}$, кг·м ²	Q , кг
9,7	215	16,2	0,58	0,66	1,76	0,115	120

В таблице приняты следующие обозначения физических величин:

P_n – номинальная мощность двигателя, кВт;

n_n – номинальная частота вращения, об/мин;

$U_{1лн}$ – номинальное фазное напряжение, В;
 $\cos\phi_n$ – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о. е.;
 $I_{1н}$ – номинальный ток статора двигателя, А;
 R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;
 $X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;
 $k_{max} = M_{max}/M_n$ – кратность максимального момента, о. е.;
 I_0 – ток статора холостого хода, А;
 $E_{2н}$ – ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора, В;
 $I_{2н}$ – номинальный ток ротора двигателя, А;
 R_2 – активное сопротивление обмотки ротора, Ом;
 $X_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом;
 k_e – коэффициент трансформации ЭДС, о. е.;
 $J_{дв}$ – момент инерции ротора, кг·м²;
 Q – масса двигателя, кг.

Для найденного передаточного отношения редуктора определим приведенный к валу двигателя момент сопротивления при реактивной нагрузке:

$$M_{ci} = \frac{M_{мех}}{\eta_n \cdot i_{ст.р}} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (7.16)$$

где $M_{мех}$ – момент механизма, Н·м; $i_{ст.р}$ – стандартное передаточное число редуктора; η_n – КПД передачи при максимальной частоте вращения.

$$M_{ci} = \frac{M_{мех}}{\eta_n \cdot i_{ст.р}} = \frac{500}{0,95 \cdot 11,2} = 47,0 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7.4 Построение естественных механической и электромеханических характеристик электродвигателя

Определим параметры схемы замещения асинхронного двигателя.

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = R_2 \cdot k_e^2 = 0,58 \cdot 1,76^2 = 1,80 \text{ Ом}. \quad (7.17)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot k_e^2 = 0,66 \cdot 1,76^2 = 2,04 \text{ Ом}. \quad (7.18)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кз} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = 1,29 + 2,04 = 3,33 \text{ Ом}. \quad (7.19)$$

Синхронная частота вращения n_0 для промышленной частоты сети $f_{1н} = 50$ Гц может быть найдена из таблицы 7.4 как ближайшая бóльшая к номинальной частоте вращения $n_n = 920$ об/мин, в зависимости от числа пар полюсов p .

Таблица 7.4 – Синхронная частота вращения n_0 в зависимости от числа пар полюсов p

p	1	2	3	4	5	6
n_0	3000	1500	1000	750	600	500

Таким образом, синхронная частота вращения равна $n_0 = 1000$ об/мин.

В этом случае синхронная скорость ω_0 двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R'_2 \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,80}{104,7 \cdot s \cdot [(1,41 + 1,80 \cdot s^{-1})^2 + (1,29 + 2,04)^2]} \quad (7.20)$$

Механическая характеристика приведена на рисунке 7.4.

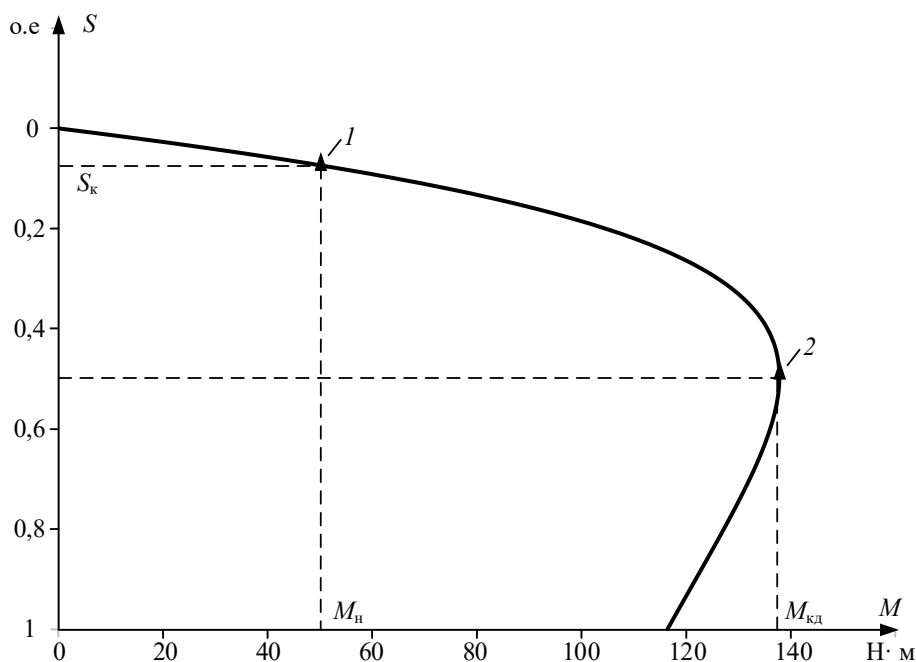


Рисунок 7.4 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя типа МТМ211-6: 1 – момент номинальный; 2 – момент критический

Определим дополнительные параметры двигателя:

– Момент критический двигательного режима (электромагнитный):

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2})} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot (1,41 + \sqrt{1,41^2 + 3,33^2})} \quad (7.21)$$

$$= 138,0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– Критическое скольжение:

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \pm \frac{1,80}{\sqrt{1,41^2 + 3,33^2}} = \pm 0,497 \text{ о. е}; \quad (7.22)$$

– Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 920}{30} = 96,3 \frac{\text{Рад}}{\text{с}};$$

– Номинальный момент двигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5000}{96,3} = 51,9 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (7.23)$$

– Максимальный момент (на валу) двигателя:

$$M_k = k_{max} \cdot M_n = 2,5 \cdot 51,9 = 129,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (7.24)$$

Максимальный момент на валу двигателя M_k меньше, чем электромагнитный критический момент двигательного режима $M_{кд}$ за счет потерь в самом двигателе.

Номинальный электромагнитный момент асинхронного двигателя $M_{нэ}$, определенный при номинальном скольжении $s_n = 0,08$ по механической характеристике, составляет $M_{нэ} = 53,62 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Найденные координаты точек с номинальным и критическим моментами двигателя нанесены на рассчитанный график (см. рисунок 7.4) естественной механической характеристики асинхронного двигателя в виде треугольников.

Расчет естественной электромеханической характеристики асинхронного двигателя $I_2 = f(s)$ произведем по выражению:

$$I_2 = \frac{U_{1\phi н}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,41 + \frac{1,80}{s}\right)^2 + 3,33^2}}. \quad (7.25)$$

График электромеханической характеристики $I_2 = f(s)$ приведен на рисунке 7.5.

Номинальный ток ротора двигателя $I_{2н} = 16,2 \text{ А}$.

Найдем номинальный ток ротора, приведенный к обмотке статора:

$$I'_{2н} = \frac{I_{2н}}{k_e} = \frac{16,2}{1,76} = 9,2 \text{ А}. \quad (7.26)$$

Номинальный ток ротора, приведенный к обмотке статора $I'_{2н}$, определенный по электромеханической характеристике при номинальном скольжении $s_n = 0,08$, составляет $I'_{2н} = 9,13 \text{ А}$.

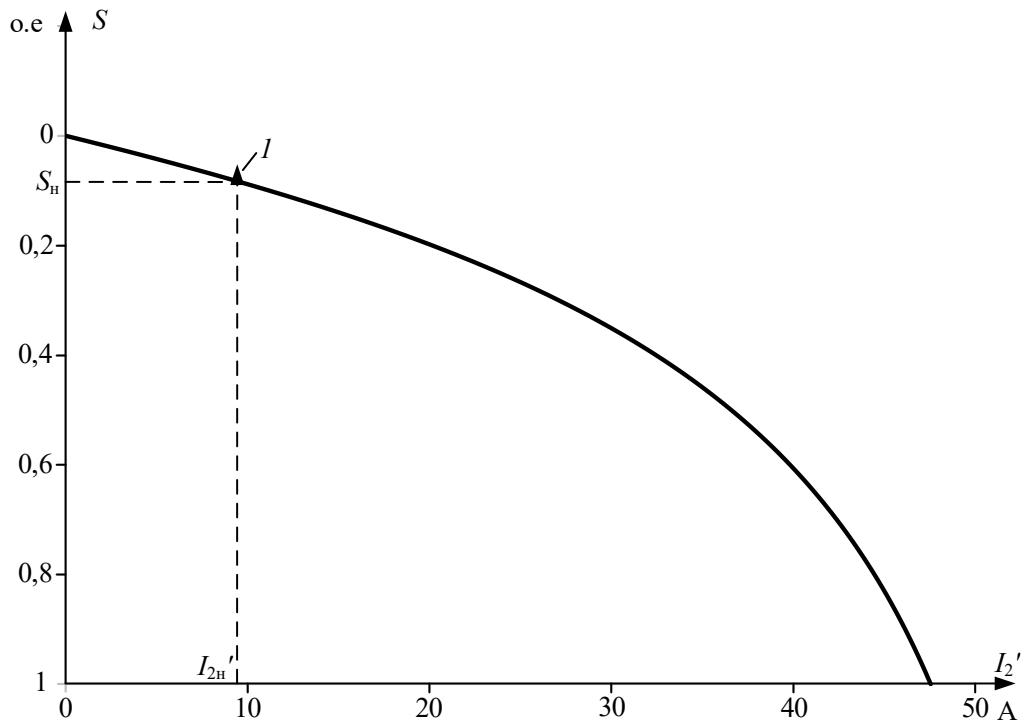


Рисунок 7.5 – График электромеханической характеристики $I_2 = f(s)$:
1 – координаты точки с номинальными параметрами двигателя

Расчет естественной электромеханической характеристики $I_1 = f(s)$ произведем с учетом найденных значений тока I' , в соответствии с уравнением:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} \quad (7.27)$$

$$= \sqrt{9,7^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 9,7 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{3,33}{\sqrt{\left(1,41 + \frac{1,80}{s}\right)^2 + 3,33^2}} \quad (7.28)$$

График электромеханической характеристики $I_1 = f(s)$ приведен на рисунке 7.6.

Номинальный ток статора по паспортным данным двигателя $I_{1\text{н}} = 13,6 \text{ А}$.

Номинальный ток статора асинхронного двигателя, при номинальном скольжении $s_{\text{н}} = 0,08$, определенный по электромеханической характеристике, $I_{1\text{н}} = 14,2 \text{ А}$.

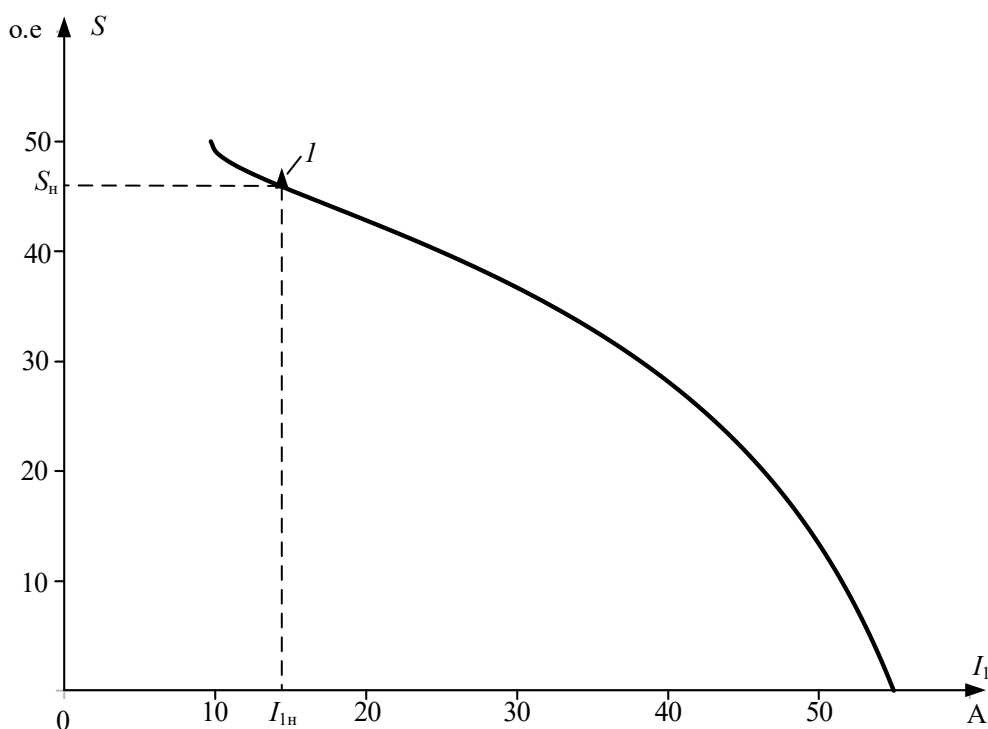


Рисунок 7.6 – График естественной электромеханической характеристики $I_1 = f(s)$ асинхронного двигателя: I – координаты точки с номинальными параметрами двигателя

Значения номинального тока статора, тока ротора, приведенного к обмотке статора, номинального и критического моментов асинхронного двигателя, определенные по его естественным характеристикам, практически совпадают со значениями, приведенными в каталожных данных, поэтому номинальные параметры асинхронного двигателя и параметры его схемы замещения не противоречат друг другу.

7.5 Расчет пусковых и регулировочных резисторов электропривода

Для построения реостатных механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при известных параметрах схемы замещения двигателя необходимо знать величину добавочного сопротивления цепи обмотки ротора, приведенного к обмотке статора. Добавочное сопротивление легко определяется, если известны координаты какой-либо точки (кроме точки идеального холостого хода), принадлежащей, например, механической характеристике электропривода.

Наиболее часто такой точкой является заданная рабочая скорость или скольжение при известном статическом моменте, приведенном к валу двигателя.

Найдем статический момент механизма, приведенный к валу двигателя при реактивном характере нагрузки:

$$M_{ci} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (7.29)$$

где $M_{\text{мех}}$ – момент механизма, Н·м; $i_{\text{ст.р}}$ – стандартное передаточное число редуктора; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи при максимальной частоте вращения;

$$M_{c1} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} = \frac{500}{0,95 \cdot 11,2} = 47,0 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определим технологические скорости ω_{di} вращения двигателя:

$$\omega_{di} = \omega_{\text{д}i} \cdot i_{\text{ст.р}} \quad (7.30)$$

$$\omega_{\text{д}1} = \omega_{\text{д}1} \cdot i_{\text{ст.р}} = 2,1 \cdot 11,2 = 23,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

$$\omega_{\text{д}2} = \omega_{\text{д}2} \cdot i_{\text{ст.р}} = 8,37 \cdot 11,2 = 93,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для каждой из технологических скоростей найдем рабочие скольжения двигателя.

Для первой технологической скорости:

$$s_{\text{д}1} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{д}1}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 23,4}{104,7} = 0,776 \text{ о. е.} \quad (7.31)$$

Для второй технологической скорости:

$$s_{\text{д}2} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{д}2}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 93,8}{104,7} = 0,104 \text{ о. е.}$$

Добавочное сопротивление цепи обмотки ротора для первой технологической скорости определим в следующей последовательности.

Для найденного рабочего скольжения $s_{\text{д}1}$ и статического момента M_{c1} определим критическое скольжение:

$$s_{\text{к}1} = s_{\text{д}1} \cdot \left(\frac{(1 + q) \cdot M_{\text{кд}}}{M_{c1}} - q + \sqrt{\left(\frac{(1 + q) \cdot M_{\text{кд}}}{M_{c1}} - q \right)^2 - 1} \right), \quad (7.32)$$

где q – коэффициент, находим по следующей формуле:

$$q = a \cdot s_{\text{к}1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_{12} + X_{\text{кн}2}}} = \frac{1,41}{\sqrt{1,41^2 + 3,33^2}} = 0,39. \quad (7.33)$$

После подстановки численных значений параметров получим:

$$s_{\text{к}1} = 0,776 \cdot \left(\frac{(1 + 0,39) \cdot 138,0}{47,0} - 0,39 + \sqrt{\left(\frac{(1 + 0,39) \cdot 138,0}{47,0} - 0,39 \right)^2 - 1} \right) = 5,62.$$

Тогда добавочное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, для первой технологической характеристики:

$$R'_{2д1} = s_{к1} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} - R'_2 = 5,62 \cdot \sqrt{1,41^2 + 3,33^2} - 1,8 = 18,5 \text{ Ом.} \quad (7.34)$$

Значение регулировочного сопротивления $R_{2д1}$, непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по выражению:

$$R_{2д1} = \frac{R'_{2д1}}{k_e^2} = \frac{18,5}{1,76^2} = 5,98 \text{ Ом.} \quad (7.35)$$

Добавочное сопротивление цепи обмотки ротора для второй технологической скорости определим в следующей последовательности.

