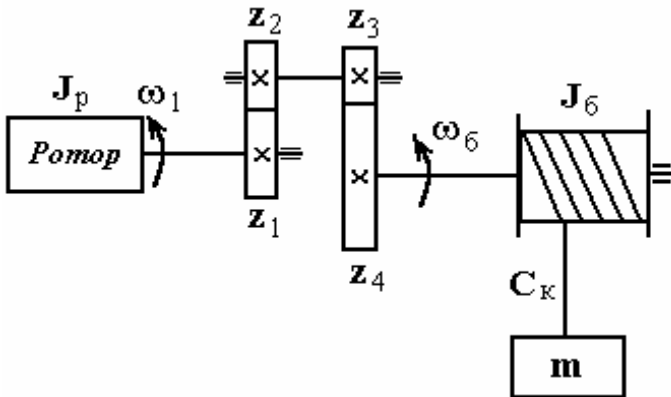


А.В. Романов Д.А. Тонн

# ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие



Воронеж 2007

ГОУВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

А.В. Романов Д.А. Тонн

**ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2007

УДК 62-83(075.8)

Романов А.В. Инженерные методы расчета автоматизированного электропривода на основе информационных технологий: учеб. пособие / А.В. Романов, Д.А. Тонн. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. 108 с.

В учебном пособии рассматриваются практические вопросы расчета и анализа электромеханических и механических характеристик электрических машин, двухмассовой механической части электропривода, выбора электродвигателей из специализированных баз данных. Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» по дисциплине «Теория электропривода». Издание предназначено для студентов второго и третьего курсов очной формы обучения.

Издание будет полезно для студентов технических специальностей, аспирантов и специалистов, занимающихся вопросами разработки электроприводов.

Табл. 12. Ил. 40. Библиогр.: 7 назв.

Рецензенты: кафедра инженерно-технического обеспечения деятельности угловно-исполнительной системы Воронежского института МВД (начальник кафедры д-р техн. наук, проф. полковник милиции С.В. Бухарин); д-р техн. наук, проф. К.Е. Кононенко.

© Романов А.В., Тонн Д.А., 2007

© Оформление. ГОУВПО

«Воронежский государственный технический университет», 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Электрический привод не заменим для повышения производительности труда в разных отраслях промышленности, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. Согласно государственному стандарту ГОСТ Р 50369 – 92 «Электрическим приводом называется электро-механическая система, предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин, целенаправленного управления этими процессами и состоящая из передаточного, электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств». Таким образом, электрический привод представляет собой единую электромеханическую систему, электрическая часть которой состоит из электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств, а механическая включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма. Электрический привод является крупнейшим потребителем электрической энергии, необходимой для работы машин и механизмов.

Предметом изучения дисциплин «Электрический привод» и «Электропривод» являются физические особенности механики электропривода (ЭП), электромеханические свойства и характеристики электродвигателей (ЭД) в статических и динамических режимах, влияние упругих механических связей, способы регулирования координат ЭП, расчет мощности электропривода.

Электропривод занимает важное место в общепрофессиональной подготовке инженера-электромеханика, представляя необходимые знания для усвоения последующих специальных дисциплин, в частности «Теории электропривода», «Системы управления электроприводами», «Автоматизированное проектирование электроприводов».

Лучшему усвоению знаний по дисциплинам «Электрический привод», «Электропривод», «Теории электропривода»

способствует выполнению практических расчетов автоматизированных электроприводов, решение задач, которые позволяют на практике закрепить полученные теоретические знания.

Для реализации практических расчетов в системах автоматизированного электропривода студенты должны знать процессы электромеханического преобразования энергии в электродвигателях, методы расчета механической части и мощности в электроприводах, способы регулирования координат электропривода постоянного и переменного тока.

Специалист по электрическому приводу обязан уметь математически описать процессы электромеханического преобразования энергии в электродвигателях, рассчитывать естественные и искусственные механические и электромеханические характеристики электродвигателей, составлять расчетные и структурные схемы механической части электропривода (МЧ ЭП), выполнять анализ динамических свойств систем ЭП с жесткими механическими связями и при наличии диссипативных сил, рассчитать мощность и выбрать ЭД при различных режимах работы.

Настоящее учебное пособие предназначено для выработки практических навыков у студентов второго и третьего курсов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» очной формы обучения, в том числе на базе среднего профессионального образования. Навыки практических расчетов у студентов очной формы обучения вырабатываются при выполнении домашних заданий, а у студентов очной формы обучения на базе среднего профессионального образования при выполнении контрольных работ.

При выполнении технических расчетов в электроприводе необходимо оперировать большими массивами информации. Информацию такого рода на современном этапе развития средств вычислительной техники целесообразно получать не из справочной литературы, которая зачастую устарела, а из

специализированного программного обеспечения (баз данных). Изучение первой главы данного пособия позволяет студентам научиться применять информационные компьютерные технологии при проведении практических расчетов в автоматизированных системах электропривода.

Предусмотрена следующая тематика контрольных работ:

1. Определение параметров механической части электропривода.
2. Изучение базы данных электродвигателей.
3. Построение искусственных и естественных механических и электромеханических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
4. Построение искусственных и естественных механических и электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

**Первая** контрольная работа может быть проведена в рамках аудиторных занятий. Ее основная цель – закрепление теоретического материала и получение практических навыков расчета параметров и характеристик механической части электропривода. Пример выполнения расчета механической части электропривода приведен в разделе 2 данного учебного пособия.

При выполнении **второй** контрольной работы студенты изучают базу данных электродвигателей, получают практические навыки поиска ЭД по заданным критериям, просмотра полного списка параметров двигателя, вывода найденных данных на печать. Работа проводится в специальном учебном классе, оборудованном персональными компьютерами. Материал, который необходимо изучить и освоить для выполнения этой контрольной работы, изложен в разделе 1.

**Третья и четвертая** контрольные работы служат для закрепления теоретического материала и получения практических навыков проектирования электроприводов. По заданию преподавателя каждым студентом из базы данных выбираются

соответствующие электродвигатели, по данным которых и строятся указанные характеристики. Контрольные работы предназначены для домашней работы студентов. Примеры выполнения этих контрольных работ приводятся в разделах 3 и 4 соответственно.

Методические рекомендации по выполнению контрольных работ и варианты заданий приведены в учебной литературе [1], но могут быть сформулированы преподавателем дополнительно.

При выполнении домашних заданий для предложенной кинематической схемы механизма студентам необходимо привести моменты инерции, массы, усилия и статические моменты к валу электродвигателя. Задачи для выполнения домашних заданий сформулированы в разделе 5.

Результирующий момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, включает момент инерции вращающихся и поступательно движущихся частей. Момент инерции шкива, муфт, редуктора ориентировочно принимают как 0,3-0,5 от момента инерции ротора.

При приведении статических моментов рабочей машины к валу двигателя необходимо отдельно рассчитать статические моменты при работе механизма с заданной нагрузкой с учетом направления потока мощности. Расчет механических характеристик выполняется как в абсолютных, так и относительных единицах. Необходимо учитывать особенности расчета механических характеристик асинхронных двигателей при регулировании частоты источника питания, обусловленные изменением параметров двигателя и связанной с этим вариацией величин критического скольжения и критического момента двигателя.

Варианты заданий для выполнения домашних работ приведены в таблицах 5.1 и 5.2, но могут быть сформулированы преподавателем дополнительно.

# 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМ

## 1.1. Общие сведения

При выполнении технических расчетов в электроприводе необходимо располагать большим количеством информации, которую можно получить или из справочной литературы (например [2, 3]), или из специализированного программного обеспечения – *баз данных* (БД).

Базы данных способны эффективно хранить, структурировать, систематизировать большие объемы информации и извлекать ее оптимальным для пользователя образом. Использование подобных технологий позволяет сберечь значительные средства и время при получении необходимой информации. Работа любой БД основана на взаимодействии со специальной *системой управления базами данных* (СУБД), которая берет на себя функции записи, чтения, модификации данных, обработку запросов пользователя, обеспечения целостности и непротиворечивости данных и многие другие. В настоящее время в основном используются *реляционные* БД, т.е. состоящие из отдельных таблиц, каждая из которых может храниться в отдельном файле.

Любая СУБД, которую использует база данных, является по сути своей работой некоторой надстройкой над операционной системой (ОС), поэтому для корректного функционирования конкретной БД необходимы две компоненты:

- 1) ОС должна знать пути к файлам СУБД;
- 2) операционная система должна знать пути к файлам таблиц базы данных.

В Воронежском государственном техническом университете на кафедре "Автоматика и информатика в технических системах" для выбора технических параметров электродвигателя (ЭД) можно использовать две базы данных – «*Карат*» и



ВТИ, исходные дистрибутивы которых можно загрузить с сайта, посвященного автоматизированному проектированию электроприводов [4] или с сайта andr-romanov.narod.ru, раздел "САПР ЭП".

## 1.2. База данных «Карат»

База данных «Карат» спроектирована в 1994 году для работы в операционной системе MS DOS. Она включает в себя широкий выбор электрооборудования: двигатели постоянного и переменного тока, коммутирующую аппаратуру, трансформаторы, реакторы, дроссели, силовые тиристоры и др.

Для доступа к элементам БД используется *иерархический принцип* организации меню. *Группы* элементов (например: двигатели, трансформаторы, силовые тиристоры) являются самым верхним уровнем. На рис. 1.1 показано меню выбора основных групп элементов.

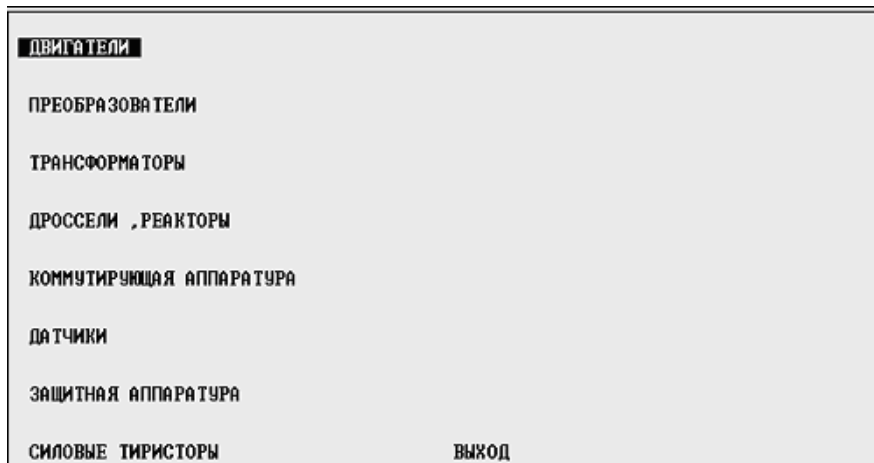


Рис. 1.1. Интерфейс основного окна БД «Карат»

*Подгруппы* (например: двигатели переменного или постоянного тока) обозначают более детально принадлежность элемента. При выборе одной из категорий, например «Двига-

тели», мы спускаемся вниз по иерархии и получаем уточняющее подменю – «Двигатели постоянного тока», «Двигатели переменного тока» и «Возврат назад», как показано на рис. 1.2.