Для найденного рабочего скольжения $s_{д2}$ и статического момента $M_{с1}$ определим критическое скольжение:

$$s_{к2} = s_{д2} \cdot \left(\frac{(1 + q) \cdot M_{кД}}{M_{с1}} - q + \sqrt{\left(\frac{(1 + q) \cdot M_{кД}}{M_{с1}} - q \right)^2 - 1} \right). \quad (7.36)$$

где $q = 0,39$ – коэффициент.

После подстановки численных значений параметров получим:

$$s_{к2} = 0,104 \cdot \left(\frac{(1 + 0,39) \cdot 138,0}{47,0} - 0,39 + \sqrt{\left(\frac{(1 + 0,39) \cdot 138,0}{47,0} - 0,39 \right)^2 - 1} \right).$$

Решение уравнения: $s_{к2} = 0,755$.

Тогда добавочное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, для второй технологической характеристики:

$$R'_{2д2} = s_{к2} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} - R'_2 = 0,755 \cdot \sqrt{1,41^2 + 3,33^2} - 1,80 = 0,926 \text{ Ом.} \quad (7.37)$$

Значение регулировочного сопротивления $R_{2д2}$, непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя при работе на второй технологической характеристике, находится по выражению:

$$R_{2д2} = \frac{R'_{2д2}}{k_e^2} = \frac{0,926}{1,76^2} = 0,299 \text{ Ом.} \quad (7.38)$$

Расчет механической характеристики асинхронного двигателя для технологических скоростей $\omega_{д1}$ и $\omega_{д2}$ произведем по уравнению:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1фн}^2 \cdot (R'_2 + R'_{2ди})}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + (R'_2 + R'_{2ди}) \cdot s^{-1})^2 \cdot x_{кн}^2]}. \quad (7.39)$$

После подстановки численных значений параметров расчетные уравнения механических характеристик для первой и второй технологических скоростей будут выглядеть следующим образом:

Для первой технологической характеристики:

$$M_1(s) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1,8 + 18,5)}{104,7 \cdot s \cdot \left[\left(1,41 + \frac{(1,80 + 18,5)}{s} \right)^2 + 3,33^2 \right] \cdot s}. \quad (7.40)$$

Для второй технологической характеристики:

$$M_2(s) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1,8 + 0,926)}{104,7 \cdot s \cdot \left[\left(1,41 + \frac{(1,80 + 10,9)}{s} \right)^2 + 3,33^2 \right] \cdot s}, \quad (7.41)$$

где s – скольжение.

Графики механических характеристик приведены на рисунке 7.7 в осях координат (M, ω) . Способ перехода от скольжения к скорости показан в Приложении 1.

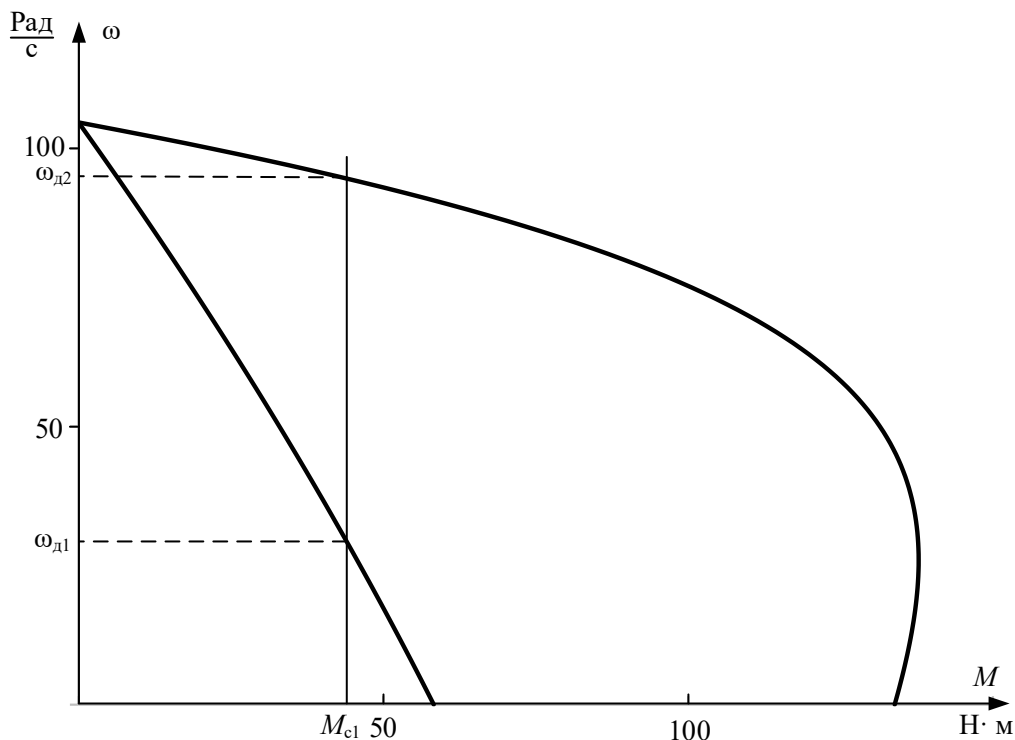


Рисунок 7.7 – Механические характеристики асинхронного двигателя для технологических скоростей $\omega_{д1}$ и $\omega_{д2}$

Так как для асинхронных двигателей с фазным ротором пуск, реверс, торможение, регулирование скорости необходимо осуществлять при наложенных на ток и момент ограничениях, то, как следует из анализа рисунка 7.7, разгон двигателя до второй технологической скорости $\omega_{д2}$ следует производить через промежуточные пусковые характеристики.

При этом максимальные пусковые пики моментов $M_{\max \text{ пуск}}$ двигателя определяются из условия:

$$M_{\text{max пуск}} = 0,85 \cdot M_{\text{кд}} = 0,85 \cdot 138,0 = 117,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (7.42)$$

Момент переключения $M_{\text{пер}}$ будем выбирать из условия:

$$M_{\text{пер}} \geq (1,1 - 1,3) \cdot M_{\text{н}} = 1,2 \cdot 51,9 = 62,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (7.43)$$

Схема силовых цепей, в случае разгона двигателя до скорости $\omega_{\text{д2}}$ через две пусковые характеристики, для рассматриваемого технологического режима работы асинхронного электропривода приведена на рисунке 7.8.

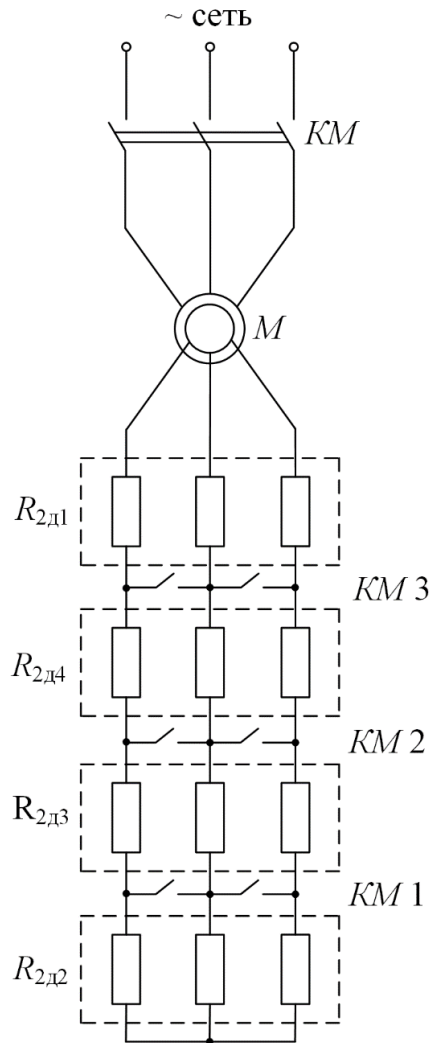


Рисунок 7.8 – Схема силовых цепей реостатного асинхронного электропривода

Порядок построения пусковых характеристик следующий:

- строятся регулировочные характеристики с заданными рабочими скоростями $\omega_{\text{д1}}$ и $\omega_{\text{д2}}$ (рисунок 7.9). Строится первая пусковая механическая характеристика – 3, что соответствует работе электропривода с замкнутым контактом KM1. Из цепи обмотки ротора выводится добавочное сопротивление $R_{2\text{доб2}}$. Характеристика 3 проходит через две точки: синхронную скорость ω_0 при моменте двигателя, равном нулю ($M = 0$), и допустимый момент $M_{\text{max пуск}}$ при скорости, равной $\omega_{\text{д1}}$;
- определяется момент переключения; $M_{\text{пер}} \geq 62,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– в точке с координатами $(M_{\text{пер}}, \omega_{\text{п1}})$ происходит закорачивание замыкающим контактом КМ 2 добавочного сопротивления $R_{2\text{доб3}}$, и двигатель переходит на пусковую характеристику 4. Таким образом, характеристика 4 проходит через две точки: синхронную скорость ω_0 при моменте двигателя, равном нулю ($M = 0$), и скорость, равную $\omega_{\text{п1}}$, при допустимом моменте $M_{\text{мах}}$ пуск.

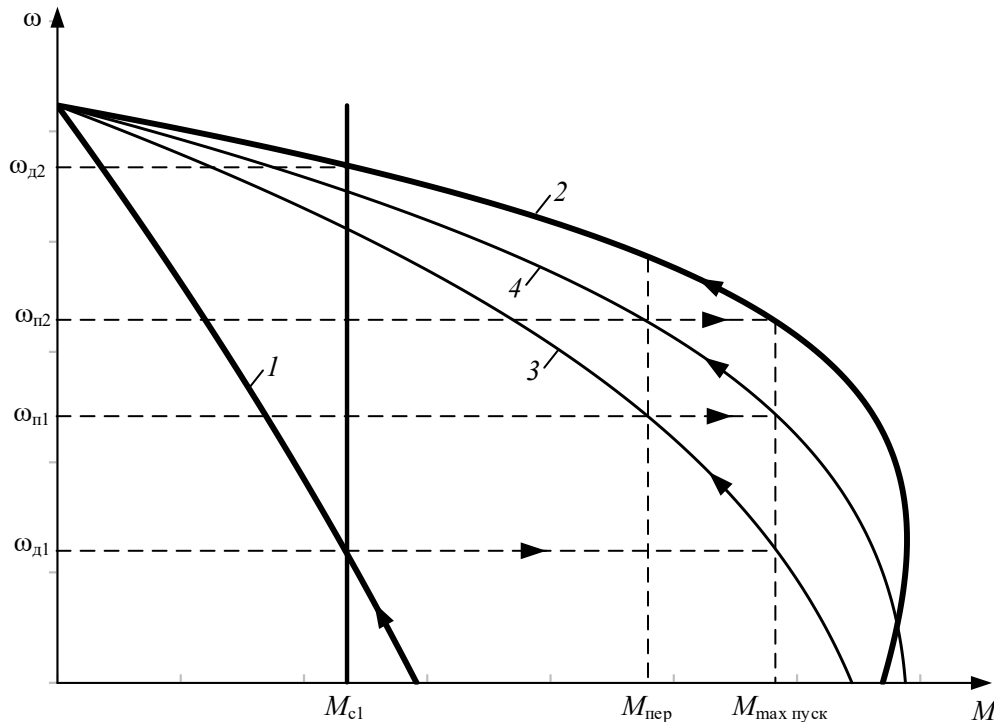


Рисунок 7.9 – Общий вид механических характеристик электропривода:

1 – первая технологическая механическая характеристика; 2 – вторая технологическая механическая характеристика; 3 – первая пусковая механическая характеристика; 4 – вторая пусковая механическая характеристика

Закорачивание добавочного сопротивления $R_{2\text{доб4}}$ также необходимо производить при моменте переключения $M_{\text{пер}}$. Бросок момента при переходе двигателя на вторую технологическую характеристику должен быть равен допустимому моменту $M_{\text{мах пуск}}$. Если это не происходит, то момент переключения $M_{\text{пер}}$ необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если момент переключения становится меньше $1,1 \cdot M_{\text{н}}$, то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений.

При построении пусковых характеристик в математической системе MathCAD в численных значениях параметров пусковые добавочные сопротивления в цепи обмотки ротора определяются в процессе построения этих характеристик и равны:

– для первой пусковой характеристики:

$$R'_{2\text{п1}} = 3,8 \text{ Ом}; \quad (7.44)$$

– для второй пусковой характеристики:

$$R'_{2\text{п2}} = 2,1 \text{ Ом}; \quad (7.45)$$

Расчетные графики механических регулировочных и пусковых характеристик приведены на рисунке 7.10.

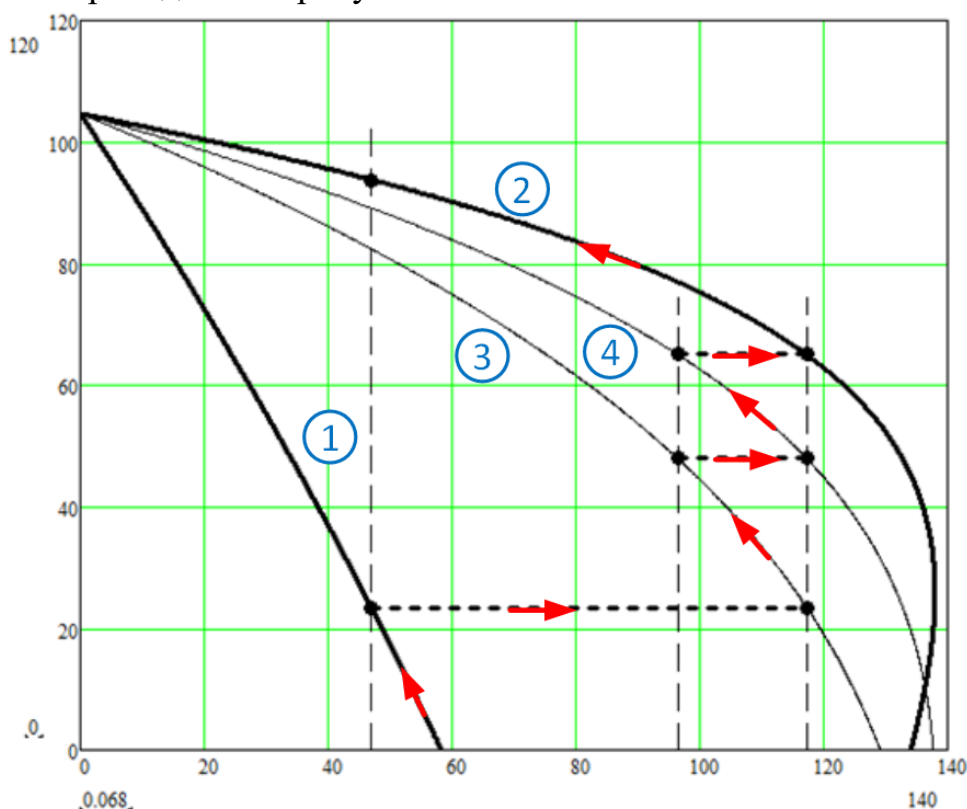


Рисунок 7.10 – Построение механических характеристик электропривода по заданным параметрам в программе Mathcad: 1 – первая технологическая механическая характеристика; 2 – вторая технологическая механическая характеристика; 3 – первая пусковая механическая характеристика; 4 – вторая пусковая механическая характеристика

Значения пусковых сопротивлений $R_{2пi}$, включаемых в роторную цепь двигателя при пуске с первой на вторую технологическую характеристику, находятся следующим образом:

$$R_{2п1} = \frac{R'_{2п1}}{k_e^2} = \frac{3,8}{1,76^2} = 1,23 \text{ Ом};$$

$$R_{2п2} = \frac{R'_{2п2}}{k_e^2} = \frac{2,1}{1,76^2} = 0,779 \text{ Ом}.$$

Найденные значения сопротивлений $R_{2п1}$ и $R_{2п2}$ позволяют определить все добавочные сопротивления цепи обмотки ротора в обозначениях, принятых на рисунке 7.8, из уравнений:

$$R_{2д2} = R_{2доб1} = 0,299 \text{ Ом};$$

$$R_{2п2} = R_{2доб1} + R_{2доб4} = 0,779 \text{ Ом};$$

$$R_{2п1} = R_{2доб1} + R_{2доб4} + R_{2доб3} = 1,23 \text{ Ом};$$

$$R_{2д1} = R_{2доб1} + R_{2доб4} + R_{2доб3} + R_{2доб2} = 5,98 \text{ Ом}.$$

Совместное решение этих уравнений позволяет определить добавочные сопротивления, непосредственно включаемые в роторную цепь двигателя: $R_{2доб1} = 0,299 \text{ Ом}$; $R_{2доб2} = 4,75 \text{ Ом}$; $R_{2доб3} = 0,451 \text{ Ом}$; $R_{2доб4} = 0,48 \text{ Ом}$.

Таким образом, все сопротивления пусковых и регулировочных резисторов найдены.