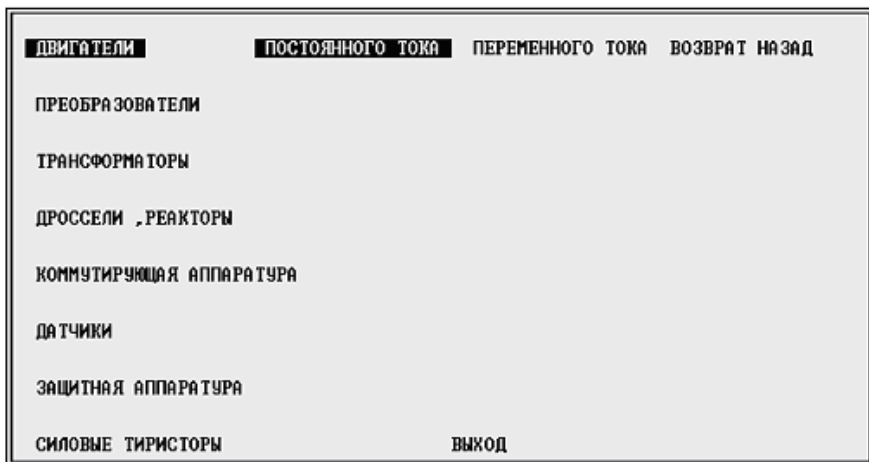


Рис. 1.2. Выбор двигателей постоянного и переменного тока

Более конкретный выбор осуществляется далее на следующем уровне иерархии. Например, после того как были выбраны двигатели постоянного тока появляются все серии, имеющиеся в данной категории (2ПН, 2ПБ, 2ПФ, 2ПО, крановые, экскаваторные, серии 4П, высоко моментные электродвигатели приводов подач), с краткими характеристиками в виде таблицы. На рис. 1.3 представлен внешний вид окна БД «Карат» по выбору двигателей постоянного тока (ДПТ). Выбор элемента в других категориях может происходить по другим параметрам (например, по мощности и по числу полюсов).

При выборе конкретной серии появляется следующее окно (рис. 1.4), где изображены для примера значения параметров ЭД серии 2ПН (2ПНГ) в виде таблицы с кратким описанием характеристик двигателя (номинальная мощность  $P_n$ , номинальный момент  $M_n$ , высота оси вращения, номинальное напряжение  $U_n$ , диаметр вала, длина станины и масса).

ПОЛЬЗУЯСЬ КУРСОРОМ ВЫБЕРИТЕ НУЖНУЮ СЕРИЮ									
ТИП	R <sub>n</sub> , кВт	M <sub>n</sub> , Нм	M <sub>n</sub> , об/м	h, мм	U, В	длина, мм	d1, мм	m, кг	
2ПН	0.17-75	2.1-225	750-3150	90-200	110-440	369-1000	16-48	24-331	
2ПБ	0.13-15	1.6-81	750-3350	90-200	110-440	369-1000	16-48	24-331	
2ПФ	2 -55	24 -191	750-3350	132-200	110-440	917-1217	38-48	98-353	
2ПО	1.3 -24	16 -108	750-3150	132-200	110-440	881-1214	38-48	100-367	
КРАНОВЫЕ <Д12-Д818>									
ЭКСКАВАТОРНЫЕ									
СЕРИЯ 4П									
ВЫСОКО МОМЕНТНЫЕ ЭЛ.ДВИГАТЕЛИ ПРИВODOB ПOДАЧ									
ВЫХОД * - d1-диаметр вала , m-масса									
Для выбора типа двигателя нажмите <ВВОД>									

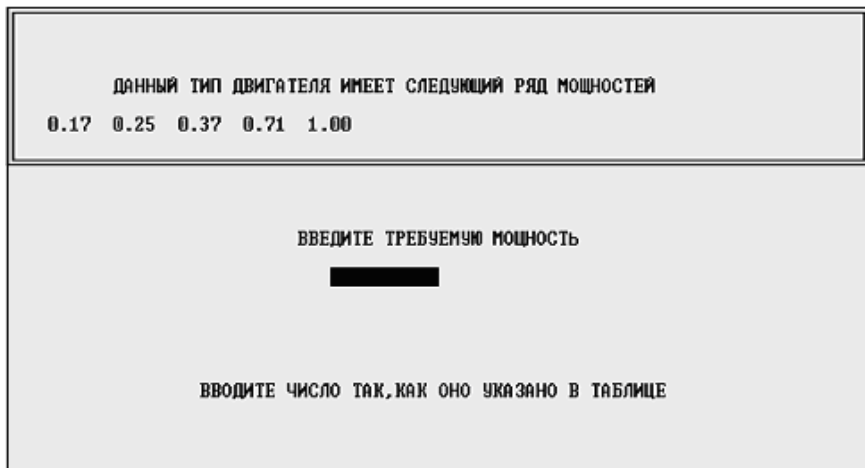
Рис. 1.3. Выбор двигателей постоянного тока

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 2ПН <2ПНГ>									
ТИП	R <sub>n</sub> , кВт	M <sub>n</sub> , Нм	h, мм	M <sub>n</sub> , об/мин	U <sub>n</sub> , В	d1, мм	L, мм	m, кг	
90M<Г>	0.17-1	2.1-3	90	750-3150	110-340	16	369<493>	24<29>	
90L<Г>	0.22-1.3	2.8-4.3	90	-/-/-/-	-/-/-/-	-	394<518>	27<32>	
100M<Г>	0.37-2.0	4.5-6.5	100	750-3000	-/-/-/-	22	414<53>	36<41>	
100L<Г>	0.42-2.2	5.4-7.3	-	750-3150	-/-/-/-	-	434<558>	39<44>	
112M<Г>	0.6-3.6	7.2-11.6	112	750-3000	110-440	24	486<637>	47<52>	
112L<Г>	0.8-5.3	10.2-16.7	112	750-3350	-/-/-/-	24	531<682>	56<61>	
132M<Г>	1.6-10.5	20.4-33	132	750-3000	-/-/-/-	38	617<770>	86<91>	
132L<Г>	1.9-14	24-44	132	750-3150	-/-/-/-	38	662<815>	96<101>	
160M<Г>	3-18	38-60	160	750-3150	-/-/-/-	38	644<796>	141<147>	
160L<Г>	4-24	49-76	160	750-3150	-/-/-/-	38	694<846>	159<165>	
180M<Г>	5.6-37	72-118	180	750-3150	-/-/-/-	42	779<938>	213<219>	
180L<Г>	7.1-42	89-134	180	750-3000	-/-/-/-	42	819<978>	234<240>	
200M<Г>	8.5-60	102-183	200	750-3150	-/-/-/-	48	782<941>	282<288>	
200L<Г>	11-75	131-225	200	750-3150	-/-/-/-	48	842<1001>	325<331>	
ВОЗВРАТ К ПРЕДШЕСТВОВАВШЕЙ ТАБЛИЦЕ									

Рис. 1.4. Окно выбора технических параметров двигателя постоянного тока серии 2ПН

На рис. 1.5 представлено следующее окно для выбора ДПТ серии 2ПН по мощности из существующего ряда мощностей. Здесь необходимо ввести в поле ввода требуемую мощность из ряда указанных. Отметим, что корректная работа про-

граммы возможна только при вводе числа точно в указанном формате.



ДАННЫЙ ТИП ДВИГАТЕЛЯ ИМЕЕТ СЛЕДУЮЩИЙ РЯД МОЩНОСТЕЙ

0.17 0.25 0.37 0.71 1.00

ВВЕДИТЕ ТРЕБУЕМУЮ МОЩНОСТЬ

■■■■■

ВВОДИТЕ ЧИСЛО ТАК, КАК ОНО УКАЗАНО В ТАБЛИЦЕ

Рис. 1.5. Окно выбора двигателя по мощности

После выбора мощности пользователю предлагаются дополнительные параметры для фильтрации информации –  $M_n$ ,  $U_n$ , номинальная частота вращения  $n_n$  и номинальный ток  $I_n$  (рис. 1.6).

И только после указания номера двигателя в списке на экран выводится список параметров выбранного ЭД (рис. 1.7). Их можно попробовать вывести на печать, но в других ОС (кроме MS DOC) вывод на принтер может работать некорректно. Практически пользуются сохранением графической копии экрана (реализуется служебной клавишей Print Screen).

### 1.3. База технической информации ВТИ

База данных технической информации ВТИ разработана в 2006 на кафедре АИТС Воронежского государственного технического университета как замена морально устаревшему программному обеспечению БД «Карат». Ее разработка велась

С МОЩНОСТЬЮ **0.17** кВт ИМЕЕТСЯ **3** ДВИГАТЕЛЯ

ДЛЯ ВОЗВРАТА К ПРЕДЫДУЩИМ ТАБЛИЦАМ НАЖАТЬ КЛАВИШУ <КЛМК>  
 ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ - ЛЮБУЮ КЛАВИШУ

ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

НОМИН. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ, Н*М	<b>2.15</b>	<b>2.15</b>	<b>2.15</b>
НОМИН. ЧАСТОТА ВРАЩЕН., ОБ/МИН	<b>750</b>	<b>750</b>	<b>750</b>
НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, В	<b>110</b>	<b>220</b>	<b>340</b>
НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК, А	<b>2.69</b>	<b>1.32</b>	<b>0.86</b>
НОМЕР ДВИГАТЕЛЯ В СПИСКЕ	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Рис. 1.6. Окно выбора двигателя по мощности, частоте вращения, напряжению и току

ТИП ДВИГАТЕЛЯ	2ПН-90L94	
МОМЕНТ НОМ., Н*М	3.9	СОПР. ОБМ. ВОЗБ. <15 С>, Ом 340/87
НОМ. ЧАСТОТ. ВРАЩ., ОБ/МИН	3150	СОБСТВ. ЧАСТОТА 1/сек 42.2
НОМ. МОШН., кВт	1.30	КОЭФ. МОМЕНТА Км, Н*м/А 0.27
НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК, А	14.50	КОЭФ. Э. Д. С. Ке, В*мин/об 0.028
НОМИН. НАПРЯЖЕНИЕ, В	110	
НОМ. МАГНИТ. ПОТОК, мВб	3.4	
НОМ. К. П. Д. %	76.0	
МОМЕНТ ИНЕРЦИИ, кг*м <sup>2</sup>	0.005	
ЧАСОВАЯ МОЩНОСТЬ, кВт	1.31	
МАКС. ВРАЩАЮЩ. МОМЕНТ, Н*М	19.50	
МАКС. СКОРОСТЬ (U=var)	4000	
МАКС. СКОРОСТЬ (Ф=var)	4000	
МАКС. УСКОРЕН., рад/сек <sup>2</sup>	3900	
ТЕПЛОВ. ПОСТ. ВРЕМЕН., мин	12.06	
ЭЛ. МЕХ. ПОСТ. ВРЕМЕН., мс	42	
ЭЛ. МАГ. ПОСТ. ВРЕМЕН., мс	13.40	
ЧИСЛО ВИТКОВ ОБМ. ЯКОРЯ	270	
СОПР. ОБМ. ЯКОР. <15 С>, Ом	0.355	
СОПР. ДОБ. ПОЛЮС. <15С>, Ом	0.257	
ИНДУКТ. ЯК. ЦЕПИ (Фн), мГн	8.2	
ЧИСЛ. ВИТК. ОБМ. ВОЗБ(на полюс)	2530/1300	

БУДЕТЕ ВЫВОДИТЬ ДАННЫЕ НА ПЕЧАТЬ

ДА  НЕТ

Рис. 1.7. Технические характеристики ДПТ

на основе опыта эксплуатации БД «Карат», поэтому основное назначение и содержащаяся в ВТИ информация практически аналогичны.

ВТИ предназначена для работы в операционной системе Windows. Приложение имеет несколько рабочих окон. На рис. 1.8 показан внешний вид главного окна.