После работы на двух технологических скоростях двигатель необходимо остановить. Наиболее быстрые способы торможения электроприводов – электрические: торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное), торможение противовключением, динамическое торможение. В тех случаях, когда после торможения не должно происходить реверсирование электропривода, в релейно-контакторных электроприводах применяют динамическое торможение двигателя.

7.5.1 Расчет параметров и характеристик режима динамического торможения асинхронного двигателя

Схема включения асинхронной электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рисунке 7.11. В электроприводах с асинхронными двигателями режим динамического торможения возникает при отключении обмоток статора от сети переменного напряжения контактором $KМ$ и подключении ее через добавочное сопротивление динамического торможения $R_{дт}$, которое ограничивает ток статора на допустимом уровне, к источнику постоянного напряжения U_n контактором $KМ4$.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной в режиме динамического торможения, определяется уравнением [9]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кдт}}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}}, \quad (7.46)$$

где $v = \omega / \omega_0$ – относительная скорость; v_k – относительная критическая скорость, определяемая по следующей формуле:

$$v_k = \frac{R'_2 + R'_{2доп}}{X_{mH} + X'_{2\sigma H}}.$$

M_k – критический момент асинхронного двигателя в режиме динамического торможения, определяемый по следующей формуле:

$$M_{кдт} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot X_{mH}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (X_{mH} + X'_{2\sigma H})}.$$

Критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения не должен превышать максимальный момент пусковых характеристик двигательного режима работы электрической машины:

$$M_{кдт} \leq M_{\max \text{ пуск}} = 0,85 \cdot M_{кд} = 0,85 \cdot 138,0 = 117,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (7.47)$$

В паспортных данных двигателя не приведено значение индуктивного

сопротивления X_m , найдем его из выражения:

$$X_{mн} = \frac{E_m}{I_0} \text{ Ом.} \quad (7.48)$$

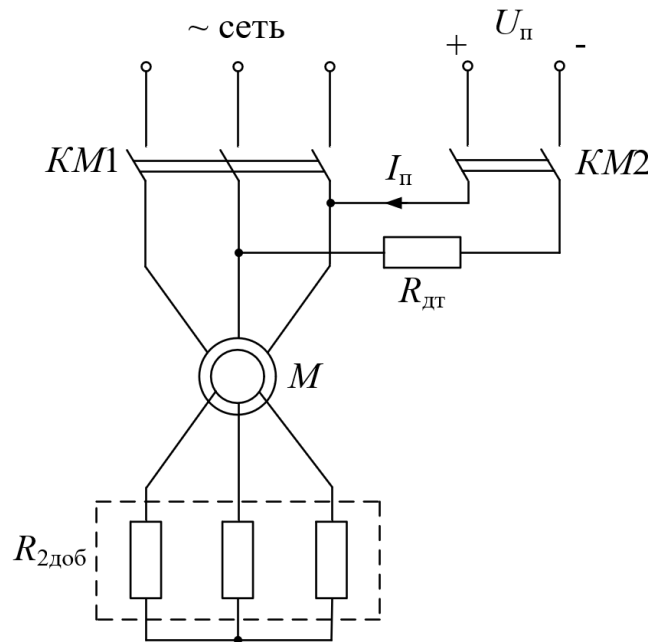


Рисунок 7.11 – Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$\begin{aligned} E_m &= \\ &= \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi_{1н} - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1н}} - X_{1\sigmaн} \cdot I_{1н})^2} \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,75 - 1,41 \cdot 13,6)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,75^2} - 1,29 \cdot 13,6)^2} \\ &= 194 \text{ В,} \end{aligned} \quad (7.49)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{mн} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{194}{9,7} = 20 \text{ Ом.}$$

Найдем эквивалентный переменный ток статора:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\sqrt{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{кдт} (X_{mн} + X'_{2\sigmaн})}}{3 \cdot X_{mн}^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,3 \cdot (20 + 2,04)}{3 \cdot 20^2}} \\ &= 21,2 \text{ А.} \end{aligned} \quad (7.50)$$

Определим относительную критическую скорость:

$$v_k = \frac{R'_2}{X_{mн} + X'_{2\sigmaн}} = \frac{1,39}{20 + 2,04} = 0,06 \text{ о. е.} \quad (7.51)$$

Добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует ($R'_{2доб} = 0$).

Расчет механической характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, произведем в абсолютных значениях скорости в соответствии с выражением:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кдт}}}{\frac{v_{\text{к}} \cdot \omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{v_{\text{к}} \cdot \omega_0}} = \frac{-2 \cdot 117,3}{\frac{0,06 \cdot \omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{0,06 \cdot \omega_0}}, \quad (7.52)$$

подставляя в него значения скорости от 0 до 120 рад/с

Механическая характеристика динамического торможения асинхронного двигателя МТМ211-6 без добавочного сопротивления в цепи обмотки ротора приведена на рисунке 7.12, кривая 1.

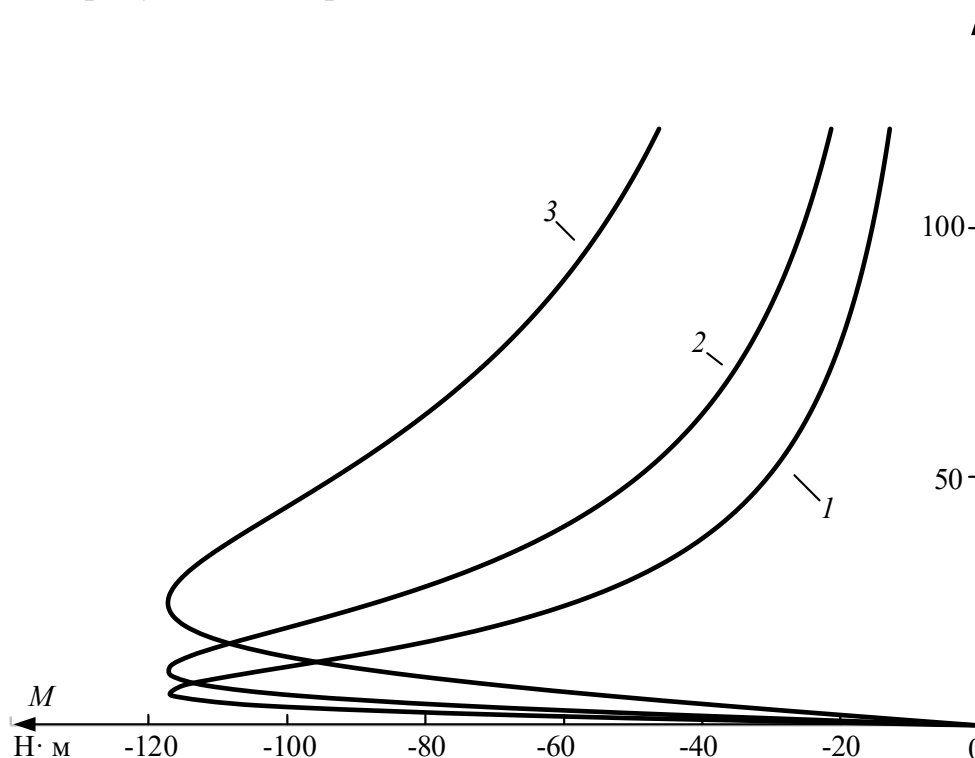


Рисунок 7.12 – Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Анализ механической характеристики 1 режима динамического торможения асинхронного двигателя (см. рисунок 7.12) показывает, что процесс торможения двигателя в диапазоне скоростей от рабочей скорости $\omega_{\text{д2}}$ до скорости ≈ 50 рад/с протекает с незначительным тормозным моментом. Очевидно, что процесс торможения будет более эффективным (быстрым) в том случае, когда тормозной момент будет бóльшим (например, равным максимальному моменту динамического торможения $M_{\text{кдт}}$). Увеличить момент динамического торможения на высоких скоростях можно, введя в цепь обмотки ротора добавочное сопротивление $R_{2' \text{доб}}$. Рассчитаем механические характеристики режима динамического торможения при добавочных сопротивлениях цепи обмотки ротора $R_{2' \text{доб1}}$ и $R_{2' \text{п1}} = R_{2' \text{доб1}} + R_{2' \text{доб4}} + R_{2' \text{доб3}}$.

Графики механических характеристик для этих случаев приведены на рисунке 7.12 (кривые 2 и 3).

Хотя момент механической характеристики динамического торможения 3 (см. рисунок 7.12) при всех скоростях больше и, следовательно, процесс торможения будет протекать значительно быстрее, в дальнейших расчетах остановимся на характеристике 2, т. к. в этом случае принципиальная электрическая схема электропривода будет значительно проще.

Механические характеристики полного цикла работы электропривода представлены на рисунке 7.13.

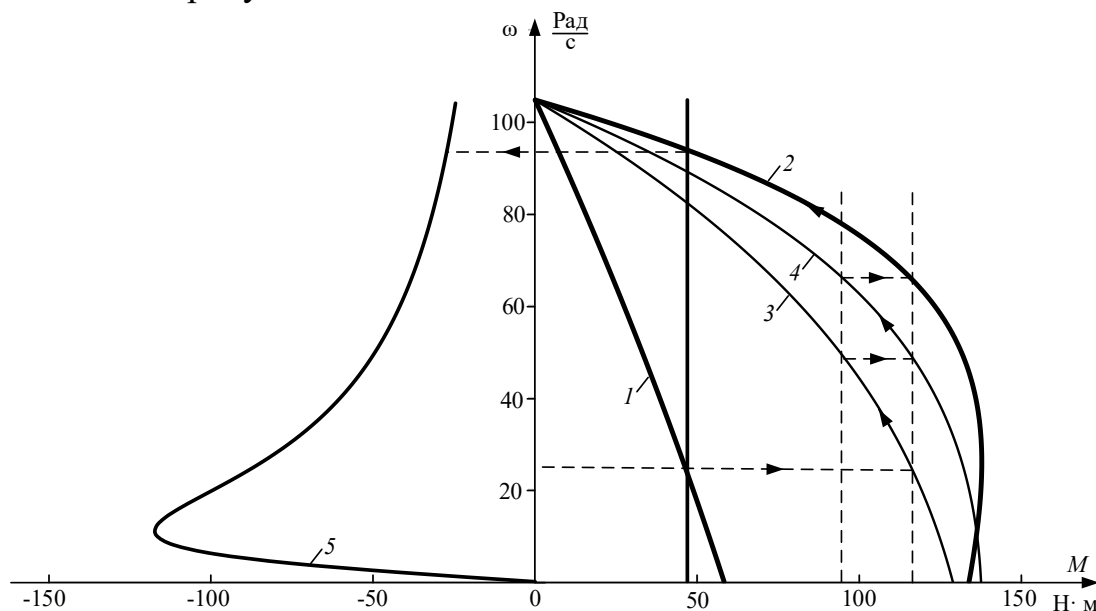


Рисунок 7.13 – Механические характеристики полного цикла работы электропривода

Электромеханические характеристики $I_2' = f(\omega)$ для двигательного цикла работы электропривода рассчитаем по выражению:

$$I_{2i}' = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_{2\text{доп}}'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}, \quad (7.53)$$

подставляя в него: $R'_{2\text{доб}} = R'_{2\text{д1}} = R'_{2\text{доб1}} + R'_{2\text{доб4}} + R'_{2\text{доб3}} + R'_{2\text{доб2}} = 18,53 \text{ Ом}$ – для первой технологической характеристики;

$R'_{2\text{доб}} = R'_{2\text{п1}} = R'_{2\text{доб1}} + R'_{2\text{доб4}} + R'_{2\text{доб3}} = 3,8 \text{ Ом}$ – для первой пусковой характеристики;

$R'_{2\text{доб}} = R'_{2\text{п2}} = R'_{2\text{доб1}} + R'_{2\text{доб4}} = 2,1 \text{ Ом}$ – для второй пусковой характеристики;

$R'_{2\text{доб}} = R'_{2\text{д2}} = R'_{2\text{доб1}} = 0,926 \text{ Ом}$ – для второй технологической характеристики.

Технологические и пусковые электромеханические характеристики $I_2' = f(\omega)$ асинхронного двигателя МТМ211-6 приведены на рисунке 7.14.

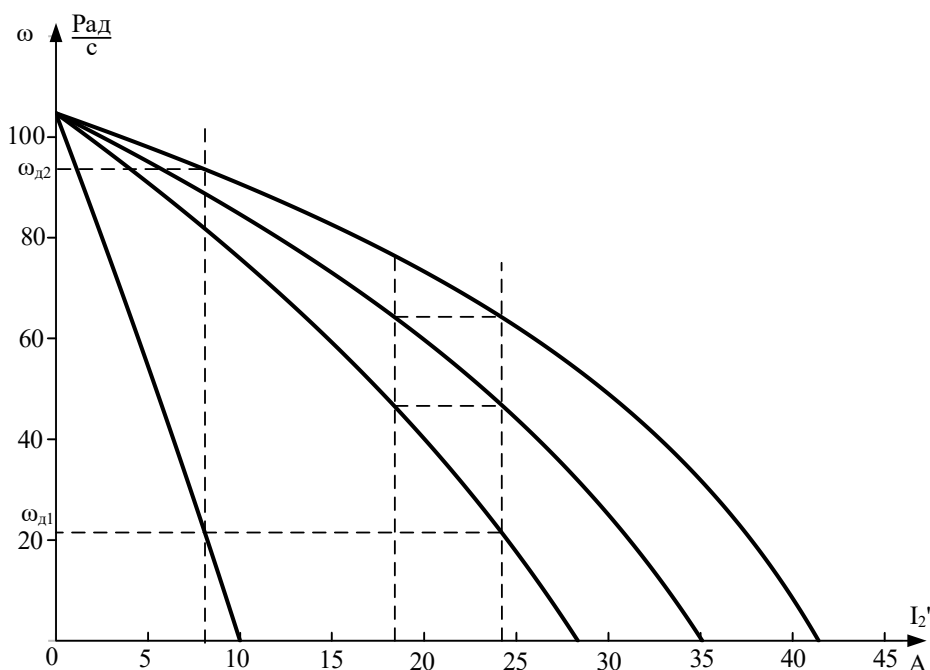


Рисунок 7.14 – Технологические и пусковые электромеханические характеристики $I_2' = f(\omega)$ асинхронного двигателя

Электромеханические характеристики $I_1 = f(s)$ для двигательного цикла работы электропривода рассчитаем по выражению:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} \quad (7.54)$$

$$= \sqrt{9,7^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 9,7 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_{2\text{доб}}'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}} \quad (7.55)$$

$$= \frac{3,33}{\sqrt{\left(1,41 + \frac{1,8 + R_{2\text{доп}}'}{s}\right)^2 + 3,33^2}}.$$

Расчет произведем с учетом тока I_2' и добавочных сопротивлений $R_{2\text{доб}}'$, найденных ранее.

Электромеханические характеристики $I_1 = f(s)$ двигательного цикла работы электропривода приведены на рисунке 7.15.

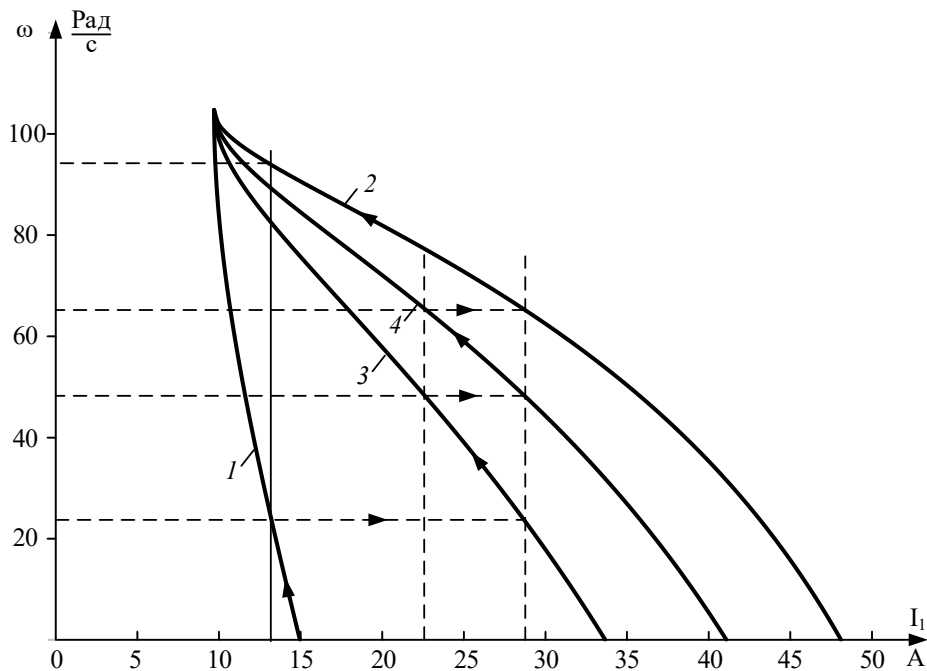


Рисунок 7.15 – Электромеханические характеристики $I_1 = f(s)$ электропривода:

- 1 – первая технологическая электромеханическая характеристика;
- 2 – вторая технологическая электромеханическая характеристика;
- 3 – первая пусковая характеристика электропривода;
- 4 – вторая пусковая характеристика электропривода

Электромеханическая характеристика режима динамического торможения определяется эквивалентным переменным током статора:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{КДТ}} (X_{mH} + X'_{2\sigma H})}}{3 \cdot X_{mH}^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,3 \cdot (20 + 2,04)}{3 \cdot 20^2}} = 21,2 \text{ A.}$$

7.6 Расчет переходных процессов скорости, момента и тока за цикл работы электропривода

Найдем суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} \cdot \frac{1}{i_{\text{ст.р}}^2} = 1,1 \cdot 0,115 + 22 \cdot \frac{1}{11,6^2} = 0,29, \quad (7.56)$$

где $k = (1,05 \div 1,3)$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора; $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $J_{\text{м}}$ – момент инерции производственного механизма, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $i_{\text{ст.р}}$ – стандартное передаточное отношение редуктора.