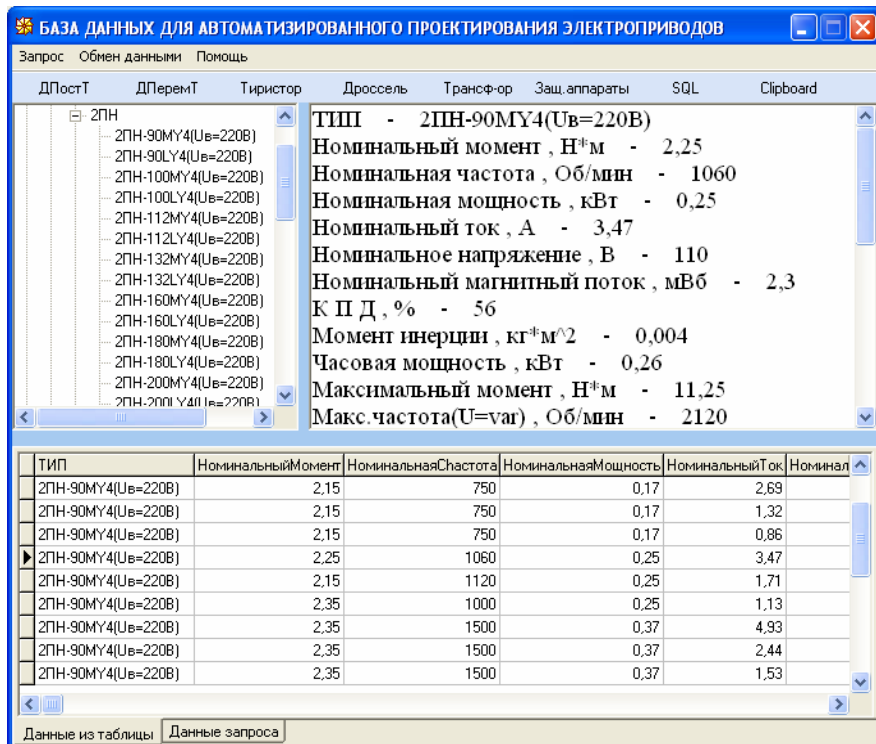


Рис. 1.8. Внешний вид главного окна ВТИ

Отметим, что приведенное далее описание сделано для текущей версии программы. В дальнейшем программное обеспечение будет модернизироваться, интерфейс может быть изменен и функции расширены. Эти изменения найдут отражение в файле помощи и демонстрационной версии, которыми укомплектована программа.

Как видно из рис. 1.8, интерфейс программы представлен следующими элементами:

- главное меню;
- панель быстрых кнопок;
- иерархическое дерево объектов;
- поле для отображения табличных данных выбранной серии;
- текстовое поле для отображения данных выбранного элемента из серии.

*Главное меню* приложения предназначено для доступа к различным функциям программы. Рассмотрим структуру и функции главного меню.

1. Подменю «Запрос» состоит из следующих пунктов:

- «Выбор ДПостТ» – открывает окно, в котором производится выбор двигателей постоянного тока;
- «Выбор ДПеремТ» – открывает окно, в котором производится выбор двигателей переменного тока;
- «Выбор тиристоров» – открывает окно для выбора тиристоров;
- «Выбор дросселей» – аналогично для дросселей;
- «Выбор трансформаторов» – аналогично для трансформаторов;
- «Выбор защ. аппаратуры» – открывает окно, в котором производится выбор защитной аппаратуры;
- «Свободный запрос» открывает окно, в котором пользователь может самостоятельно спроектировать запрос к БД на языке SQL.

2. Подменю «Обмен данными» состоит из единственного пункта «Вставить в Clipboard», который предназначен для межпрограммного обмена информацией при работе БД в составе системы автоматизированного проектирования ЭП.

3. Подменю «Помощь» состоит из следующих пунктов:

- «Справка» – открывает файл помощи приложения;

- «Демоверсия» – запускает демонстрационную версию для ознакомления с программой;
- «О программе» – открывает окно с информацией о дате создания программы, текущем номере версии и о разработчиках.

*Панель быстрых кнопок* предназначена для ускоренного доступа к наиболее часто используемым функциям приложения, причем каждая из кнопок выполняет функцию одного из пунктов главного меню. В табл. 1.1 представлено функциональное соответствие панели быстрых кнопок и пунктов главного меню.

Таблица 1.1

Заголовок кнопки	Заголовок пункта меню
ДПостТ	Выбор ДПостТ
ДПеремТ	Выбор ДПеремТ
Тиристор	Выбор тиристоров
Дроссель	Выбор дросселей
Трансф-ор	Выбор трансформаторов
Защ. аппараты	Выбор защ. аппаратуры
SQL	Свободный запрос
Clipboard	Вставить в Clipboard

*Иерархическое дерево объектов* предназначено для связи таблиц БД с приложением. Его структура похожа на структуру проводника Windows, а в качестве главных корневых элементов иерархии выступают основные категории данных, причем каждый из этих элементов имеет раскрывающуюся структуру. При активации конечного *некорневого* элемента дерева объектов в *поле отображения табличных данных* появляется соответствующая таблица, связанная с данным элементом.

Отметим, что в структуре дерева присутствуют элементы, не связанные с какими-либо таблицами по причине отсутствия на данный момент соответствующих данных. При акти-



вазии таких элементов появляется сообщение, изображенное на рис. 1.9, и в таблице данных изменений не происходит.

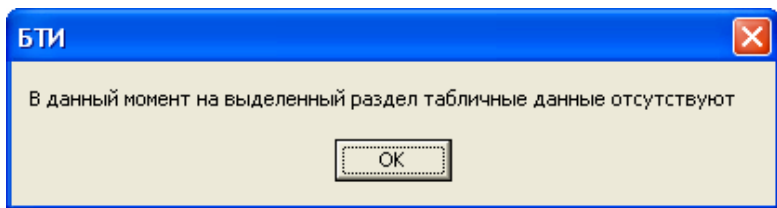


Рис. 1.9. Сообщение об отсутствии данных

При выборе в таблице любого элемента его полный набор параметров визуализируется в *текстовом поле для отображения данных*.

При проектировании технических систем часто возникает необходимость поиска информации по конкретным параметрам – по мощности, моменту, скорости вращения и т.д. Для реализации такой функции предусмотрены различные *формы формирования запросов по образцу* – для двигателей постоянного тока, переменного, трансформаторов, тиристоров и т.д. Фактически запрос происходит на языке SQL, но формирование текста запроса определяется взаимодействием пользователя с интерфейсными элементами таких форм.

Естественно, что в целях унификации интерфейс всех запросных форм подобен (рис. 1.10 и рис. 1.11), поэтому приведем описание окна формы для выбора двигателей постоянного тока, изображенное на рис. 1.10. Форма включает в себя следующие элементы:

- группу выбора серии двигателей (другие формы имеют иное название данной группы, соответствующее названию категории отбираемых данных);
- группу выбора полей фильтрации;
- панель для ввода ограничивающих значений;
- группу выбора отображаемых полей;
- кнопку «Сделать запрос».

**Двигатели постоянного тока**

Выбор серии двигателей

- Серия 2П
- Серия 4П
- Крановые двигатели
- Экскаваторные двигатели
- Высокомом. дв. приводов подал
- Все серии

Параметры фильтрации

- Номинальный момент, Н\*м
- Номинальная частота, Об/мин
- Номинальная мощность, кВт
- Номинальный ток, А
- Номинальное напряжение, В
- КПД, %

1	< Мном <	10	< Ляк <	
	< гном <		< Увозб <	
2	< Рном <	7	<витков 0В на полюс<	
	< Ином <		< Ров <	
	< Уном <		<Собств. частота<	
	< Фном <		< Кном <	
	< КПД <		< Каад <	
	< J <		<гном со стаб. обм.<	
	< Рчас <		<гном без стаб. обм.<	
	< Ммакс <		< пмакс <	
	<пмакс(U=var)<		<Ммакс со стаб. обм.<	
	<пмакс(Ф=var)<		<Ммакс без стаб. обм.<	
	<Ускор.макс<		< ПВ <	
	< Ттеп <		< Рдб <	
	< Тмех <		< А <	
	< Тэлмаг <		< Мтрог <	
	<витков обм. якоря<		< Имакс <	
	< Ря <		< Итрог <	
	< Рдп <			

Отображаемые поля

- Все поля
- Запрашиваемые поля

Сделать запрос

Рис. 1.10. Внешний вид формы выбора ДПТ

**Двигатели переменного тока**

Выбор серии асинхронных двигателей

- Серия 4А и 4АН
- Серия 4АК и 4АНК
- Все серии

Параметры фильтрации

- Номинальная мощность, кВт
- КПД, %
- Коэффициент мощности
- Номинальное скольжение, %
- Критическое скольжение, %
- Число пар полюсов
- Индукт. сопрот. магнитной цепи, о.е.
- Акт. сопрот. обмоток статора, о.е.
- Индукт. сопрот. обмоток статора, о.е.
- Акт. сопрот. ротора(привед.), о.е.
- Индукт. сопрот. ротора(привед.), о.е.
- Максимальный момент, о.е.
- Напряжение ротора, В
- Номинальный ток ротора, А
- Продолжит. включения, %

1	< Рном <	10	<число включ.<	
	< КПД <		< J <	
	<коэф. мощ.<		< Масса <	
	< Sном <		<Время пуска на XX<	
	< Sкрит <		<Скорость нараст. темп.<	
2	<число полюсов<	6	< Iпуск <	
	< Xмаг <		< Ммин <	
	< R1 <		< Ммак <	
	< X1 <		< Мпуск <	
	< R2' <		< Uрот <	
	< X2' <		< Ином.рот. <	
	< R2кз <		< ПВ <	
	< R1кз <			
	< X1кз <			

Отображаемые поля

- Все поля
- Запрашиваемые поля

Сделать запрос

Рис. 1.11. Форма выбора двигателей переменного тока

Опишем подробнее каждый из интерфейсных элементов формы.

*Группа выбора серии двигателей* определяет те таблицы, из которых будет произведен запрос.

*Группа выбора полей фильтрации* предназначена для определения тех табличных полей (параметров), по которым будет производиться запрос к базе данных.

*Панель для ввода ограничивающих значений* определяет диапазон значений полей формируемого набора данных. Пользователь, запрашивая таблицу по конкретному полю, должен определить числовой диапазон данного поля, ограничив его максимальным и минимальным значениями.

В *группе выбора отображаемых полей* определяется набор полей, попадающих в конкретный набор данных:

- «Все поля» – в таком случае в набор отображаемых полей сформированного набора данных попадают все табличные поля записей, вошедших в набор данных;
- «Запрашиваемые поля» – в данном случае в наборе данных записи состоят только из тех полей, по которым производился запрос.

Отметим, что большинство форм визуального построения запросов имеют возможность обращения ко всем таблицам, связанным с данной формой, причем эти таблицы могут иметь различный набор полей. Но в набор данных не могут входить записи, содержащие все табличные поля, из таблиц, имеющих различную структуру. Поэтому переключатель «Все поля» в случае обращения ко всем таблицам становится неактивным.

При нажатии кнопки «Сделать запрос» приложение выполняет следующие операции.

1. Учет состояния всех визуальных компонентов формы запроса по образцу.
2. Формирование SQL-текста.

3. Обращение к базе данных для формирования набора данных.

4. Выход на передний план главной формы приложения с активной вкладкой «Данные запроса», в сетке данных которой отображается набор данных, соответствующий сформированному SQL-тексту.

При выборе *свободного запроса* на дисплее появляется форма запроса на языке SQL, внешний вид которой изображен на рис. 1.12.

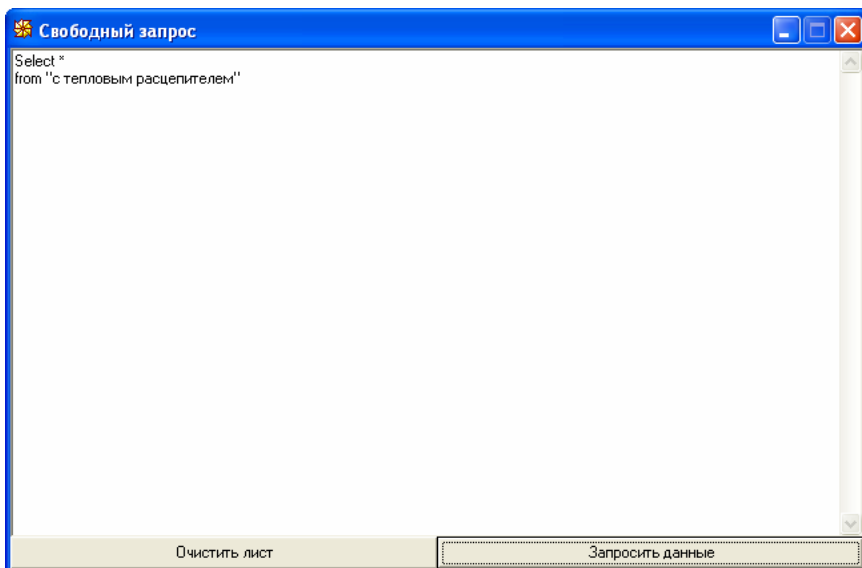


Рис. 1.12. Внешний вид формы запроса на языке SQL

Как видно из рис. 1.12, интерфейс данной формы представлен следующими элементами:

- поле для ввода текста;
- кнопка «Очистить лист»;
- кнопка «Запросить данные».

*Поле для ввода текста* предназначено для занесения туда текста на языке SQL путем набора на клавиатуре.

Кнопка «Очистить лист» предназначена для быстрой очистки поля для ввода текста, то есть при ее нажатии весь набранный текст удаляется.

Кнопка «Запросить данные» реализует функцию выполнения запроса.

Использование свободного запроса требуется нечасто, например для поиска конкретного ЭД, или всех элементов БД, рассчитанных на определенную номинальную мощность. Язык выполнения запросов Structured Query Language (SQL) сам по себе является темой для самостоятельного изучения. Подробную информацию о нем можно получить в специальной литературе [5].

В данном учебном пособии приведем краткое описание основных инструкций языка и несколько примеров.

Как уже говорилось, БД ВТИ является набором реляционных таблиц в формате Paradox. Каждый элемент данных эквивалентен строке таблицы или *записи*, которая является набором параметров или *полей* (столбцов таблицы). Найти конкретный элемент в базе данных – это отыскать запись для этого элемента. Посмотреть параметры элемента данных означает визуализировать список полей (полный или неполный) этой записи.

Язык запросов в SQL состоит из единственного оператора **SELECT**, который записывается следующим образом:

```
SELECT [ALL | DISTINCT] <Список полей>  
FROM <список таблиц>  
[WHERE <условие выборки>]
```

Обязательными здесь являются ключевые слова **SELECT** и **FROM** – что выбирать и откуда. Например, оператор

```
SELECT * FROM «2П»
```

визуализирует все поля (использован символ \*) таблицы 2П.db, в которой находятся данные электродвигателей серии 2П.

Ключевое слово **ALL** (используется по умолчанию, т.е. указывать не обязательно) означает включение в результирующий набор данных всех записей, а **DISTINCT** исключает дубликаты строк.

Для выбора отдельных полей форма записи следующая:

```
SELECT ТИП, НоминальныйМомент, НоминальнаяЧастота  
FROM «2П»
```

Такой оператор осуществит выбор трех параметров ЭД – типа,  $M_n$  и  $n_n$  для двигателей серии 2П.

Использование необязательной секции с ключевым словом **WHERE** помогает включить в набор данных только те записи, параметры которых находятся в определенном диапазоне. Например, оператор

```
SELECT * FROM «2П» WHERE НоминальнаяМощность >= 5 AND  
НоминальнаяМощность <= 100
```

выберет из серии 2П только двигатели, номинальная мощность которых лежит в диапазоне от 5 до 100 кВт и в наборе данных будут отражены все параметры (поля) электродвигателей.

Соответственно, для построения свободного запроса необходима информация о таблицах БД и их полях. В ВТИ такую информацию можно получить из таблицы tables.db (в поле Ref приведено описание таблиц БД) и таблицы описания полей fields.db (в полях ShortRef содержится краткое описание параметра, в LongRef – полное описание).

Отметим, что синтаксис языка SQL в общем виде сложнее, чем приведенное здесь описание [5], а также то, что используемые библиотеки поддерживают ограниченный синтаксис языка, поэтому не все теоретически возможные операторы будут выполняться.

Следует помнить, что язык SQL, как и другие языки программирования, имеет определенный набор команд и требует определенной последовательности их ввода, поэтому во избежание ошибок необходимо следить за правильностью набора SQL-текста.

При ошибке в тексте запроса приложение выдает сообщение, показанное на рис. 1.13.

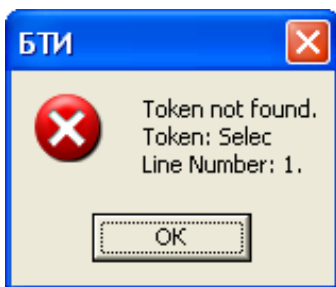


Рис. 1.13. Сообщение об ошибке в SQL-тексте

Данное сообщение содержит важную информацию, способную помочь пользователю исправить ошибку. Здесь во второй строке сообщения указывается неверное слово в тексте, а в третьей строке определен номер строки SQL-текста, в которой это слово находится.

В случае правильности SQL-текста при нажатии данной кнопки на передний план выходит главная форма приложения с активной вкладкой «Данные запроса», в сетке данных которой отображаются параметры, соответствующие набранному SQL-тексту.

#### **1.4. Особенности установки и эксплуатации программного обеспечения**

База данных «КАРАТ» устанавливается простым копированием файлов и запускается файлом `korn3.exe`. Типовая директория для установки – `D:\KARAT`. Если установка программы была произведена в эту директорию, то для работы в

среде Windows98 в файл `autoexec.bat` необходимо вставить строку

```
SET Clip_path=d:\karat\dbf_d
```

Это путь к файлам таблиц БД.

Для работы в среде WindowsXP точно такую же строку необходимо вставить в файл `autoexec.nt`, который обычно находится в директории `..\Windows\System32`.

Установка и настройка базы технической информации ВТИ несколько сложнее. БД запускается файлом `bti.exe`. Рабочий вариант предполагает эксплуатацию базы в составе САПР электроприводов, но приложение способно работать и самостоятельно. Типовая директория для установки – `E:\APEP`, таблицы находятся в директории `E:\APEP\BTI_tables`.

Программа использует в качестве СУБД специальный процессор баз данных BDE (Borland Database Engine), формат таблиц БД – Paradox.

Инсталляция BDE может быть проведена одним из программных продуктов компании Borland, например средой проектирования программных средств Delphi. В ином случае можно рекомендовать следующий алгоритм установки BDE.

1. Файлы BDE копируются на компьютер пользователя в любую директорию.

2. Среди них есть файл `BdeInst.cab`, который необходимо распаковать архиватором WinRAR, при этом получаем файл `BdeInst.dll`.

3. Далее необходимо запустить системный файл `Windows ..\Windows\System32\regsvr32.exe`, указав ему в качестве параметра файл `BdeInst.dll`. Не очень опытному пользователю лучше всего это сделать с помощью двух копий «Проводника» путем перетаскивания с помощью манипулятора «мышь» файла `BdeInst.dll` и отпускания его непосредственно на `regsvr32.exe`, как показано на рис. 1.14.



4. После этих действий пользователю будет задан вопрос о конечной директории установки – следует указать ту папку, куда были скопированы файлы BDE. Далее начнется установка BDE и ее регистрация в реестре, после чего операционная система «будет знать» о наличии Borland Database Engine.

Отметим, что указанный алгоритм необходим для операционной системы WindowsXP, в Windows98 достаточно включить путь к файлам BDE в объявление переменной окружения PATH в файле autoexec.bat, например так

```
SET PATH="C:\Program Files\BDE\";%PATH%
```

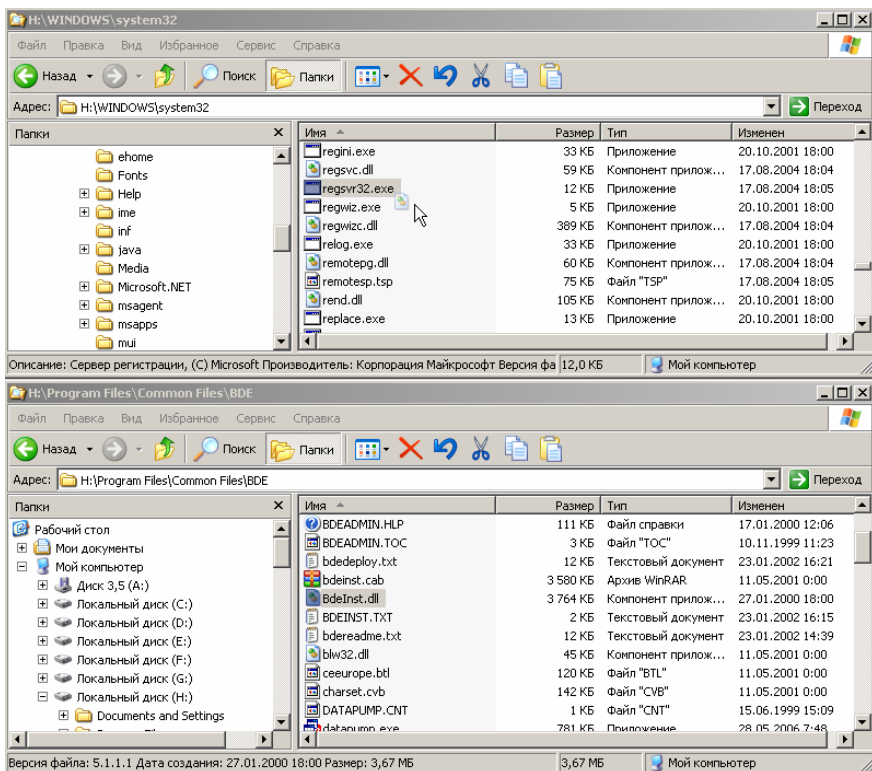


Рис. 1.14. Установка Borland Database Engine

В рассмотренном примере предполагается, что файлы BDE расположены в каталоге `C:\Program Files\BDE`.

После установки BDE необходимо определить *псевдоним* (alias) базы данных. Для этого используется утилита BDE Administrator (запускается файлом `..\BDE\bdeadmin.exe`), окно которой изображено на рис. 1.15. В левой части формы в дереве объектов приведены все известные системе псевдонимы, в том числе и `alias BTI – APEP_BTI`.

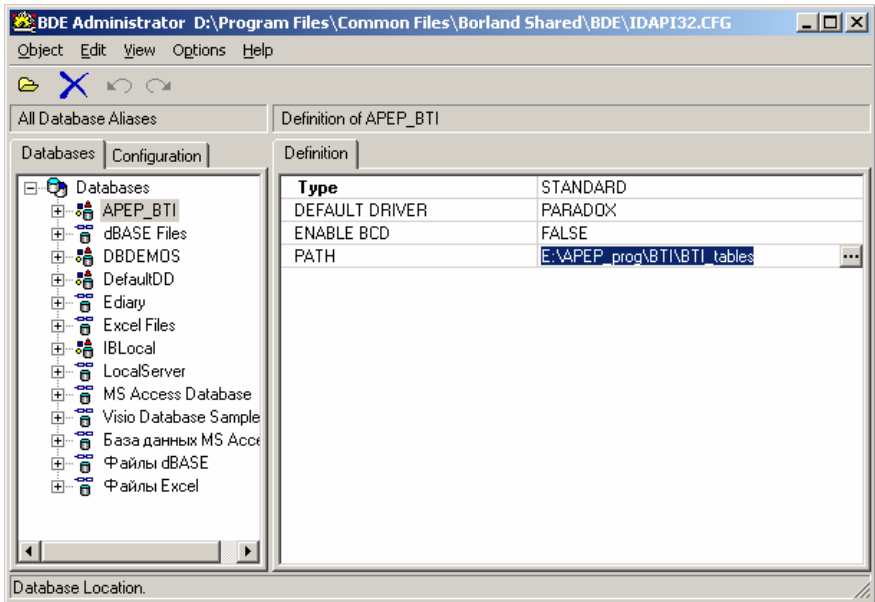


Рис. 1.15. Внешний вид утилиты BDE Administrator

В правой части отображаются свойства выбранного объекта. Важнейшее свойство `PATH` – путь к файлам БД, который пользователь имеет право задавать самостоятельно (рис. 1.15).