– Первая технологическая характеристика (см. характеристики 1 на рисунке 7.13 и рисунке 7.15)

Так как механические и электромеханические характеристики пуска двигателя на первую технологическую скорость линейны, расчет переходных процессов произведем аналитически.

Расчет электромеханической постоянной времени $T_{м1}$ для пуска двигателя по первой технологической характеристике произведем в соответствии с выражением:

$$T_{м1} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega_1}{\Delta M_1} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (\omega_{д1} - 0)}{(M_{п1} - M_{с1})} = \frac{0,29 \cdot (23,4 - 0)}{(57,9 - 47,0)} = 0,623 \text{ с}, \quad (7.57)$$

где $\Delta\omega_1$, ΔM_1 – соответствующие друг другу приращения скорости и момента на первой технологической характеристике (см. рисунок 7.13); $M_{п1}$ – пусковой момент первой механической технологической характеристики.

Время переходного процесса пуска двигателя на первую технологическую характеристику $t = 3 \cdot T_{м1}$.

Уравнение для расчета переходного процесса скорости при пуске по первой технологической характеристике:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{м1}}}, \quad (7.58)$$

где $\omega_{уст}$ – установившаяся угловая скорость двигателя;

$$\omega_{уст} = \omega_{д1} = 23,4 \text{ рад/с};$$

$\omega_{нач}$ – начальное значение угловой скорости; $\omega_{нач} = 0 \text{ рад/с}$.

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = 23,4 + (0 - 23,4) \cdot e^{\frac{-t}{0,623}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса момента двигателя:

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{м1}}}, \quad (7.59)$$

где $M_{уст}$ – установившееся значение момента двигателя;

$$M_{уст} = M_{с1} = 47,0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$M_{нач}$ – начальное значение момента двигателя;

$$M_{нач} = M_{п1} = 57,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$M = 47,0 + (57,9 - 47,0) \cdot e^{\frac{-t}{0,623}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока статора:

$$I_1 = I_{1уст} + (I_{1нач} - I_{1уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{м1}}}, \quad (7.60)$$

где $I_{1нач}$ – начальное значение тока статора; $I_{1нач} = I_{1кз} = 14,9 \text{ А}$; $I_{1уст}$ – установившееся значение тока двигателя; $I_{1уст} = I_{1с} = 13,2 \text{ А}$.

Все значения начальных и установившихся значений параметров взяты из графиков статических характеристик электропривода (см. рисунки 7.13 и 7.15), используя трассировку.

После подстановки численных значений параметров получим:

$$I_1 = 13,2 + (14,9 - 13,2) \cdot e^{\frac{-t}{0,623}}.$$

Расчет переходных процессов удобно произвести в математической системе MathCAD, а численные значения параметров снять с помощью трассировщика.

Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ приведены на рисунке 7.16.

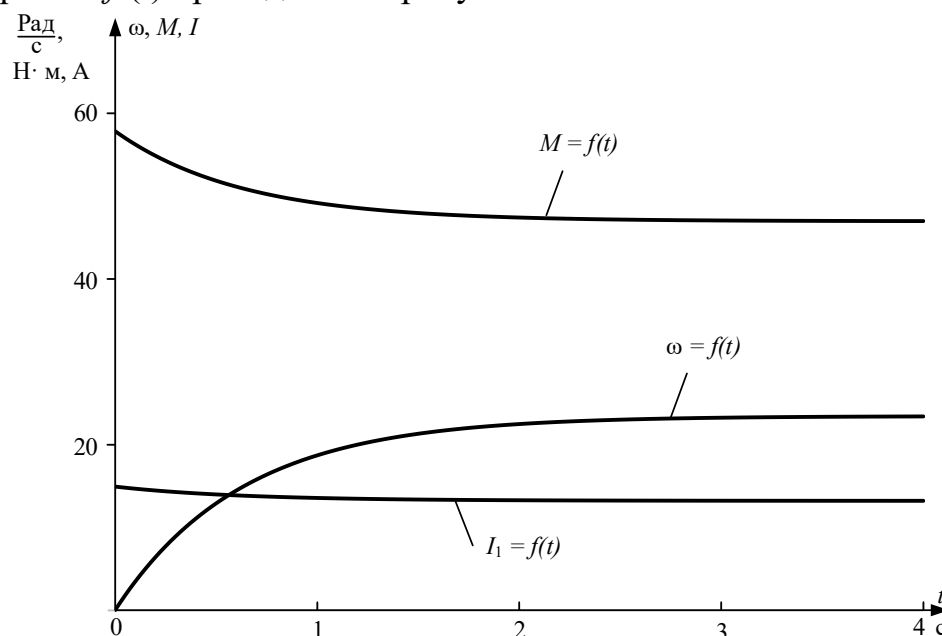


Рисунок 7.16 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$

Расчетные значения скорости, момента и тока в переходных режимах сведем в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 – Расчетные значения скорости, момента и тока в переходных режимах

t, с	0	0,25	0,5	1	2	3
ω , рад/с	0	7,72	12,9	18,7	22,6	23,2
M, Н·м	57,9	54,3	51,9	49,2	47,4	47,1
I, А	14,9	14,4	14,0	13,6	13,3	13,2

Как следует из анализа графиков, переходные процессы скорости, момента и тока можно считать законченными через $t = 3 \cdot T_{м1} = 3 \cdot 0,626 = 1,88$ с (теоретическое время вхождения в 5 %-ную зону).

Время работы на первой технологической характеристике $t_1 = 20$ с.

– Первая пусковая характеристика (см. характеристики 3 на рисунке 7.13 и рисунке 7.15)

Динамический момент, соответствующий первой пусковой характеристике, находится из уравнения движения электропривода:

$$M_{\text{дин}} = M - M_{c1} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (7.61)$$

Первая пусковая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рисунке 7.17.

Так как переходный процесс протекает на нелинейном участке механической характеристики асинхронного двигателя, его определяют методом пропорций [10]. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости $d\omega$ и времени dt в уравнении движения электропривода малыми конечными приращениями – $\Delta\omega$ и Δt .

Расчет для построения переходных процессов методом конечных приращений будем производить в следующей последовательности:

– для рассчитанных механической характеристики электродвигателя $M = f(\omega)$ (см. характеристику 3 на рисунке 7.17) и производственного механизма $M_{c1} = 46,992$ находится динамический момент электропривода $M_{\text{дин}}(\omega) = M(\omega) - M_{c1}(\omega)$;

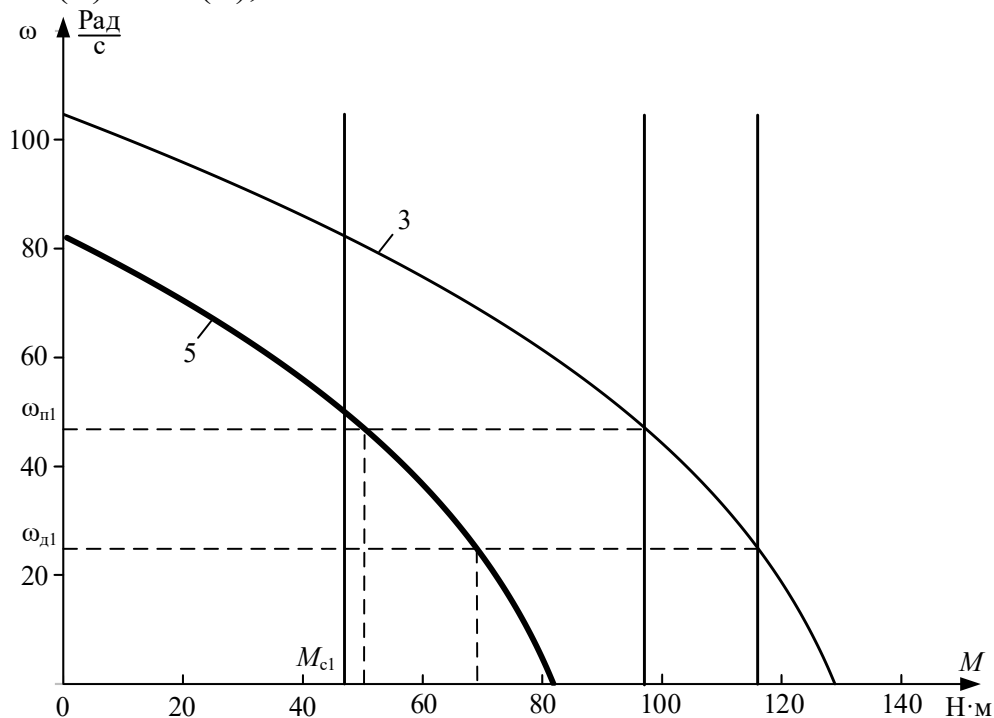


Рисунок 7.17– Механические характеристики электропривода: 3 – первая пусковая механическая характеристика электропривода; 5 –динамический момент электропривода от скорости

– кривую динамического момента $M_{\text{дин}}(\omega)$ заменяют ступенчатой с участками:

$$M_{\text{дин.ср.}i} = \frac{M_{\text{дин.маx}i} + M_{\text{дин.мин}i}}{2}, \quad (7.62)$$

где $M_{\text{дин.маx}i}$, $M_{\text{дин.мин}i}$ – максимальное и минимальное значения динамического момента на i -м участке;

– определяют время переходного процесса, которое требуется для достижения скорости $\omega_i = \omega_{начi} + \Delta\omega_i$ на каждом участке:

$$\Delta t_i = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{дин.ср.i}} \text{ с}, \quad (7.63)$$

где $\Delta\omega_i$ – приращение скорости на i -м участке.

Полученные на отдельных участках элементарные промежутки времени суммируются для определения полного времени переходного процесса:

$$t = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta t_i \text{ с}, \quad (7.64)$$

где m – число участков разбиения механической характеристики;

– по графику электромеханической характеристики $I_1 = f(\omega)$ определяют значения тока I_{1i} , соответствующие конечной угловой скорости ω_i каждого участка.

Все необходимые вычисления удобно произвести по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представить в виде таблицы 7.6.

Таблица 7.6 – Результаты вычислений для построения графиков переходных процессов по первой пусковой характеристике

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{динi}$	Время п. п. на рассматриваемом участке Δt_i	Время с начала п. п., t_i	Конечное значение $M_{дв}$ на участке	Конечное значение тока I_1 на участке
1	23,5	0	70,1	0	0	117,3	28,7
1–2	28,5	5	68,3	0,0212	0,0211	112,9	27,5
2–3	33,5	5	64,6	0,0221	0,0436	109,7	26,3
3–4	38,5	5	60,6	0,0239	0,0675	105,5	25,1
4–5	43,5	5	56,2	0,0258	0,0933	100,8	23,8
5–6	48,2	4,71	51,4	0,0266	0,1120	96,0	22,6

Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ приведены на рисунке 7.18.

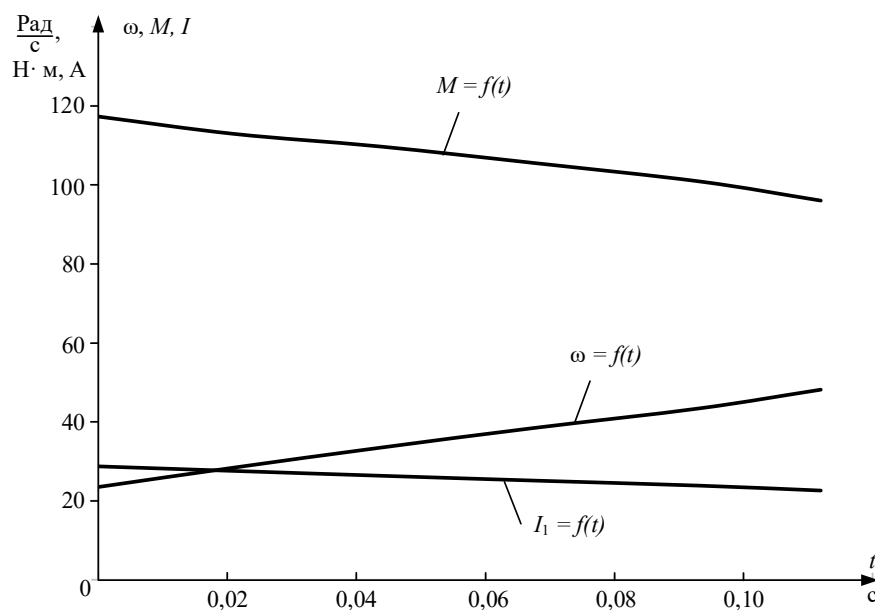


Рисунок 7.18 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$

– Вторая пусковая характеристика (см. характеристики 4 на рисунке 7.13 и рисунке 7.15)

Вторая пусковая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рисунке 7.19.

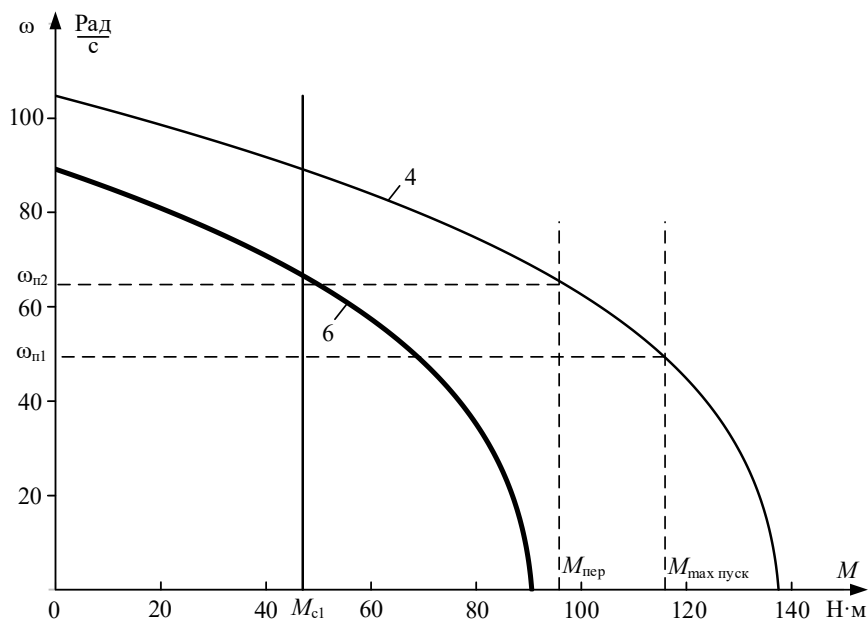


Рисунок 7.19 – Механические характеристики электропривода: 4 – вторая пусковая механическая характеристика электропривода; 6 – динамический момент электропривода от скорости

Переходный процесс по второй пусковой характеристике протекает между скоростями переключения $\omega_{n1} = 48,2$ рад/с и $\omega_{n2} = 65,3$ рад/с.

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде таблицы 7.7.

Таблица 7.7 – Результаты вычислений для построения графиков переходных процессов по второй пусковой характеристике

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{динi}$	Время п. п. на рассматриваемом участке Δt_i	Время с начала п. п., t_i	Конечное значение $M_{дв}$ на участке	Конечное значение тока I_1 на участке
1	48,2	0	70,0	0	0	117,2	28,7
1–2	51,2	3	68,6	0,0127	0,0127	114,0	27,7
2–3	54,2	3	65,5	0,0133	0,026	110,8	26,7
3–4	57,1	3	62,0	0,0140	0,040	107,3	25,6
4–5	60,1	3	58,3	0,0149	0,0549	103,4	24,5
5–6	65,3	5,17	52,7	0,0165	0,0714	96,3	22,61

Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$, построенные по точкам, приведены на рисунке 7.20.