Чтобы создать новый псевдоним следует выполнить команду `Object | New`, результатом выполнения которой будет окно, показанное на рис. 1.16. Следует оставить параметр `STANDARD`, это и означает использование формата `Paradox`.

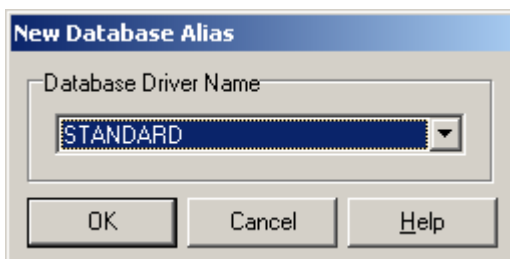
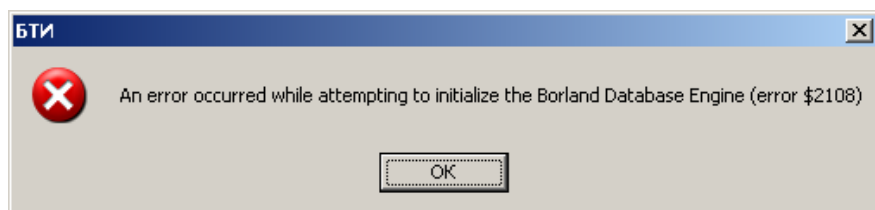


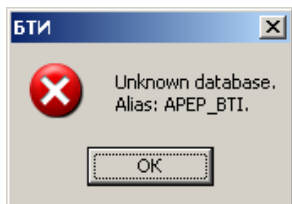
Рис. 1.16. Создание нового псевдонима в BDE Administrator

Следовательно, после установки BDE, пользователь создает новый псевдоним, присваивает ему имя `APEP_BTI` и задает путь к файлам БД в параметре `PATH`. После этих действий база данных ВТИ готова к полноценной работе.

В заключении этой темы приведем окна сообщений об ошибках БД ВТИ (рис. 1.17), свидетельствующие о нарушении связи между приложением и файлами данных.



а



б



в

Рис. 1.17. Окна сообщений об ошибках БД ВТИ:

- а) ошибка связи с BDE;
- б) ошибочный alias;
- в) ошибочный путь к файлам БД

## 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Данные для выполнения расчета

Кинематическая схема механизма поворота экскаватора показана на рис. 2.1, данные для расчета приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Наименование параметра	Значение параметра
момент инерции платформы экскаватора	$J_{мех} = 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент инерции тормозной муфты	$J_T = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент инерции 1-й шестерни	$J_1 = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент инерции 3-й шестерни	$J_3 = 0,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент инерции 4-й шестерни	$J_4 = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
число зубьев 1-й шестерни	$z_1 = 24$
число зубьев 2-й шестерни	$z_2 = 198$
число зубьев 3-й шестерни	$z_3 = 18$
число зубьев 4-й шестерни	$z_4 = 82$
масса вращающейся платформы экскаватора	$m_{мех} = 4 \cdot 10^4 \text{ кг}$
диаметр катка	$d_K = 0,12 \text{ м}$
средний радиус катания	$R_K = 2,70 \text{ м}$
жесткость механической связи	$c_I = 5,7 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$
коэффициент полезного действия	$\eta = 0,76$
коэффициент трения скольжения	$\mu = 0,1$

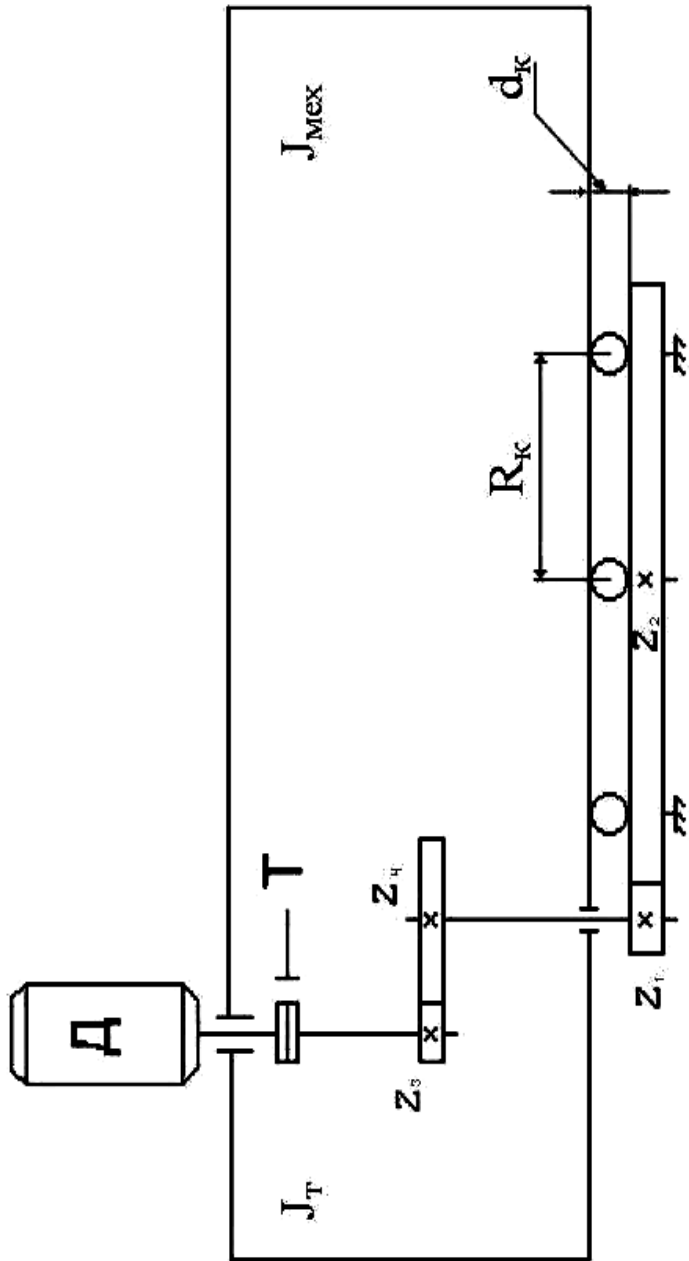


Рис.2.1. Кинематическая схема механизма поворота экскаватора

## 2.2. Задание

1. Привести кинематическую схему к расчетной.
2. Рассчитать нагрузку и выбрать ДПТ.
3. Составить структурную схему и определить передаточную функцию по управляющему и возмущающим воздействиям.
4. Построить АЧХ, ФЧХ и переходные процессы в механической части электропривода.
5. Построить переходные процессы электромеханической системы.
6. Определить оптимальную статическую жесткость механической характеристики электропривода  $\beta_{\text{опт}}$  и построить АЧХ, ФЧХ и переходные процессы при данном значении  $\beta_{\text{опт}}$ .

## 2.3. Приведение схемы

Для приведения исходной кинематической схемы к расчетной воспользуемся следующими формулами:

$$J_{\text{нр}i} = \frac{J_i}{(i_{li})^2}, \quad (2.1)$$

где  $J_{\text{нр}i}$  – приведенный момент инерции  $i$  элемента кинематической схемы;

$i_{li}$  – передаточное отношение от  $i$  элемента до вала привода;

$$C_{\text{нр}i} = \frac{C_i}{(i_{li})^2}, \quad (2.2)$$

где  $C_{\text{нр}i}$  – приведенное значение жесткости  $C_i$   $i$ -го элемента к валу привода.

В качестве вала привода выберем вал ЭД.

Тогда приведенный момент инерции ротора двигателя равен

$$J_{\text{ротора, пр}} = J_{\text{ротора}} \cdot \quad (2.3)$$

Приведенный момент инерции тормозной муфты составляет

$$J_{T, пр} = J_T, \quad (2.4)$$

$$J_{T, пр} = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведенный момент инерции третьей шестерни составляет

$$J_{3, пр} = J_3, \quad (2.5)$$

$$J_{3, пр} = 0,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведенный момент инерции четвертой шестерни определится следующим образом:

$$J_{4, пр} = \frac{J_4}{(i_{34})^2} = \frac{J_4}{\left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2}, \quad (2.6)$$

$$J_{4, пр} = \frac{0,5}{\left(\frac{82}{18}\right)^2} = 2,41 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_{1, пр} = \frac{C_1}{(i_{31i})^2} \frac{C_1}{\left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2}; \quad (2.7)$$

но

$$i_{13} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{\omega_3}{\omega_4} = i_{34}, \quad (2.8)$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ , рад/с – угловые скорости вращения соответствующих звеньев, тогда

$$C_{1, пр} = \frac{5,7 \cdot 10^5}{\left(\frac{82}{18}\right)^2} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$J_{1, np} = \frac{J_1}{(J_{31})^2}, \quad (2.9)$$

$$J_{1, np} = \frac{J_1}{(J_{31})^2} = \frac{0,24}{\left(\frac{82}{18}\right)^2} = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Далее определим приведенный момент инерции платформы экскаватора:

$$J_{\text{мех}, np} = \frac{J_{\text{мех}}}{(i_{32})^2} = \frac{J_{\text{мех}}}{\left(\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3}\right)^2}, \quad (2.10)$$

$$J_{\text{мех}, np} = \frac{10^5}{\left(\frac{198}{24} \cdot \frac{82}{18}\right)^2} = \frac{10^5}{(37,58)^2} = 70,81 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Многомассовая расчетная схема изображена на рис. 2.2.

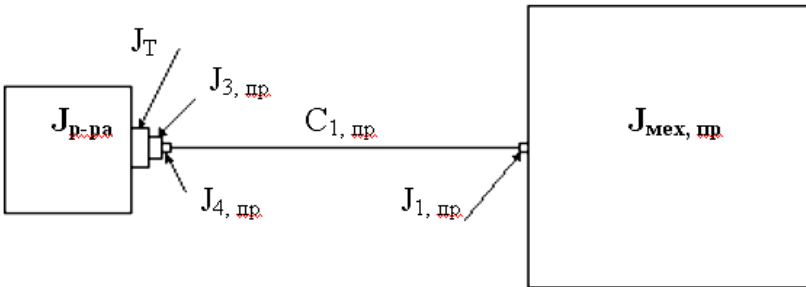


Рис. 2.2. Расчетная схема многомассовой системы

Для упрощения расчетной схемы многомассовой системы перейдем к двухмассовой системе. Переход осуществим по следующим формулам:

$$J_{1\Sigma} = J_{\text{ротора}, np} + J_{T, np} + J_{3, np} + J_{4, np}, \quad (2.11)$$

$$J_{2\Sigma} = J_{1, np} + J_{\text{мех}, np}, \quad (2.12)$$



$$C_{12} = C_{1, np}, \quad (2.13)$$

$$J_{1\Sigma} = J_{\text{ротора, np}} + 0,34 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{2\Sigma} = 0,82 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_{12} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчетная схема двухмассовой системы показана на рис. 2.3.