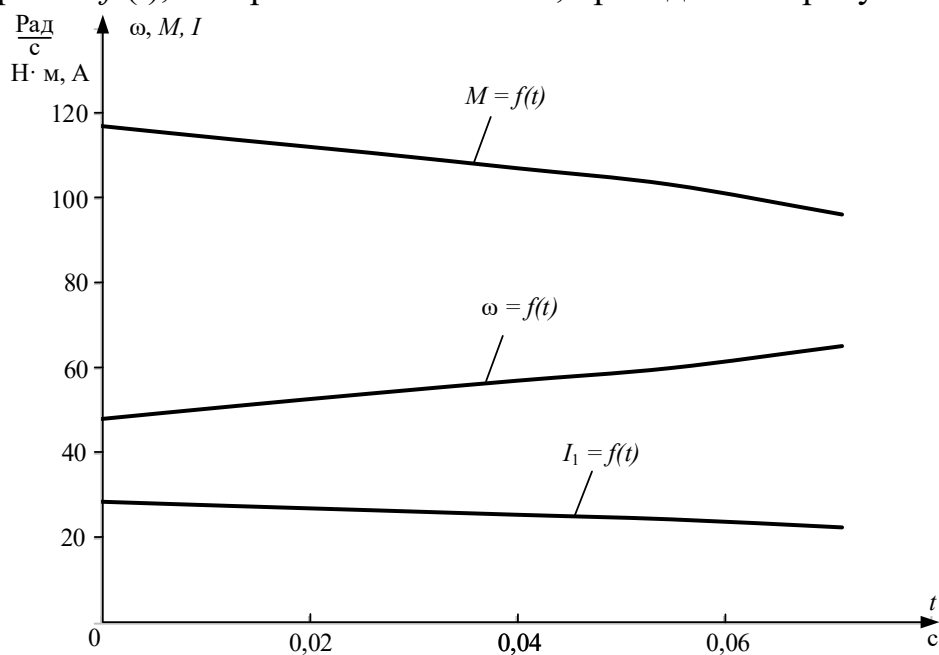


Рисунок 7.20 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ пуска двигателя по второй пусковой характеристике

Во избежание ошибок необходимо контролировать начальные и конечные значения переменных тока I и скорости ω по статическим электромеханическим характеристикам и по графикам переходных процессов. В точках контроля должно быть их соответствие.

- Вторая технологическая характеристика (см. характеристики 2 на рисунках 7.13 и 7.15)

Вторая технологическая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рисунке 7.21.

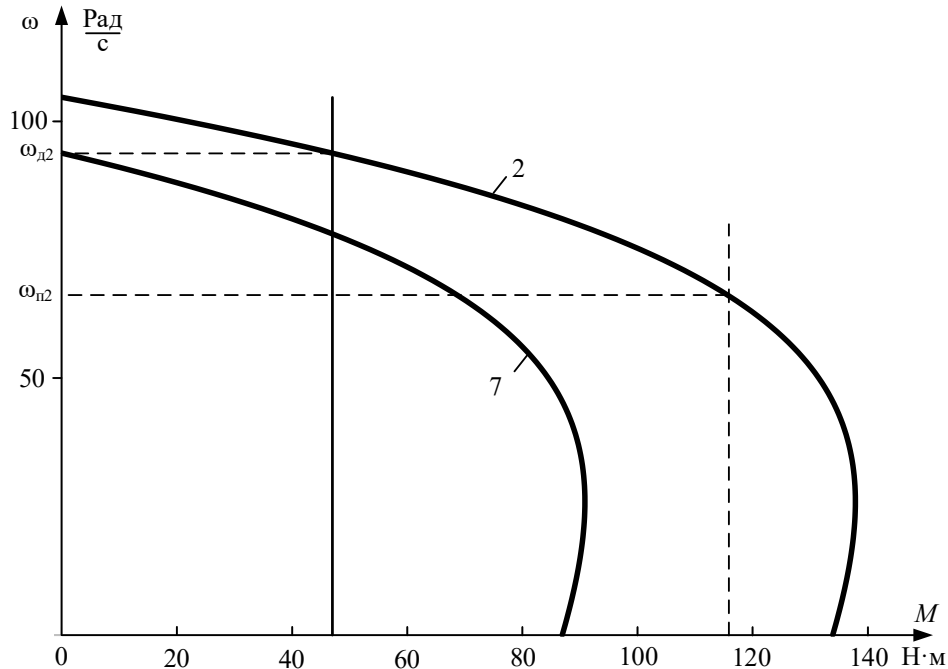


Рисунок 7.21 – Механические характеристики электропривода:

2 – вторая технологическая механическая характеристика электропривода;

7 – зависимость динамического момента электропривода от скорости

Переходный процесс по второй технологической характеристике протекает между скоростью переключения $\omega_{п2} = 65,333$ рад/с и второй технологической скоростью электропривода $\omega_{д2} = 93,778$ рад/с.

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде таблицы 7.8.

Таблица 7.8 – Результаты вычислений для построения графиков переходных процессов по второй технологической характеристике

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{динi}$	Время п. п. на рассматриваемом участке Δt_i	Время с начала п. п., t_i	Конечное значение $M_{дв}$ на участке	Конечное значение тока I_1 на участке
1	65,3	0	69,8	0	0	117,2	28,6

1	2	3	4	5	6	7	8
1–2	70,3	5	66,0	0,0220	0,022	109,2	26,2
2–3	75,3	5	57,5	0,0250	0,047	99,8	23,6
3–4	80,3	5	47,3	0,0307	0,078	88,7	20,9
4–5	85,3	5	35,0	0,0414	0,119	75,3	18,0
5–6	90,3	5	20,3	0,0713	0,190	59,4	15,1
6–7	93,8	3,45	6,20	0,2340	0,424	47,0	13,2

Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$, построенные по точкам таблицы 7.9, приведены на рисунке 7.22.

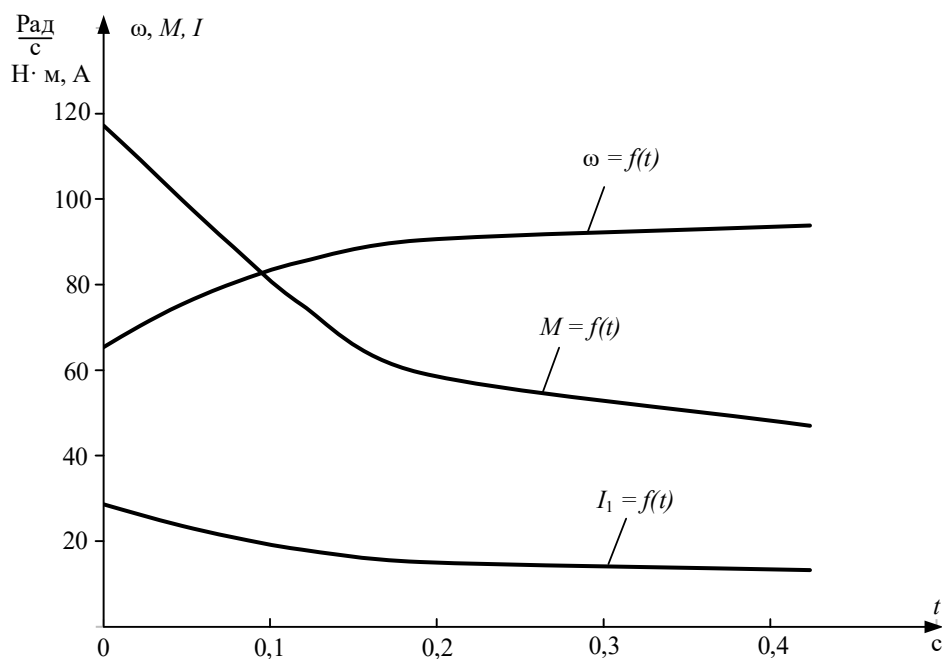


Рисунок 7.22 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ пуска двигателя по второй пусковой характеристике

– Характеристика динамического торможения (см. характеристику 5 на рисунке 7.13)

Определение начальных условий для процесса динамического торможения при реактивном характере нагрузки поясняет механические характеристики электропривода, приведенные на рисунке 7.23.

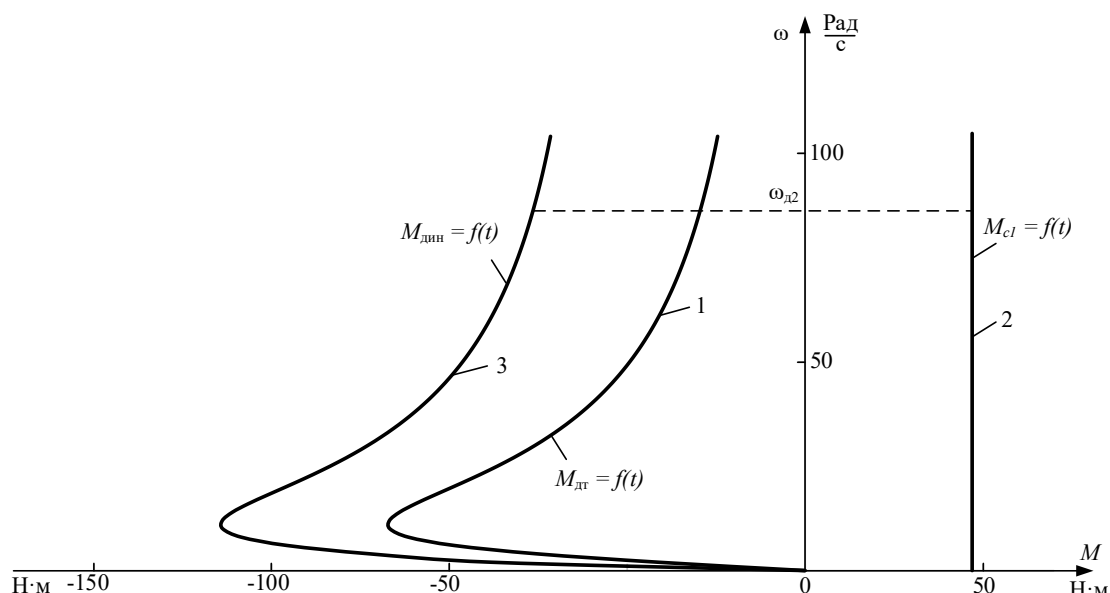


Рисунок 7.23 – Механические характеристики: 1 – двигателя в режиме динамического торможения; 2 – механизма, приведенная к валу двигателя; 3 – электропривода динамическая режима динамического торможения

Как следует из уравнения движения электропривода:

$$-M_{дт} - M_{с1} = M_{дин}$$

и момент, развиваемый электрической машиной, $-M_{дт}$, и момент механизма $-M_{с1}$, приведенный к валу двигателя, являются тормозными, поэтому складываются.

Переходный процесс по характеристике динамического торможения протекает от второй технологической скорости электропривода $\omega_{д2} = 93,8$ рад/с до полной его остановки $\omega = 0$.

Эквивалентный переменный ток статора на участке динамического торможения:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{кТД} \cdot (X_{mн} + X'_{2\sigmaн})}{3 \cdot X_{mн}^2}} \quad (7.65)$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,3 \cdot (20,0 + 2,04)}{3 \cdot 20,0^2}} = 21,2 \text{ А.}$$

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде таблицы 7.9.

Таблица 7.9 – Результаты вычислений для построения графиков переходных процессов по характеристике динамического торможения

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{динi}$	Время п. п. на рассматриваемом участке Δt_i	Время с начала п. п., t_i	Конечное значение $M_{дв}$ на участке	Конечное значение тока I_1 на участке
1	93,8	0	-64,6	0	0	-17,6	21,3
1–2	83,8	10	-65,6	0,044	0,044	-19,7	21,3
2–3	73,8	10	-68,0	0,043	0,087	-22,3	21,3
3–4	63,8	10	-71,0	0,041	0,128	-25,7	21,3
4–5	53,8	10	-75,0	0,039	0,167	-30,3	21,3
5–6	43,8	10	-80,6	0,036	0,203	-37,0	21,3
6–7	33,8	10	-89,0	0,033	0,236	-47,1	21,3
7–8	23,8	10	-102,6	0,028	0,264	-64,1	21,3
8–9	18,8	5	-117,8	0,012	0,276	-77,4	21,3
9–10	15,8	5	-129,5	0,011	0,287	-87,6	21,3
10–11	10,8	5	-144,6	0,010	0,297	-107,6	21,3
11–12	5,78	5	-158,2	0,009	0,306	-114,9	21,3
12–13	2,78	3	-144,4	0,006	0,312	-79,8	21,3
13–14	0	2,78	-63,4	0,0127	0,325	0	21,3

Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$, построенные по точкам таблицы 7.10, приведены на рисунке 7.24.

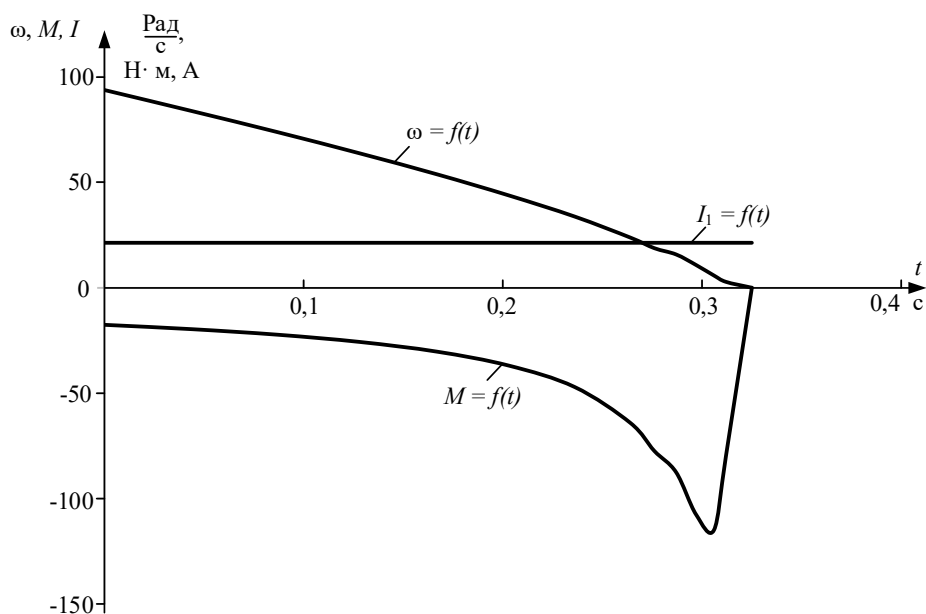


Рисунок 7.24 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ двигателя в режиме динамического торможения

По данным таблиц 7.6–7.10 построим графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ для полного цикла работы электропривода (рисунок 7.25).

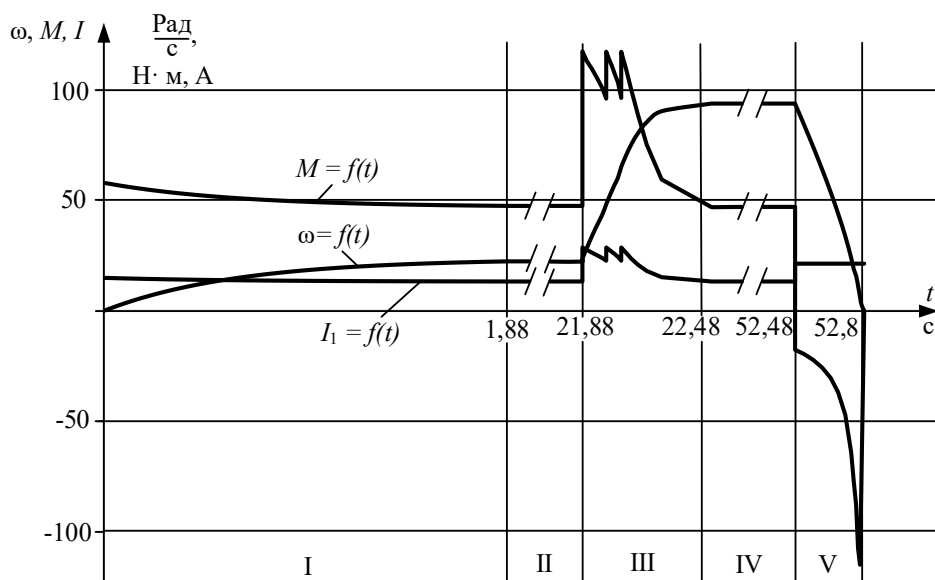


Рисунок 7.25 – Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I_1 = f(t)$ для полного цикла работы электропривода: I – пуск двигателя на первую скорость; II – работа на первой скорости; III – переход в две ступени на вторую скорость; IV – работа на второй скорости; V – динамическое торможение

Как следует из анализа рисунка 7.25, время включенного состояния электропривода с учетом переходных режимов увеличилось и составляет $t_p = 52,8$ с.

7.7 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность.

Проверка двигателя постоянного тока по нагреву производится на основе рассчитанных графиков переходных процессов тока для полного цикла работы электропривода и его режима работы.

Обычно применяются методы среднеквадратичного (эквивалентного) тока.

В общем виде эквивалентный ток двигателя за рабочий цикл можно вычислить по следующему уравнению:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\sum t_p + \sum t_{\text{пп}}} I^2(t) \cdot dt}{\sum t_i \cdot \beta_i}}, \quad (7.66)$$

где $I_{\text{э}}$ – искомое значение эквивалентной величины тока, А; $\sum t_p$ – суммарное время работы за цикл, с; $\sum t_{\text{пп}}$ – суммарное время переходных процессов за цикл, с; t_i – время работы на i -м участке, с; β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м участке. Находится по формуле (7.5)

При повторно-кратковременном режиме работы суммарное время состоит только из рабочего времени. Разбив переходный процесс на отдельные участки времени и определив на этих участках средний ток, найдем эквивалентный ток двигателя на интервале времени работы:

$$\begin{aligned} I_{1\text{э}} &= \sqrt{\frac{14,4^2 \cdot 0,25 + 14,2^2 \cdot 0,25 + 13,8^2 \cdot 0,5 + 13,5^2 \cdot 0,88}{0,25 \cdot 0,54 + 0,25 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,58 + 0,88 \cdot 0,6}} \rightarrow \\ &\rightarrow \sqrt{\frac{0,88 + 13,2^2 \cdot 20 + 28,1^2 \cdot 0,02 + 26,9^2 \cdot 0,022 + 25,7^2 \cdot 0,024}{0,6 + 20 \cdot 0,62 + 0,02 \cdot 0,64 + 0,022 \cdot 0,66 + 0,024 \cdot 0,69}} \rightarrow \\ &\rightarrow \sqrt{\frac{0,024 + 24,5^2 \cdot 0,026 + 23,2^2 \cdot 0,027 + 27,7^2 \cdot 0,026 + 0,026 \cdot 0,71 + 0,027 \cdot 0,74 + 0,026 \cdot 0,77 + 24,5^2 \cdot 0,029 + 26,2^2 \cdot 0,047 + 18^2 \cdot 0,143 + 14,2^2 \cdot 0,23}{0,045 \cdot 0,81 + 0,047 \cdot 0,87 + 0,143 \cdot 0,94 + 0,23 \cdot 0,98}} \rightarrow \\ &\rightarrow \sqrt{\frac{0,23 + 13,2^2 \cdot 30 + 21,3^2 \cdot 0,325}{0,98 + 30 \cdot 0,99 + 0,325 \cdot 0,75}} = 14,7 \text{ А}. \end{aligned} \quad (7.67)$$

При повторно-кратковременном режиме работы эквивалентные величины пересчитываются на каталожные значения продолжительности включения и длительности работы.

Определим относительную продолжительность включения, с учетом переходных режимов и торможения:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{t_{\text{пп1}} + t_{p1} + t_{\text{пп2}} + t_{\text{пп3}} + t_{\text{пп4}} + t_{p2} + t_{\text{т}}}{t_{\text{пп1}} + t_{p1} + t_{\text{пп2}} + t_{\text{пп3}} + t_{\text{пп4}} + t_{p2} + t_{\text{т}} + t_0} \cdot 100 \%. \quad (7.68)$$

При подстановке численных значений параметров получим:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{1,88 + 20 + 0,12 + 0,07 + 0,424 + 30 + 0,325}{1,88 + 20 + 0,12 + 0,0714 + 0,424 + 30 + 0,325 + 100} \cdot 100 \% = 32,4 \%.$$

Пересчитаем эквивалентное значение тока на стандартное значение:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{э}}}{\text{ПВ}_{\text{к}}}} = 14,7 \cdot \sqrt{\frac{32,4}{40}} = 13,2 \text{ А}. \quad (7.69)$$

Пересчитанная величина тока $I_{\text{к}}$ сопоставляется с номинальной величиной тока $I_{1\text{н}}$ выбранного двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$I_k \leq I_{1н}, \quad (7.70)$$

где I_k – пересчитанная на каталожную эквивалентная величина тока, А;
 $I_{1н}=13,6\text{А}$ – номинальное значение тока статора асинхронного двигателя;

$$13,2 \text{ А} < 13,6 \text{ А}.$$

Условие проверки двигателя на нагрев выполняется, значит, двигатель выбран правильно.

Условие перегрузки учитывалось при построении пусковых механических характеристик.

7.8 Схема управления электроприводом

Схема силовых цепей электропривода приведена на рисунке 7.26. Питание асинхронного двигателя осуществляется от трехфазной сети переменного тока через рубильник $QF1$, предохранители $FU1$, реле максимального тока $KA1...KA3$. Пуск асинхронного двигателя и регулирование его скорости осуществляются с помощью силовых контактов цепи обмотки статора KM ; в роторную цепь двигателя M включены два регулировочных резистора – $R_{2доб1}$, $R_{2доб2}$ и два пусковых резистора – $R_{2доб3}$, $R_{2доб4}$, которые шунтируются силовыми контактами схемы: регулировочным $KM3$ и ускорения $KM1$, $KM2$. Динамическое торможение схемы осуществляется постоянным напряжением, поданным на две обмотки статора двигателя через силовые контакты динамического торможения $KM4$ и токоограничивающий резистор цепи статора R_T .

Релейно-контакторная схема управления электроприводом приведена на рисунке 7.27. Так как электропривод работает в интенсивном режиме с частыми пусками и торможениями двигателя, схема управления электроприводом выполнена на постоянном токе. Выпрямитель $VD1...VD4$ однофазный, подключен к сети переменного тока через автомат $QF2$, предохранители $FU2$ и реле максимального тока $KA4$.

Электропривод работает следующим образом. Перед пуском включают автоматы $QF1$ и $QF2$. На схему силовых цепей подается напряжение переменного тока, а на схему управления – напряжение постоянного тока U . Подача напряжения на схему управления приводит к включению реле времени $KT1$, которое размыкает свои контакты в цепях контакторов $KM1$ и $KM3$. Схема подготовлена к включению.

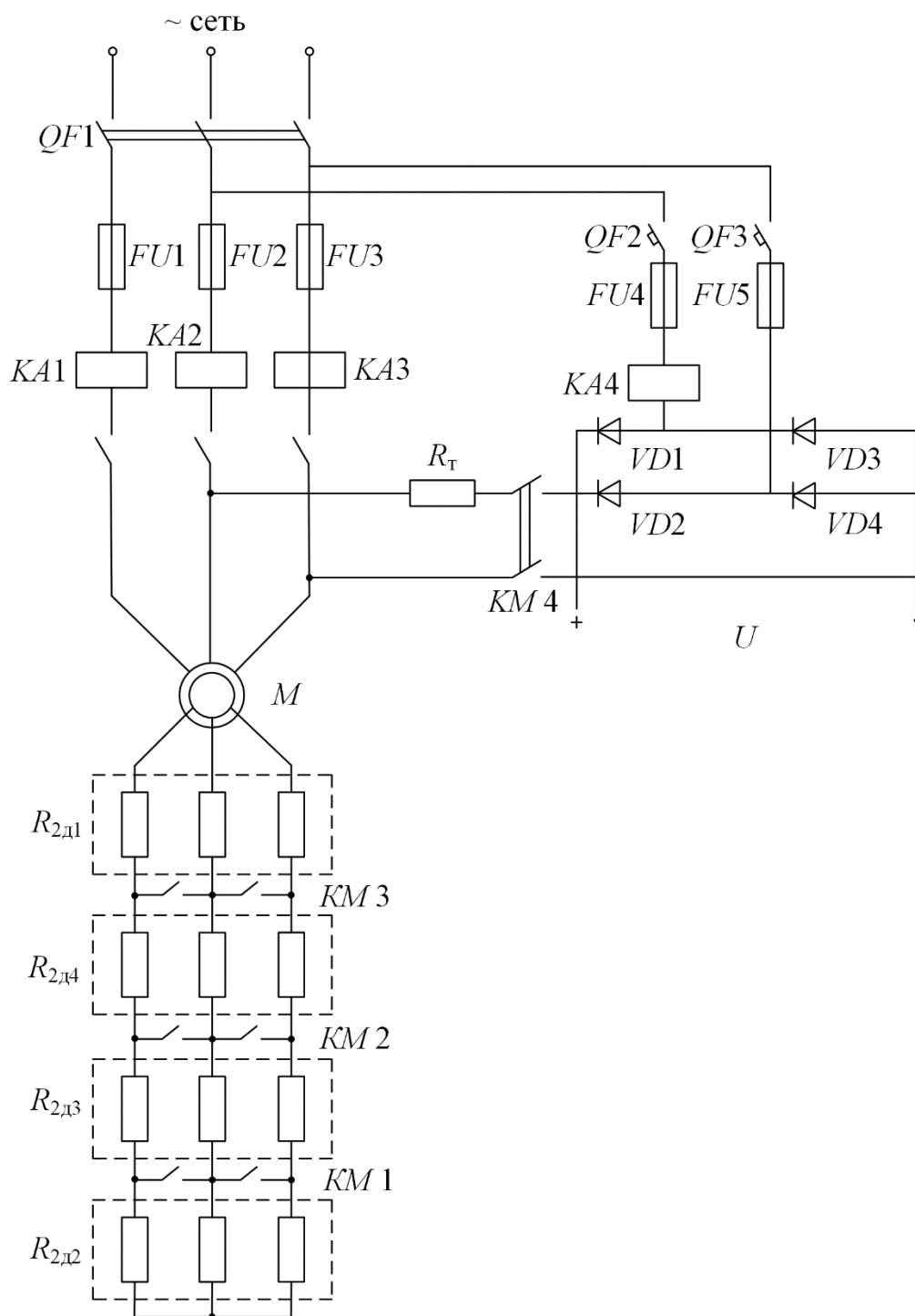


Рисунок 7.26 – Схема силовых цепей асинхронного электропривода

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки $SB1$. Если реле максимального тока $KA1$, $KA2$, $KA3$, $KA4$ и реле времени $KT4$ находятся в выключенном состоянии, срабатывает контактор KM , подключая обмотку статора асинхронного двигателя M к сети переменного напряжения, и он начинает разгоняться по первой технологической характеристике с полностью введенными сопротивлениями в цепи обмотки ротора. Кроме того, замыкаются вспомогательные замыкающие контакты KM в цепи реле времени $KT2$, $KT3$, $KT4$ и в цепи реле времени $KT5$ и размыкаются размыкающие контакты KM в

цепи контакторов $KM3$, $KM4$ и реле времени $KT1$. Реле времени $KT1$, потеряв питание вследствие размыкания контакта KM , начинает отсчет выдержки времени разгона по первой технологической характеристике до скорости $\omega_{д1}$ (см. рисунок 7.13), и время работы на ней составляет 20 с (см. рисунок 7.25).

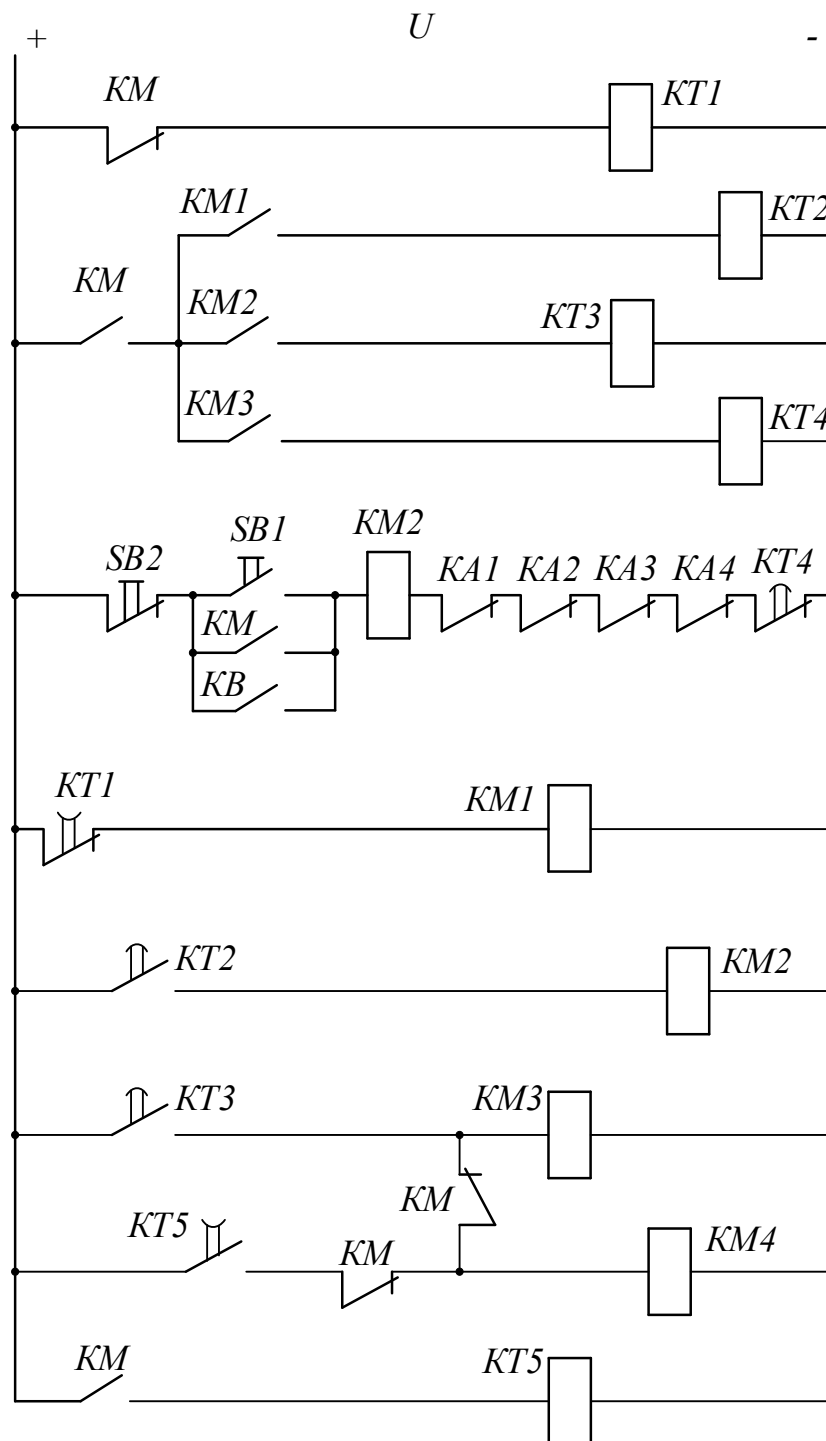


Рисунок 7.27 - Схема управления электропривода

Через 21,88 с размыкающий контакт $KT1$ замкнется и включится контактор $KM1$. Контактор $KM1$, включившись, закорачивает резисторы $R_{2доб2}$ в цепи обмотки ротора двигателя и одновременно своим замыкающим контактом

подает напряжение питания на катушку реле времени $KT2$. Последнее включается и начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике 3 (см. рисунок 7.13).

По истечении времени (0,112 с) замыкающий контакт реле времени $KT2$ замыкается. Получает питание контактор $KM2$; он, включившись, своим замыкающим контактом $KM2$ шунтирует первые пусковые резисторы $R_{2доб3}$. Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 4 (см. рисунок 7.13). Получает питание реле времени $KT3$, и своим замыкающим контактом $KT3$ начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени (0,0714 с) контакт $KT3$ замыкается. Получает питание обмотка контактора $KM3$, замыкается контакт $KM3$ в роторной цепи асинхронного двигателя, шунтирующий резисторы $R_{2доб4}$, двигатель переходит на вторую технологическую характеристику – 2 и разгоняется по ней до установившейся скорости $\omega_{д2}$, определяемой нагрузкой $M_{с1}$.

Кроме того, замыкается контакт $KM3$ в цепях схемы управления электроприводом, включается реле времени $KT4$, и оно начинает отсчет выдержки времени пуска и работы электропривода на второй технологической характеристике – 30,424 с.

По истечении этого времени реле времени $KT4$ размыкает свой размыкающий контакт в цепи силового контактора KM . Силовой контактор KM теряет питание и отключает обмотку статора двигателя M от трехфазной сети переменного напряжения, а в цепях схемы управления выключает все реле времени и, как следствие, все силовые контакторы.

Начинается процесс динамического торможения двигателя. Реле времени $KT5$, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени динамического торможения, а размыкающие контакты KM включают контакторы $KM3$ и $KM4$. Контактор $KM3$, вновь включившись, оставляет в цепи обмотки ротора двигателя сопротивления $R_{2доб1}$, а контакторы $KM4$ подключают обмотку статора двигателя к источнику постоянного напряжения. По истечении выдержки времени (0,325 с) замыкающий контакт реле времени $KT5$ разомкнется, выключит контактор $KM4$, и процесс динамического торможения закончится.