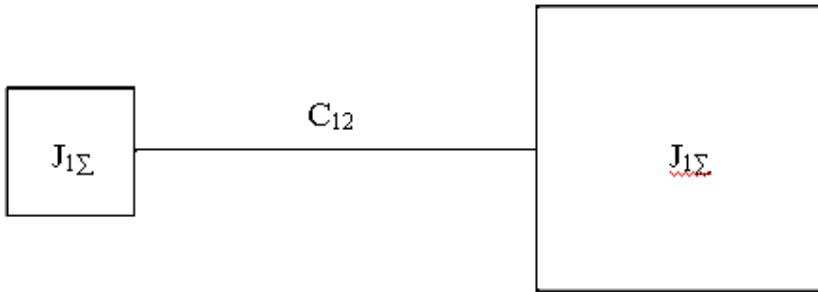


Рис. 2.3. Расчетная схема двухмассовой системы

Статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя механизма поворота экскаватора, находим по формуле

$$M_C = \frac{m_{\text{мех}} \cdot (\mu \cdot r_{\text{ц}} + \rho) \cdot R_K \cdot \Psi \cdot g}{i \cdot \eta \cdot r_K}, \quad (2.14)$$

где  $r_{\text{ц}}$ , м – радиус цапфы катка;

$$r_{\text{ц}} = 0,82 \cdot r_K, \quad (2.15)$$

где  $r_K = \frac{d_K}{2}$ , м – радиус катка,

$$r_K = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ м},$$

$$r_y = 0,82 \cdot 0,06 = 4,92 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$\rho = 6 \cdot 10^{-4}$  м – коэффициент трения качения,

$\Psi = 1,7$  – коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления,  
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Имеем:

$$M_C = \frac{40 \cdot 10^4 \cdot (0,1 \cdot 4,92 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot 10^{-4}) \cdot 2,7 \cdot 1,7 \cdot 9,81}{37,58 \cdot 0,76 \cdot 0,06} =$$

$$= 5,8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

## 2.4. Выбор электродвигателя

При выборе двигателя из базы данных руководствуемся рекомендациями, приведенными в разделе 1. Выбираем двигатель ДЭ816, некоторые технические параметры которого приведены в таблице 2.2.

## 2.5. Структурная схема и передаточные функции

Система уравнений, описывающих двухмассовую систему, имеет вид

$$\begin{cases} M - M_{C1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_1 p \omega_1, \\ M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 p \omega_2, \\ M_{12} = \frac{C_{12}}{p} \cdot (\omega_1 - \omega_2) + \beta_{BT} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \end{cases} \quad (2.16)$$

Таблица 2.2

Наименование параметра	Значение параметра
номинальная частота вращения	$\omega_H = 480 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 50,27 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$
номинальная мощность	$P_H = 150 \text{ кВт}$
момент инерции ротора	$J_{\text{ротора}} = 16,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент трогания	$M_{\text{трог.}} = 8830 \text{ Н} \cdot \text{м}$
номинальное напряжение	$U_H = 440 \text{ В}$
номинальный ток	$I_H = 370 \text{ А}$
максимальная частота вращения	$\omega_{\text{max}} = 1600 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 167,6 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$
максимальный момент	$M_{\text{max}} = 7840 \text{ Н} \cdot \text{м}$
максимальный ток	$I_{\text{max}} = 1000 \text{ А}$
ток трогания	$I_{\text{трог.}} = 1125 \text{ А}$
сопротивление обмотки якоря	$R = 0,0114 \text{ Ом}$
число параллельных ветвей	$2a = 8$
продолжительность включения	$60 \text{ мин}$

В системе уравнений (2.16) приняты следующие обозначения:

$M = M_{\text{трог.}} = 8830 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент трения ротора;

$M_{C1} \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент сопротивления в двигателе; по условию задачи  $M_{C1} = 0,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

$M_{C2} \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент сопротивления второй массы:

$M_{C2} = M_C = 5,8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

$M_{12} \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент, передающий энергию от первой массы ко второй массе;

$\omega_1, \omega_2, 1/\text{с}$  – угловые скорости первой и второй масс соответственно;

$\beta_{BT}$  – коэффициент вязкого трения;

$J_1, J_2$  – соответственно равны  $J_{1\Sigma}, J_{2\Sigma}$ .

Расчет будем проводить сразу с учетом диссипативных сил. Для решения систем воспользуемся методами теории автоматического управления (ТАУ). Управляющим воздействием в данном случае является  $M$ , а возмущающим воздействием –  $M_{C1}$  и  $M_{C2}$ . Структурная схема, соответствующая нашей системе, показана на рис. 1.4, на котором

$$W_1 = 1/J_1 p, \quad (2.17)$$

$$W_2 = C_{12}/p, \quad (2.18)$$

$$W_3 = 1/J_2 p, \quad (2.19)$$

$$W_4 = \beta. \quad (2.20)$$

Очевидно, что

$$W(p)_{MC_1} = -W(p)_M \cdot \frac{C_{12} + \beta \cdot p}{p \cdot (p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + J_\Sigma (C_{12} + \beta \cdot p))}, \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} W(p)_{MC_2} &= -\frac{W_3 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 + W_3 \cdot W_2} = \\ &= \frac{\omega_2(p)}{M_{C_2}(p)}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

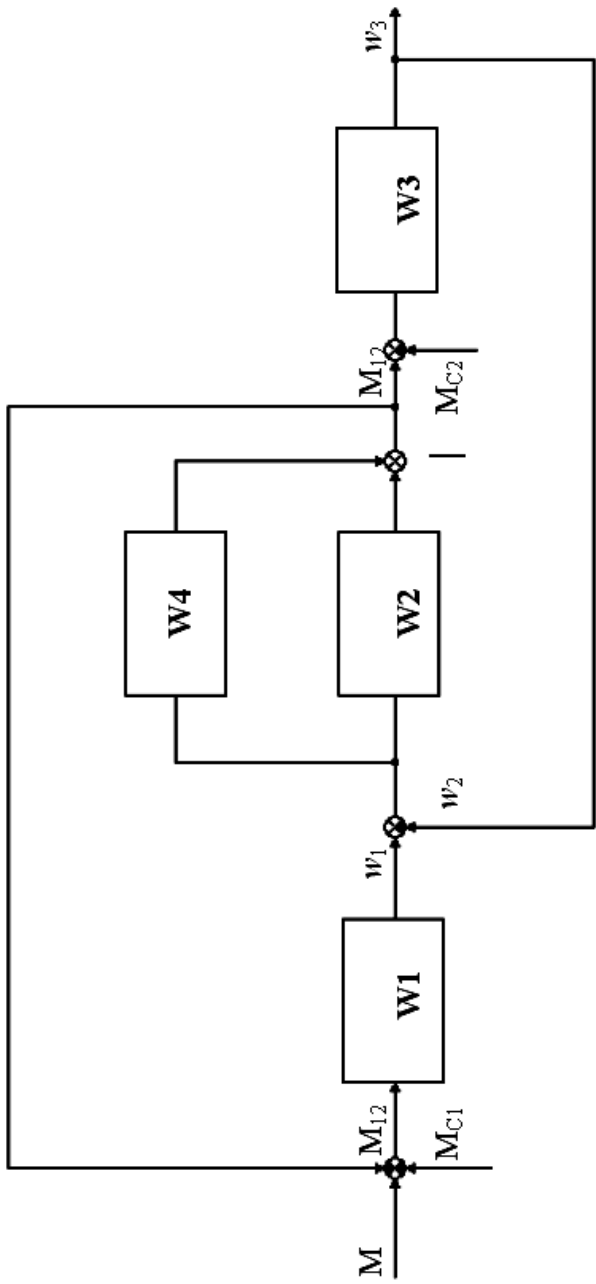


Рис. 2.4. Структурная схема

$$\begin{aligned}
 W_3 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 &= \frac{1}{J_2 p} + \frac{1}{p^2 J_1 \cdot J_2} \cdot \frac{C_{12} + \beta}{p} = \\
 &= \frac{p^2 \cdot J_1 + C_{12} + \beta \cdot p}{p^3 \cdot J_1 \cdot J_2},
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

таким образом, имеем

$$\begin{aligned}
 W(p)_{MC_2} &= -\frac{p^2 \cdot J_1 + C_{12} + \beta \cdot p}{p^3 \cdot J_1 \cdot J_2} \cdot \\
 &\cdot \frac{p^2 \cdot J_1 \cdot J_2}{p^2 \cdot J_1 \cdot J_1 + J_\Sigma \cdot (C_{12} + \beta \cdot p)} = \\
 &= -\frac{p^2 \cdot J_1 + C_{12} + \beta \cdot p}{p \cdot (p^2 \cdot J_1 \cdot J_1 + J_\Sigma \cdot (C_{12} + \beta \cdot p))}.
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

## 2.6. Амплитудочастотная и фазочастотная характеристики для управляющего воздействия

Рассматриваем следующую передаточную функцию

$$W(p)_M = \frac{C_{12} + \beta \cdot p}{p \cdot (p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + J_\Sigma (C_{12} + \beta \cdot p))}. \tag{2.25}$$

Для построения амплитудочастотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ), заменим « $p$ » на « $j\Omega$ », здесь  $\Omega$ ,  $1/c$  — частота управляющего воздействия. Если не учитывать диссипативные силы, т. е.  $\beta = 0$ , то имеем

$$\begin{aligned}
W(j\Omega)_M &= \frac{C_{12}}{j\Omega \cdot (\Omega^2 \cdot (-1) \cdot J_1 \cdot J_2 + J_\Sigma \cdot C_{12})} = \\
&= \frac{C_{12} \cdot j}{j\Omega \cdot J_\Sigma \cdot C_{12} \cdot \left(1 - \Omega^2 \cdot \frac{J_1 \cdot J_2}{J_\Sigma \cdot C_{12}}\right) \cdot j} = \quad (2.26) \\
&= -\frac{j}{\Omega \cdot J_\Sigma \cdot \left(1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_{12}}\right)^2\right)}
\end{aligned}$$

где  $\Omega_{12}$ , 1/с – собственная частота колебаний, которую определим следующим образом:

$$\Omega_{12}^2 = \frac{C_{12} \cdot J_\Sigma}{J_1 \cdot J_2}, \quad (2.27)$$

$$\Omega_{12}^2 = \frac{2,75 \cdot 10^4 \cdot (70,82 + 16,59)}{70,82 \cdot 16,59} = 2045,9 \text{ 1/с}^2,$$

тогда

$$\Omega_{12} = \sqrt{2045,9} = 45,2 \text{ 1/с.}$$

Далее имеем:

$$A\left(\frac{\Omega}{\Omega_{12}} = 0,1\right) = \frac{1}{\Omega \cdot J_\Sigma \cdot (1 - 0,1^2)}, \quad (2.28)$$

$$A\left(\frac{\Omega}{\Omega_{12}} = 0,2\right) = \frac{1}{\Omega \cdot J_\Sigma \cdot (1 - 0,2^2)}, \quad (2.29)$$

$$A\left(\frac{\Omega}{\Omega_{12}} = 0,1\right) = \frac{1}{45,2 \cdot 87,41 \cdot (1 - 0,1^2)} = 2,56 \cdot 10^{-4},$$

$$A\left(\frac{\Omega}{\Omega_{12}} = 0,2\right) = \frac{1}{45,2 \cdot 87,41 \cdot (1 - 0,2^2)} = 1,30 \cdot 10^{-4},$$

$$\varphi(\Omega/\Omega_{12}) = \begin{cases} -\pi/2, & \text{при } \Omega/\Omega_{12} < 1, \\ \pi/2, & \text{при } \Omega/\Omega_{12} > 1. \end{cases} \quad (2.30)$$

Данные для построения графика приведены в табл. 2.3, график приведен на рис. 2.5.