Повторное включение двигателя должно произойти через интервал времени паузы $t_{п} = 110$ с при управлении от внешних устройств замыканием контакта KB или нажатием кнопки $SB1$ на пульте управления электроприводом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чиликин, М. Г., Сандлер, А. С. Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Москаленко, В. В. Автоматизированный электропривод: учеб. для вузов / В. В. Москаленко. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
3. Длоугий, В. В. Приводы машин: справочник / В. В. Длоугий, Т. И. Муха, А. П. Цупиков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. – 383 с.
4. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.
5. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
6. Мощинский, Ю. А., Беспалов, В. Я., Кирякин, А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 39–42.
7. Автоматизированный электропривод промышленных установок / под ред. Г. Б. Онищенко. – Москва: РАСХН, 2001. – 520 с.
8. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – Москва: Энергия, 1977. – 432 с.
9. Андреев, В. П., Сабинин, Ю. А. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – Ленинград–Москва: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.
10. Чернышев, А. Ю., Кояин, Н. В. Проектирование электрических приводов: учебно-метод. пособие / А. Ю. Чернышев, Н. В. Кояин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.

ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ MATHCAD

Механической характеристикой асинхронного двигателя называется зависимость момента, развиваемого двигателем, в функции от скольжения

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{2di})}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + (R'_2 + R'_{2di}) \cdot s^{-1})^2 + X_{KH}^2]} \quad (6.39)$$

Однако расчет механических характеристик асинхронного двигателя при выполнении РГР удобнее производить в координатах момента в функции от скорости двигателя. Пример записи программы расчета механических характеристик в математической системе MathCAD имеет следующий вид:

$s := 0, 0.001 .. 1$

$\omega_0 := 104.7$

$\omega_1(s) := \omega_0 \cdot (1 - s)$

$$M_1(s) := \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1.797 + 18.53)}{104.7 \cdot s \cdot \left[\left(1.41 + \frac{1.797 + 18.53}{s} \right)^2 + (1.29 + 2.044)^2 \right]}$$

$$M_2(s) := \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1.797 + 0.926)}{104.7 \cdot s \cdot \left[\left(1.41 + \frac{1.797 + 0.926}{s} \right)^2 + (1.29 + 2.044)^2 \right]}$$

В математической системе MathCAD механические характеристики могут быть построены в виде графика, как показано на рисунке П1.1.

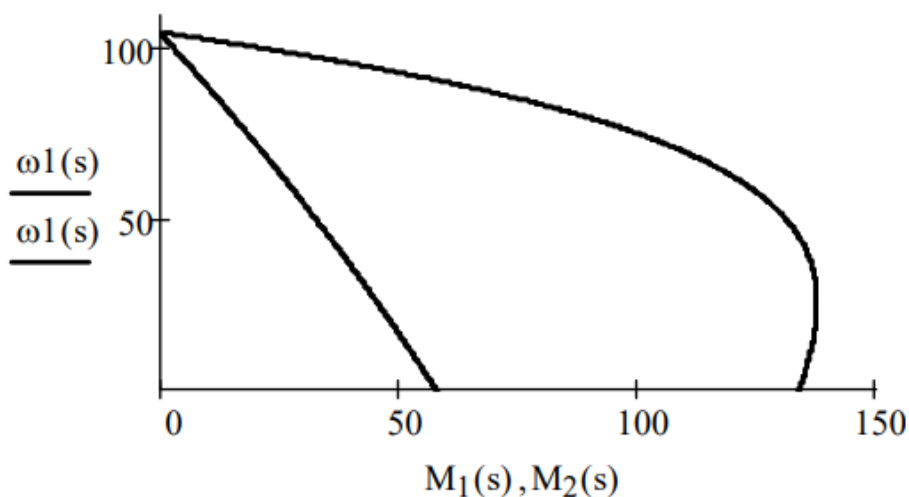


Рисунок П1.1 – Механические характеристики асинхронного двигателя, рассчитанные в математической системе MathCAD

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДОБАВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ MATHCAD

Приведенный пример расчета используется для нахождения добавочных сопротивлений для пусковых характеристик. По аналогичному принципу можно найти добавочные сопротивления для технологических характеристик. До расчета были получены следующие значения (см. раздел 7): $m_1 = 3$; $U_{1\phi H} = 220$ В; $R'_2 = 1,797$ Ом; $R'_{д1} = 18,53$ Ом; $\omega_0 = 104,7$ рад/с; $R_1 = 1,41$ Ом; $R'_{д2} = 0,926$ Ом; $X_{кн} = 3,33$ Ом; $M_{с1} = 46,99$ Н·м; $M_{\max \text{ пуск}} = 117,27$ Н·м; $M_{\text{пер}} = 62,32$ Н·м; $\omega_{д1} = 23,442$ рад/с; $\omega_{д2} = 93,778$ рад/с.

Находим $R'_{п1}$ в системе MathCAD из условия, что первая пусковая характеристика проходит через точку с координатами $\omega_{д1}$; $M_{\max \text{ пуск}}$ и ту же точку идеального х.х., что и технологические характеристики:

Given
 $R'_{п1} := 100$

$$M_{\max \text{ пуск}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п1})}{(\omega_0 - \omega_{д1}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п1}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{д1}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$R'_{п1} := \text{Find}(R'_{п1}) = 3.78$

В данном примере после оперативного слова «Given» идет выражение, задающее начальное значение переменной для нахождения ее последующим итерационным методом «Find». Обычно в этом выражении ставят единицу, но в нашем случае при таком начальном значении может возникать отрицательное число в ответе. Это связано с квадратом в уравнении. Поэтому рекомендуется выбирать начальное значение искомой переменной намного больше единицы, например, 100. При необходимости это значение можно увеличить или уменьшить.

Далее находим скорость, на которой должно произойти второе переключение:

Given
 $\omega_{п2} := 100$

$$M_{\max \text{ пуск}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{д2})}{(\omega_0 - \omega_{п2}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{д2}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{п2}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$\omega_{п2} := \text{Find}(\omega_{п2}) = 65.026$

Проверяем условие $M_{\text{пер}} \geq 62,32$ Н·м:

Given

$$M_{\text{пер}} := 100$$

$$M_{\text{пер}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п1})}{(\omega_0 - \omega_{п2}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п1}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{п2}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$$M_{\text{пер}} := \text{Find}(M_{\text{пер}}) = 75.261$$

Как видно, даже при одной пусковой характеристике выполняется условие $M_{\text{пер}} > 1,1M_H$. Однако для увеличения эффективности разгона были выбраны две пусковые характеристики. В случае, если они будут близки друг к другу, оставим лишь одну. Найдем $R'_{п2}$:

Given

$$R'_{п2} := 100 \quad \omega_{п1} := 100 \quad M_{\text{пер}} := 100$$

$$M_{\text{пер}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п1})}{(\omega_0 - \omega_{п1}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п1}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{п1}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$$M_{\text{мазпуск}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п2})}{(\omega_0 - \omega_{п1}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п2}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{п1}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$$M_{\text{пер}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п2})}{(\omega_0 - \omega_{п2}) \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п2}) \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_{п2}}{\omega_0} \right)^{-1} \right]^2 + X_{кн}^2}$$

$$H := \text{Find}(R'_{п2}, \omega_{п1}, M_{\text{пер}}) = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 47.922 \\ 96.468 \end{pmatrix}$$

$$R'_{п2} := H_0$$

$$\omega_{п1} := H_1$$

$$M_{\text{пер}} := H_2$$

В итоге строим полученные механические характеристики, обозначаем на графике характерные точки, вертикальными штриховыми – $M_{с1}$, $M_{\text{мазпуск}}$, $M_{\text{пер}}$, горизонтальными штриховыми – переходы с одной характеристики на другую:

$$\begin{aligned}\omega_1(s) &:= \omega_0 \cdot (1 - s) \\ M_1(s) &:= \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{д1})}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{д1}) \cdot s^{-1} \right]^2 + X_{кH}^2} \\ M_2(s) &:= \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п2})}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п2}) \cdot s^{-1} \right]^2 + X_{кH}^2} \\ M_3(s) &:= \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п1})}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п1}) \cdot s^{-1} \right]^2 + X_{кH}^2} \\ M_4(s) &:= \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R'_2 + R'_{п2})}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[R_1 + (R'_2 + R'_{п2}) \cdot s^{-1} \right]^2 + X_{кH}^2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x &:= M_{c1} \dots M_{\text{махпуск}} & x_1 &:= M_{\text{пер}} \dots M_{\text{махпуск}} & x_2 &:= 0 \dots M_{c1} \\ y_1 &:= 0 \dots \omega_{д2} + 10 & y_2 &:= 0 \dots \omega_{п2} + 10\end{aligned}$$

$$Tocki := \begin{pmatrix} M_{c1} & \omega_{д1} \\ M_{c1} & \omega_{д2} \\ M_{\text{пер}} & \omega_{п1} \\ M_{\text{пер}} & \omega_{п2} \\ M_{\text{махпуск}} & \omega_{д1} \\ M_{\text{махпуск}} & \omega_{п1} \\ M_{\text{махпуск}} & \omega_{п2} \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{шаг}} := 0,0001 \dots 1$$

Полученный график приведен на рисунке П2.1.

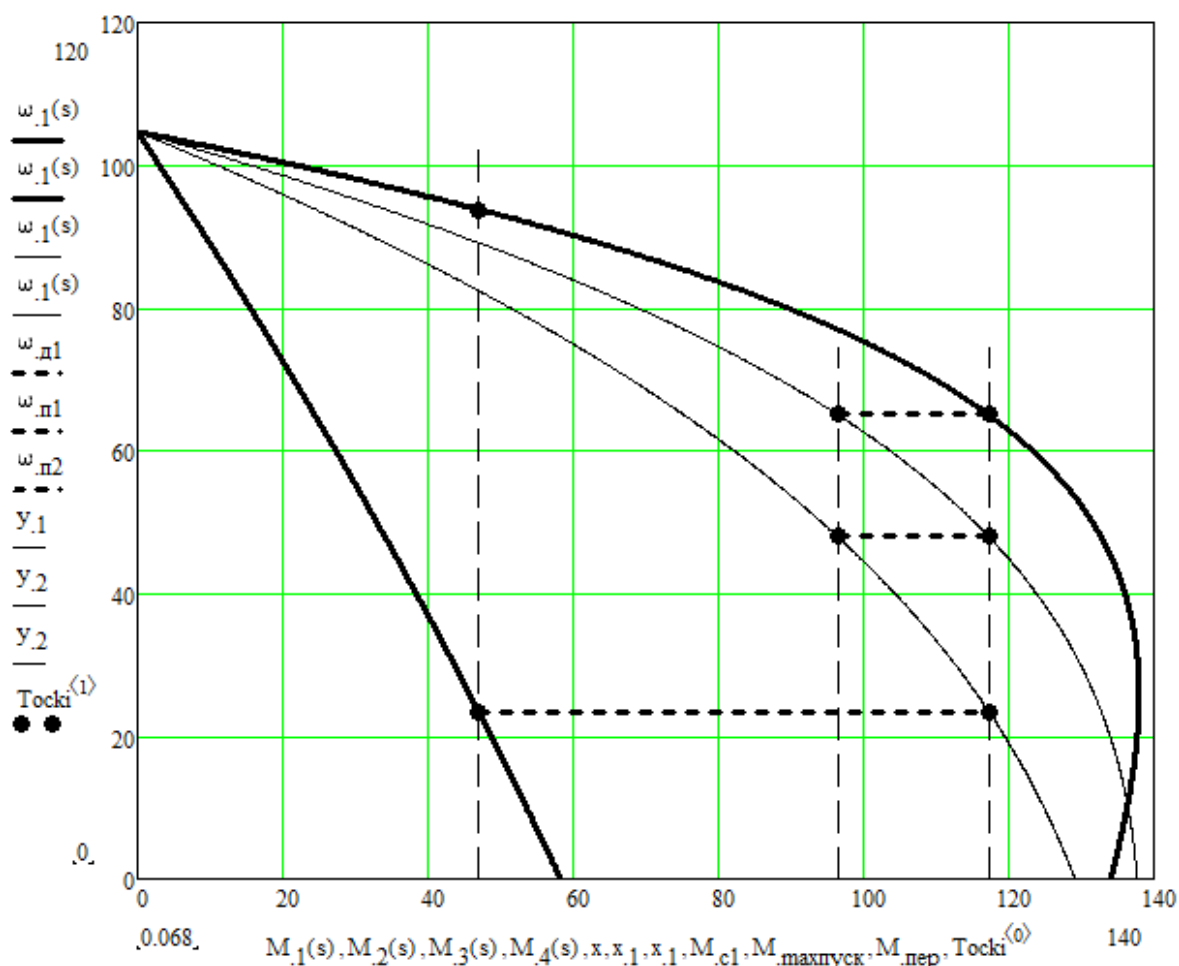


Рисунок П2.1 – Технологические и пусковые механические характеристики, рассчитанные в системе MathCAD

Рекомендуется на графике наносить стрелки с направлениями движения по характеристикам и по переходам между ними, как на рисунке 7.10. При построении своих графиков стоит обращать внимание на формирование сетки, при необходимости лучше отключать автосетку и формировать ее вручную для большей наглядности.

Приложение 3

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ, МТВ, МТН ($U_{1л} = 380$ В; $U_{1ф} = 220$ В; 50 Гц; ПВ, % = 25)

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	M_{max}/M_H	Статор					
				$\cos\phi$		I_{1H} , А	I_0 , А	R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом
				ном.	х.х.				
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
МТ011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93
МТ012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58
МТ111-6	3,5	915	2,3	0,7	0,11	10,5	6,6	2,116	203
МТ112-6	5	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39
МТ211-6	7,5	935	2,5	0,7	0,09	20,8	11,8	0,68	107
МТВ311-6	11	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,575
МТВ311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21	14	0,88	0,965
МТВ312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41
МТВ312-8	11	710	2,8	0,66	0,1	33	22,1	0,53	0,56
МТВ411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55	33,2	0,19	0,31
МТВ411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43
МТВ412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42	0,125	0,23
МТВ412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32
МТВ511-8	30	720	2,8	0,68	0,06	77	46	0,123	0,245
МТВ512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17
МТВ611-10	45	575	3	0,7	0,066	115	80	0,087	0,189
МТВ612-10	60	578	3	0,72	0,061	145	93	0,055	0,142
МТВ613-10	80	580	3	0,72	0,056	190	120	0,042	0,107
МТВ711-10	100	584	2,8	0,67	0,053	255	180	0,025	0,096
МТВ712-10	125	587	2,8	0,66	0,045	320	230	0,016	0,08
МТВ713-10	160	587	2,8	0,68	0,04	395	285	0,012	0,061
МТН111-6	3,5	870	1,2	0,72	0,154	11,6	9,87	2,62	1,7
МТН112-6	5,3	885	2	0,76	0,123	15,3	11,8	1,61	1,14
МТН211-6	832	900	2	0,7	0,112	24,6	19	0,835	0,88
МТН311-6	13	925	2,5	0,74	0,095	35	23,2	0,51	0,645
МТН312-6	17,5	945	2,4	0,77	0,092	43	34,4	0,337	0,431
МТН311-8	9	675	2	0,74	0,12	26,1	17,7	0,98	0,843
МТН312-8	13	690	2,5	0,74	0,106	34,7	27,5	0,534	0,529
МТН411-6	27	950	3	0,77	0,08	65	39,7	0,219	0,271
МТН412-6	36	955	3,1	0,75	0,071	87	51,8	0,133	0,197
МТН411-8	18	695	2,5	0,73	0,086	48	29,8	0,352	0,507
МТН412-8	26	710	2,5	0,68	0,084	72	49,6	0,202	0,313
МТН511-8	34	695	2,3	0,77	0,07	82	47,4	0,164	0,232
МТН512-8	45	695	3	0,79	0,08	104	53,1	0,103	0,172
МТН611-10	53	560	3,2	0,76	0,08	128	78,1	0,086	0,18
МТН612-10	70	560	2,6	0,77	0,06	165	88,7	0,06	0,136
МТН613-10	90	570	2,1	0,76	0,06	207	120	0,042	0,102
МТН711-10	125	580	2,3	0,74	0,042	287	155	0,026	0,078
МТН712-10	155	580	2,3	0,75	0,044	355	183	0,02	0,064
МТН713-10	200	582	2,3	0,73	0,042	458	247	0,014	0,048