Таблица 2.3

$\Omega/\Omega_{12}$	$\varphi$ , град.	$A, *10^4$	$\beta$ , (* $10^4$ )	$\Omega/\Omega_{12}$	$\varphi$ , град.	$A, *10^4$	$\beta$ , (* $10^4$ )
0,05	-90,00	50,7	50,7	0,8	-95,10	8,7	8,8
0,07	-90,00	36,3	36,3	0,85	-97,87	10,5	10,7
0,1	-90,00	25,6	25,6	0,9	-103,35	14,1	14,8
0,15	-90,01	17,3	17,3	0,95	-117,86	23,0	27,3
0,2	-90,03	13,2	13,2	1,0	-174,58	39,9	$\infty$
0,3	-90,11	9,3	9,3	1,05	-232,52	20,1	23,5
0,4	-90,27	7,5	7,5	1,1	-247,37	10,5	10,6
0,5	-90,60	6,7	6,7	1,15	-252,93	6,7	6,8
0,55	-90,86	6,6	6,6	1,2	-255,72	4,8	4,8
0,6	-91,22	6,6	6,6	1,3	-258,40	2,8	2,8
0,65	-91,72	6,7	6,7	1,4	-259,58	1,9	1,9
0,7	-92,43	7,1	7,1	1,5	-260,16	1,4	1,4
0,75	93,47	7,7	7,7	1,6	-260,43	1,0	1,0

Если же учитывать диссипативные силы, т. е.:

$$\beta = \frac{C_{12} \cdot \lambda_{BT}}{\pi \cdot \Omega_{12}}, \quad (2.31)$$

где  $\lambda_{BT} = 0,2$  – декремент затухания для вязкого трения; по условию задачи  $\lambda_{BT} = 0,2$ , тогда получим

$$\beta = \frac{2,75 \cdot 10^4 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 45,2} = 38,73,$$

далее



$$\begin{aligned}
 W(p)_M &= \frac{C_{12} + \beta \cdot p}{p \cdot (p^2 \cdot J_1 \cdot J_2 + J_{\Sigma}(C_{12} + \beta \cdot p))} = \\
 &= \frac{C_{12} + \beta \cdot p}{J_1 \cdot J_2 \cdot p \cdot \left( p^2 + \Omega_{12}^2 + \frac{\beta \cdot p \cdot \Omega_{12}^2}{C_{12}} \right)}, \quad (2.32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W(p)_M &= \frac{2,75 \cdot 10^4 + 38,73 \cdot p}{1174,9 \cdot p \cdot (p^2 + 2045,9 + 2,88 \cdot p)} = \\
 &= \frac{1,41 \cdot 10^3 \cdot p + 1}{4,27 \cdot 10^{-2} \cdot p^3 + 1,23 \cdot 10^{-1} \cdot p^2 + 87,41 \cdot p}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W(J\Omega) &= \frac{J\Omega \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} + 1}{-J\Omega^3 \cdot 4,27 \cdot 10^{-2} - \Omega^2 \cdot 1,23 \cdot 10^{-1} + J\Omega \cdot 87,41} \cdot \frac{J}{J} = \\
 &= \frac{-J\Omega \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} + J \cdot 1}{(\Omega^3 \cdot 4,27 \cdot 10^{-2} + \Omega \cdot 87,41) - J(\Omega^2 \cdot 1,23 \cdot 10^{-1})}.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$A(\Omega) = \sqrt{\frac{\left(-1,41 \cdot 10^{-3} \cdot \Omega\right)^2 + 1^2}{\left(4,27 \cdot 10^{-2} \cdot \Omega^3 - 87,41 \cdot \Omega\right)^2 + \left(-0,123 \cdot \Omega\right)^2}},$$

и

$$\begin{aligned}
 \varphi(\Omega) &= \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{-1,41 \cdot 10^{-3} \cdot \Omega}\right) - \\
 &\quad - \operatorname{arctg}\left(\frac{-0,123 \cdot \Omega^2}{4,27 \cdot 10^{-2} \cdot \Omega^3 - 87,41 \cdot \Omega}\right).
 \end{aligned}$$

Данные для построения графика приведены в табл. 2.3, а сам график – на рис. 2.5.

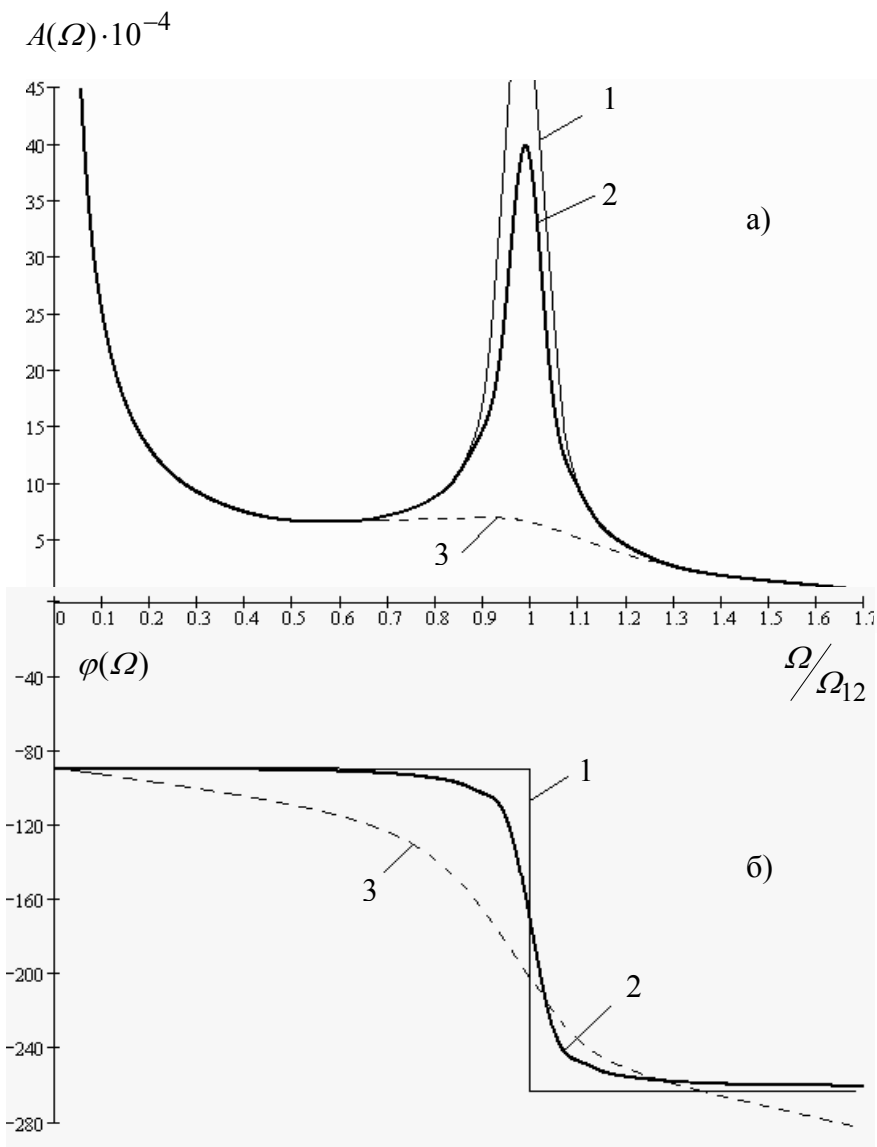


Рис. 2.5. Амплитудочастотные и фазочастотные характеристики (кривые: 1 -  $\lambda_{BT} = 0$ , 2 -  $\lambda_{BT} = 0,2$ , 3 -  $\lambda_{BT} = 2$ ).

## 2.7. Переходные процессы

Для анализа переходных процессов без учета диссипативных сил воспользуемся формулами [6, с. 64 – 72]:

$$\omega_1 = \varepsilon_{cp} \cdot t + \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t), \quad (2.33)$$

$$\omega_2 = \varepsilon_{cp} \cdot t - \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t), \quad (2.34)$$

$$M_{12} = J_2 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot (1 - \cos(\Omega_{12} \cdot t))t + M_{C2}, \quad (2.35)$$

где  $\varepsilon_{cp}$ ,  $1/c^2$  – среднее ускорение, которое определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{M - M_{C1} - M_{C2}}{J_{\Sigma}}, \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_{cp} = \frac{8830 - 812 - 5,8 \cdot 10^3}{70,82 + 16,59} = 25,38 \text{ } 1/c^2,$$

t, с – время.

Меняя значение ( $\Omega_{12} \cdot t$ ), легко получим графики изменения этих величин во времени. Расчетные характеристики показаны на рис. 2.6, расчетные данные приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

$\Omega_{12} \cdot t, \text{ рад}$	$t, \text{ сек}$	$\omega_1, \text{ об/мин}$	$\omega_2, \text{ об/мин}$	$M_{12}, \text{ Н}\cdot\text{м}$
0	0	0	0	5800
$\pi$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	20,28	0,42	6327
$\pi/2$	$3,46 \cdot 10^{-2}$	31,14	3,04	7597
$3\pi/4$	$5,18 \cdot 10^{-2}$	28,66	8,79	8868
$\pi$	$6,91 \cdot 10^{-2}$	16,75	16,75	9395
$5\pi/4$	$8,64 \cdot 10^{-2}$	4,8	24,7	8868
$3\pi/2$	0,10	2,4	30,46	7597
$7\pi/4$	0,12	13,22	33,08	6327
$2\pi$	0,14	33,5	33,5	5800

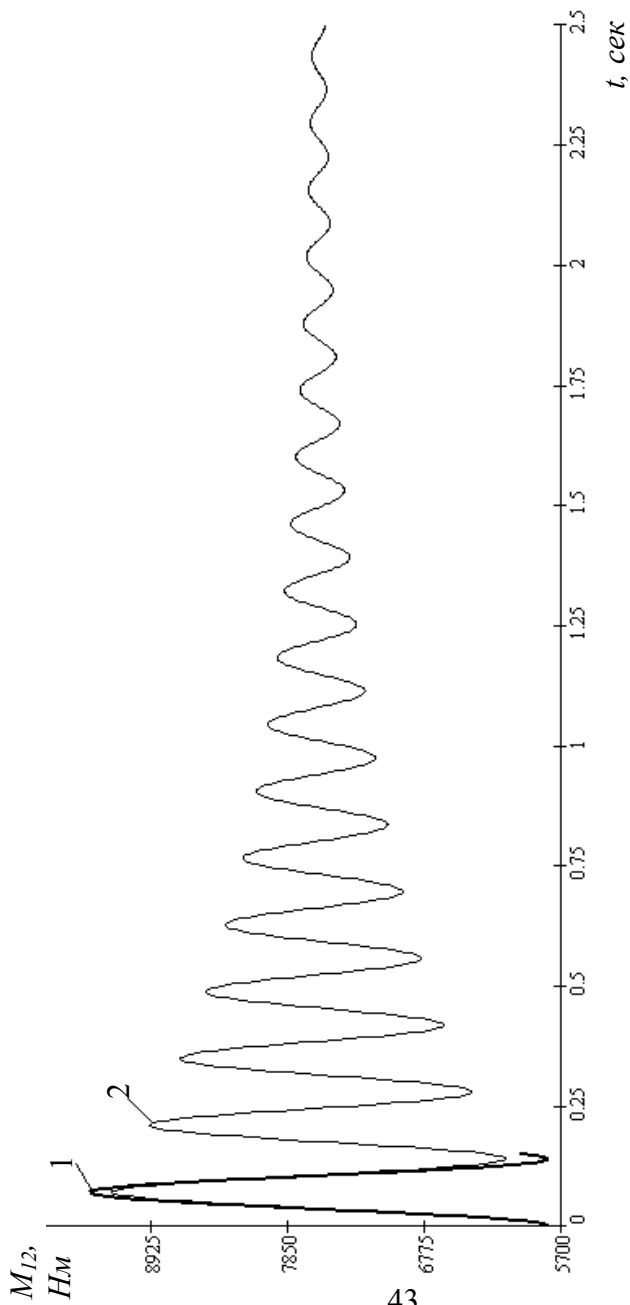


Рис. 2.6. Переходные процессы  
 (кривые: 1 –  $M_{12}=f(t)$ ,  $\lambda_{BT}=0$ ; 2 –  $M_{12}=f(t)$ ,  $\lambda_{BT}=0.2$ )