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	$J_{дв}$, кг·м ²	Ротор				
				E_{2H} , В	I_{2H} , А	R_2 , Ом	$X_{2\sigma}$, Ом	k_e , о.е.
MT011-6	1,4	885	0,0212	112	9,3	0,695	0,565	3,14
MT012-6	2,2	895	0,0288	144	11	0,67	0,585	2,5
MT111-6	3,5	915	0,0488	181	13,7	0,525	0,755	1,96
MT112-6	5	925	0,0675	206	16,6	0,5	0,43	1,72
MT211-6	7,5	935	0,115	255	19,8	0,44	0,88	1,38
MTB311-6	11	945	0,225	172	42,5	0,11	0,225	2,1
MTB311-8	7,5	695	0,275	251	20,5	0,47	0,72	1,41
MTB312-6	16	955	0,313	208	49,5	0,099	0,25	1,75
MTB312-8	11	710	0,385	182	41	0,13	0,23	1,96
MTB411-6	22	965	0,5	225	61	0,066	0,23	1,6
MTB411-8	16	715	0,538	207	49,5	0,103	0,25	1,73
MTB412-6	30	970	0,675	259	72	0,055	0,225	1,4
MTB412-8	22	720	0,75	234	59	0,09	0,24	1,53
MTB511-8	30	720	1,025	280	67,5	0,082	0,28	1,28
MTB512-8	40	730	1,4	322	76,5	0,072	0,24	1,12
MTB611-10	45	575	4,25	185	155	0,027	0,046	1,93
MTB612-10	60	578	5,25	245	153	0,033	0,062	1,44
MTB613-10	80	580	6,25	320	155	0,038	0,078	1,12
MTB711-10	100	584	10,25	275	230	0,017	0,066	1,28
MTB712-10	125	587	12,7	345	225	0,02	0,082	1,01
MTB713-10	160	587	15	420	235	0,022	0,098	0,84
MTH111-6	3,5	870	0,195	178	16,5	0,671	0,565	4,54
MTH112-6	5,3	885	0,27	217	19	0,603	0,625	3,1
MTH211-6	832	900	0,46	257	23	0,456	0,666	2,18
MTH311-6	13	925	0,9	186	51	0,124	0,241	4,2
MTH312-6	17,5	945	1,25	233	54	0,125	0,254	2,66
MTH311-8	9	675	1,1	264	26	0,498	0,643	2,07
MTH312-8	13	690	1,25	178	53	0,13	0,1825	4,54
MTH411-6	27	950	2	247	77	0,08	0,233	2,37
MTH412-6	36	955	2,7	274	88	0,059	0,173	1,96
MTH411-8	18	695	2,15	221	59	0,125	0,245	2,96
MTH412-8	26	710	3	266	68	0,102	0,231	2,03
MTH511-8	34	695	4,3	297	81	0,124	0,448	1,645
MTH512-8	45	695	5,7	319	94	0,091	0,356	1,415
MTH611-10	53	560	17	197	185	0,0274	0,176	3,72
MTH612-10	70	560	21	262	181	0,033	0,133	2,1
MTH613-10	90	570	25	339	179	0,0384	0,0988	1,26
MTH711-10	125	580	41	288	294	0,017	0,077	1,74
MTH712-10	155	580	51	345	295	0,0189	0,091	1,21
MTH713-10	200	582	60	431	305	0,021	0,109	0,78

Приложение 4

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТМ

($U_{1л} = 380 \text{ В}$; $U_{1ф} = 220 \text{ В}$; 50 Гц; ПВ, % = 40)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/ мин	$M_{\max}/$ M_n	Статор					
				$\cos\phi$		$I_{1н}$, А	I_0 , А	R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом
				ном.	х.х.				
МТМ111-6	2,2	885	2,3	0,76	0,13	6,6	4,6	4,33	2,61
МТМ112-6	3,5	895	2,3	0,75	0,13	9,5	7,25	2,8	1,67
МТМ211-6	5	920	2,5	0,75	0,1	13,6	9,7	1,41	1,29
МТМ311-6	7,5	945	2,5	0,73	0,095	20	14,2	0,9	0,663
МТМ311-8	5	685	2,5	0,73	0,12	14,7	10,2	1,76	1,24
МТМ312-8	11	950	2,8	0,76	0,09	27,3	17,8	0,595	0,485
МТМ312-8	7,5	695	2,5	0,74	0,105	20,6	13,9	1,04	0,833
МТМ411-6	16	957	2,8	0,78	0,075	38	21,4	0,323	0,398
МТМ411-8	11	710	2,8	0,7	0,085	30	21	0,465	0,543
МТМ412-6	22	960	2,8	0,8	0,07	48,5	24,2	0,218	0,312
МТМ412-8	16	715	2,8	0,7	0,08	42,5	30	0,316	0,371
МТМ511-8	22	715	2,8	0,736	0,07	55	37	0,205	0,284
МТМ512-8	30	716	2,8	0,73	0,07	72	46	0,141	0,214
МТМ611-10	38	577	3,0	0,75	0,07	90	57	0,119	0,222
МТМ612-10	50	577	2,8	0,77	0,06	114	66	0,088	0,176
МТМ613-10	63	580	2,9	0,74	0,06	140	80	0,061	0,14
МТМ711-10	80	585	2,7	0,73	0,05	188	115	0,033	0,122
МТМ712-10	100	587	2,8	0,7	0,05	240	150	0,022	0,094
МТМ713-10	125	587	2,9	0,75	0,04	275	156	0,018	0,081
МТМ111-6	2,2	885	0,0487	144	11,1	0,72	0,595	2,5	
МТМ112-6	3,5	895	0,0675	177	13,5	0,725	0,595	2,02	
МТМ211-6	5	920	0,115	215	16,2	0,58	0,66	1,76	
МТМ311-6	7,5	945	0,225	240	19,7	0,35	0,511	1,51	
МТМ311-8	5	685	0,275	215	17	0,517	0,664	1,67	
МТМ312-8	11	950	0,312	166	43	0,097	0,181	2,2	
МТМ312-8	7,5	695	0,387	254	20	0,0462	0,641	1,41	
МТМ411-6	16	957	0,5	200	53	0,092	0,235	1,8	
МТМ411-8	11	710	0,537	172	41,5	0,116	0,214	2,1	
МТМ412-6	22	960	0,675	225	63	0,072	0,225	1,63	
МТМ412-8	16	715	0,75	200	52	0,098	0,195	1,82	
МТМ511-8	22	715	1,025	237	58	0,106	0,231	1,53	
МТМ512-8	30	716	1,4	288	65	0,102	0,252	1,26	
МТМ611-10	38	577	4,25	172	138	0,0255	0,0463	2,085	
МТМ612-10	50	577	5,25	223	140	0,0313	0,0625	1,5	
МТМ613-10	63	580	6,25	282	139	0,0366	0,078	1,28	
МТМ711-10	80	585	10,25	246	200	0,0159	0,067	1,45	
МТМ712-10	100	587	12,75	316	196	0,018	0,082	1,13	
МТМ713-10	125	587	15	372	196	0,02	0,098	0,302	

Приложение 5

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТФ

($U_{1л} = 380$ В; $U_{1ф} = 220$ В; 50 Гц; ПВ % = 25)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/ мин	$M_{max}/$ M_n	Статор					
				$\cos\phi$		$I_{1н}$, А	I_0 , А	R_1 , Ом	$X_{1с}$, Ом
				ном.	х.х.				
МТФ011-6	1,7	850	2	0,72	0,166	5,9	4,9	5,78	3,6
МТФ012-6	2,7	840	1,9	0,74	0,14	8,9	6,12	3,63	2,51
МТФ111-6	4,1	870	1,9	0,79	0,108	11,7	7,45	2,1	1,93
МТФ112-6	5,8	915	2,4	0,74	0,105	16	11,35	1,26	1,26
МТФ211-6	9	915	2,1	0,74	0,085	24	14,35	0,755	1,05
МТФ311-6	13	935	2,5	0,74	0,093	34,5	23,2	0,48	0,645
МТФ312-6	17,5	950	2,4	0,77	0,085	42,5	28,7	0,23	0,334
МТФ311-8	9	680	2,0	0,74	0,108	25,6	17,7	0,835	0,843
МТФ312-8	13	695	2,5	0,76	0,081	34	24,2	0,365	0,53
МТФ411-6	27	955	3	0,77	0,077	64	40	0,197	0,287
МТФ412-6	36	965	3	0,75	0,069	86	51,8	0,124	0,197
МТФ411-8	18	700	2,5	0,73	0,083	46,7	29,8	0,327	0,53
МТФ412-8	26	715	2,5	0,68	0,08	71	49,6	0,182	0,313
МТФ011-6	1,7	850	0,085	126	12	0,77	0,566	9,06	
МТФ012-6	2,7	840	0,115	154	15	0,745	0,59	6,06	
МТФ111-6	4,1	870	0,195	175	18,7	0,6	0,57	4,65	
МТФ112-6	5,8	915	0,27	217	19	0,5	0,648	3,1	
МТФ211-6	9	915	0,46	273	25	0,485	0,855	1,92	
МТФ311-6	13	935	0,9	184	51	0,111	0,241	4,2	
МТФ312-6	17,5	950	1,25	233	54	0,107	0,244	2,66	
МТФ311-8	9	680	1,1	264	26	0,46	0,643	2,07	
МТФ312-8	13	695	1,55	178	53	0,122	0,182	4,54	
МТФ411-6	27	955	2	246	77	0,076	0,236	2,37	
МТФ412-6	36	965	2,7	271	88	0,055	0,173	1,96	
МТФ411-8	18	700	2,15	221	59	0,117	0,26	2,94	
МТФ412-8	26	715	3	226	68	0,095	0,231	2,03	

Приложение 6

Технические данные двигателей серии 4А с фазным
ротором 4АК, 4АНК ($U_{1л} = 380$ В; $U_{1ф} = 220$ В; 50 Гц; ПВ % = 100)

Тип	P_n , кВт	s_n , о. е.	КПД, о. е.	$\cos\phi_n$, о. е.	$M_{max}/$ M_n о. е.	I_{2n} , А	E_{2n} , В	$J_{дв}$, кг·м ²
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АК160S4У3	11	0,05	0,865	0,86	3	22	305	0,125
4АК160М4У3	14	0,04	0,885	0,87	3,5	29	300	0,163
4АК180М4У3	18	0,035	0,89	0,88	4	38	295	0,288
4АК200М4У3	22	0,025	0,90	0,87	4	45	340	0,463
4АК200L4У3	30	0,025	0,905	0,87	4	55	350	0,563
4АК225М4У3	37	0,035	0,90	0,87	3	160	160	0,8
4АК250SA4У3	45	0,03	0,91	0,88	3	170	230	1,25
4АК250SB4У3	55	0,03	0,905	0,9	3	170	200	1,37
4АК250М4У3	71	0,025	0,915	0,86	3	170	250	1,5
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АК160S6У3	7,5	0,05	0,825	0,77	3,5	18	300	0,175
4АК160М6У3	10	0,045	0,845	0,76	3,8	20	310	0,225
4АК180М6У3	13	0,045	0,855	0,8	4	25	325	0,275
4АК200М6У3	18,5	0,035	0,88	0,81	3,5	35	360	0,5
4АК200L6У3	22	0,035	0,88	0,8	3,5	45	330	0,563
4АК225М6У3	30	0,035	0,89	0,85	2,5	150	140	0,925
4АК250S6У3	37	0,035	0,89	0,84	2,5	165	150	1,5
4АК250М6У3	45	0,03	0,905	0,87	2,5	160	180	1,625
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4АК160S8У3	5,5	0,065	0,8	0,7	2,5	14	300	0,175
4АК160М8У3	7,5	0,06	0,82	0,7	3	16	290	0,225
4АК180М8У3	11,5	0,04	0,855	0,72	3,5	25	270	0,313
4АК200М8У3	15	0,035	0,86	0,7	3	28	360	0,5
4АК200L8У3	18,5	0,035	0,86	0,73	3	40	300	0,565
4АК225М8У3	22	0,045	0,87	0,82	2,2	140	102	0,925
4АК250S6У3	30	0,04	0,885	0,81	2,2	155	125	1,5
4АК250М6У3	37	0,035	0,89	0,8	2,2	155	148	1,75
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АНК160S4У3	14	0,05	0,865	0,85	3	27	330	0,13
4АНК160М4У3	17	0,05	0,88	0,87	3,5	34	315	0,17
4АНК180S4У3	22	0,055	0,87	0,86	3,2	43	300	0,247
4АНК180М4У3	30	0,045	0,88	0,81	3,2	63	290	0,3
4АНК200М4У3	37	0,03	0,90	0,88	3	62	360	0,48
4АНК200L4У3	45	0,035	0,90	0,88	3	75	375	0,585
4АНК225М4У3	55	0,04	0,895	0,87	2,5	200	170	0,832
4АНК250SA4У3	75	0,045	0,90	0,88	2,3	250	180	1,3
4АНК250SB4У3	90	0,04	0,915	0,87	2,5	260	220	1,43

Окончание таблицы П6

Тип	P_n , кВт	s_n , о. е.	КПД, о. е.	$\cos\phi_n$, о. е.	M_{\max}/M_n о. е.	I_{2n} , А	E_{2n} , В	$J_{дв}$, кг·м ²
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АНК250М4У3	110	0,035	0,92	0,9	2,5	260	250	1,56
4АНК280S4У3	132	0,029	0,92	0,88	2	330	251	2,99
4АНК280М4У3	160	0,026	0,925	0,88	2	330	300	3,25
4АНК315S4У3	200	0,025	0,93	0,89	2	396	312	4,0
4АНК315М4У3	250	0,025	0,93	0,9	2	425	360	4,68
4АНК355S4У3	315	0,022	0,935	0,9	2	460	420	7,8
4АНК355М4У3	400	0,02	0,94	0,9	2	485	505	9,1
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АНК180S6У3	13	0,07	0,835	0,81	3	42	205	0,234
4АНК180М6У3	17	0,06	0,85	0,82	3	32,5	335	0,286
4АНК200М6У3	22	0,035	0,88	0,81	3	37	380	0,52
4АНК200L6У3	30	0,04	0,885	0,82	3	46	375	0,585
4АНК225М6У3	37	0,04	0,89	0,86	1,9	180	140	0,962
4АНК250SA6У3	45	0,04	0,895	0,86	2,3	200	155	1,56
4АНК250SB6У3	55	0,035	0,91	0,88	2,5	185	190	0,69
4АНК250М6У3	75	0,03	0,915	0,85	2,5	200	250	1,82
4АНК280S6У3	90	0,036	0,90	0,88	1,9	277	202	3,77
4АНК280М6У3	110	0,036	0,915	0,87	1,9	297	230	4,42
4АНК315S6У3	132	0,03	0,92	0,88	1,9	320	257	5,20
4АНК315М6У3	160	0,03	0,925	0,88	1,9	352	291	5,85
4АНК355S6У3	200	0,025	0,93	0,89	1,8	411	304	9,45
4АНК355М6У3	250	0,025	0,93	0,89	1,8	401	380	11,4
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4АНК180S8У3	11	0,05	0,85	0,72	3,2	22,5	315	0,234
4АНК180М8У3	14	0,045	0,865	0,69	3,5	28	310	0,325
4АНК200М8У3	18,5	0,045	0,86	0,78	2,5	30	380	0,52
4АНК200L8У3	22	0,045	0,87	0,79	2,5	40	330	0,585
4АНК225М8У3	30	0,05	0,865	0,8	1,8	165	120	0,96
4АНК250SA8У3	37	0,055	0,875	0,8	2,2	190	115	1,56
4АНК250SB8У3	45	0,04	0,89	0,82	2,2	190	140	1,63
4АНК250М8У3	55	0,035	0,895	0,83	2,2	185	190	1,82
4АНК280S8У3	75	0,04	0,905	0,84	1,9	257	190	4,16
4АНК280М8У3	90	0,04	0,905	0,84	1,9	267	214	5,33
4АНК315S8У3	110	0,035	0,915	0,84	1,9	311	225	6,37
4АНК315М8У3	132	0,035	0,92	0,84	1,9	364	247	7,54
4АНК355S8У3	160	0,027	0,925	0,86	1,7	353	285	11,7
4АНК355М8У3	290	0,027	0,925	0,86	1,7	359	350	13,0
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
4АНК280S10У3	45	0,05	0,89	0,78	1,8	178	162	4,68
4АНК280М10У3	55	0,045	0,895	0,79	1,8	180	185	4,94
4АНК315S10У3	75	0,045	0,90	0,8	1,8	221	217	6,76

Образец титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства
Кафедра энергетики

Зачтено с отметкой _____

Дата защиты _____

Преподаватель _____

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

«Расчет электропривода с асинхронным двигателем»

по дисциплине «Электропривод»
направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Работу выполнил:
студент гр. ХХ-ЭЭ
Иванов И.И.

Калининград
202Х

Локальный электронный методический материал

Максим Сергеевич Харитонов

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Редактор Э. С. Круглова

Уч.-изд. л. 7,3. Печ. л. 6,5

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1