Для учета диссипативных сил, необходимо воспользоваться операторной формой записи  $\omega_1(p)$ ;  $\omega_2(p)$ ;  $M_{12}(p)$ . Разложив их на сумму правильных дробей и применив обратные преобразования Лапласа, мы получим искомые временные функции:

$$\omega_1(t) = \varepsilon_{cp} \cdot \left( t + \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{1}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t) \cdot e^{-\alpha t} \right), \text{ л/с,} \quad (2.37)$$

$$\omega_2(t) = \varepsilon_{cp} \cdot \left( t - \frac{1}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t) \cdot e^{-\alpha t} \right), \text{ л/с,} \quad (2.38)$$

$$M_{12}(t) = J_2 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot \left( 1 - \cos(\Omega_{12} \cdot t) \cdot e^{-\alpha t} \right) + M_{C2}, \text{ Н}\cdot\text{м,} \quad (2.39)$$

где  $\alpha_{\text{вм}}$  – декремент затухания, значение которого определяется по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{вм}} \approx \frac{\lambda_{\text{вм}} \cdot \Omega_{12}}{2\pi}, \quad (2.40)$$

$$\alpha_{\text{вм}} \approx \frac{0,2 \cdot 45,2}{2\pi} = 1,44.$$

Данные для построения графиков содержатся в табл. 2.4, графики приведены на рис. 2.7.

Как видно из табл. 2.5,  $M_{12\text{max}} = 9395 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а средний момент можем определить как

$$M_{12\text{сред}} = \frac{M_{12\text{max}} + M_{12\text{min}}}{2}, \quad (2.41)$$

$$M_{12\text{сред}} = \frac{9395}{7597,5} = 1,24 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

К этому среднему значению момента стремится динамический момент  $M_{12}$  по завершению переходного процесса (рис. 2.8).

Таблица 2.5

$\Omega_{12}t, \text{ рад}$	$t, \text{ сек}$	$\omega_1, \text{ об/мин}$	$\omega_2, \text{ об/мин}$	$M_{12}, \text{ Н}\cdot\text{м}$
0	0	0	0	5800
$\pi/4$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	19,89	0,51	6358
$\pi/2$	$3,46 \cdot 10^{-2}$	30,04	3,30	7597
$3\pi/2$	$5,18 \cdot 10^{-2}$	27,5	9,06	8777
$\pi$	$6,91 \cdot 10^{-2}$	16,75	16,75	9225
$\pi+\pi/4$	$8,64 \cdot 10^{-2}$	6,72	24,27	8720
$\pi+\pi/2$	0,10	5,52	29,72	7597
$\pi+3\pi/2$	0,12	15,79	32,48	6530
$2\pi$	0,14	33,50	33,50	6124
$2\pi+\pi/4$	0,16	50,26	34,68	6581
$2\pi+\pi/2$	0,17	59,63	37,72	7597
$2\pi+3\pi/2$	0,19	58,31	43,20	8517
$3\pi$	0,21	50,25	50,25	8931
$3\pi+\pi/4$	0,23	42,79	57,17	8517
$3\pi+\pi/2$	0,24	42,56	62,39	7594
$3\pi+3\pi/2$	0,26	51,73	65,41	6722
$4\pi$	0,28	67,00	67,00	6390
$16\pi$	1,11	268,0	268,0	7232
$16\pi+\pi/4$	1,12	275,4	271,5	7345
$16\pi+\pi/2$	1,14	280,8	275,4	7597
$16\pi+3\pi/2$	1,16	283,	279,9	7837
$17\pi$	1,18	284,8	248,8	7928
$17\pi+\pi/2$	1,21	289,2	294,1	7597
$18\pi$	1,24	301,5	301,5	7298
$28\pi$	1,94	469,0	469,0	7487
$28\pi+\pi/2$	1,97	478,7	477,1	7597
$29\pi$	2,00	485,8	485,8	7698
$29\pi+\pi/2$	2,04	492,9	494,4	7597
$30\pi$	2,07	502,5	502,5	7506
$38\pi$	2,63	636,5	636,5	7557
$38\pi+\pi/2$	2,66	645,4	644,8	7594
$39\pi$	2,70	653,3	653,3	7634
$39\pi+\pi/2$	2,73	331,2	331,8	7597
$40\pi$	2,77	670,0	670,0	7564

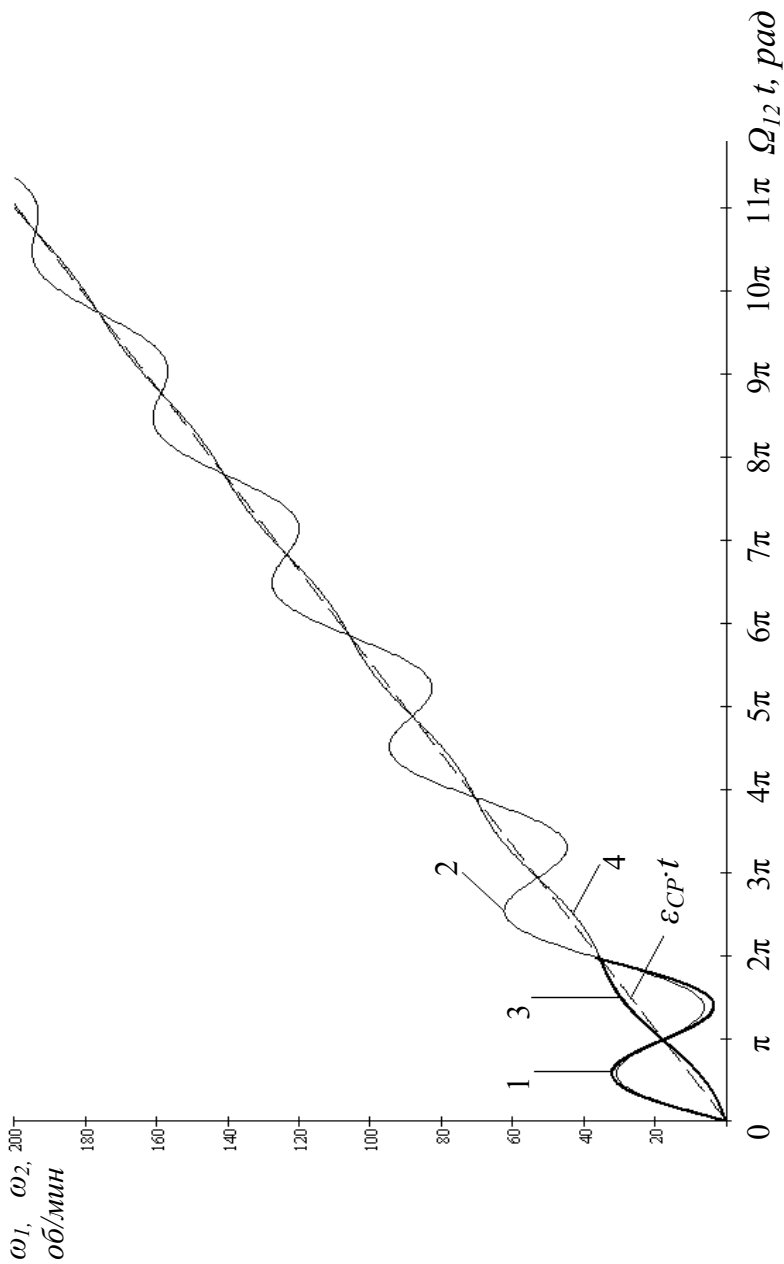


Рис. 2.7. Переходные процессы (кривые: 1 –  $\omega_1 = f(\Omega_{12} t)$ ,  $\lambda_{B\Gamma} = 0$ ;  
 2 –  $\omega_1 = f(\Omega_{12} t)$ ,  $\lambda_{B\Gamma} = 0, 2$ ; 3 –  $\omega_2 = f(\Omega_{12} t)$ ,  $\lambda_{B\Gamma} = 0$ ; 4 –  $\omega_2 = f(\Omega_{12} t)$ ,  $\lambda_{B\Gamma} = 0, 2$ )

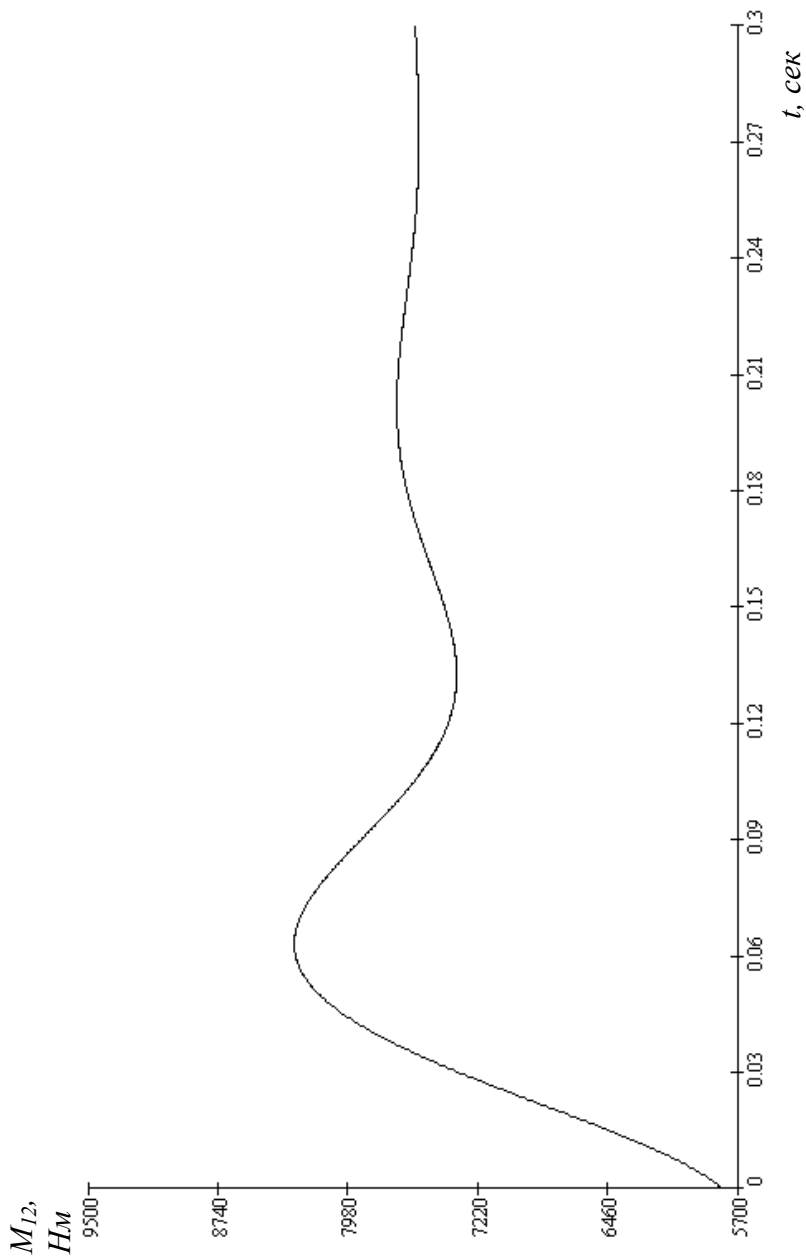


Рис. 2.8. Переходные процессы при  $\lambda = 2.0$



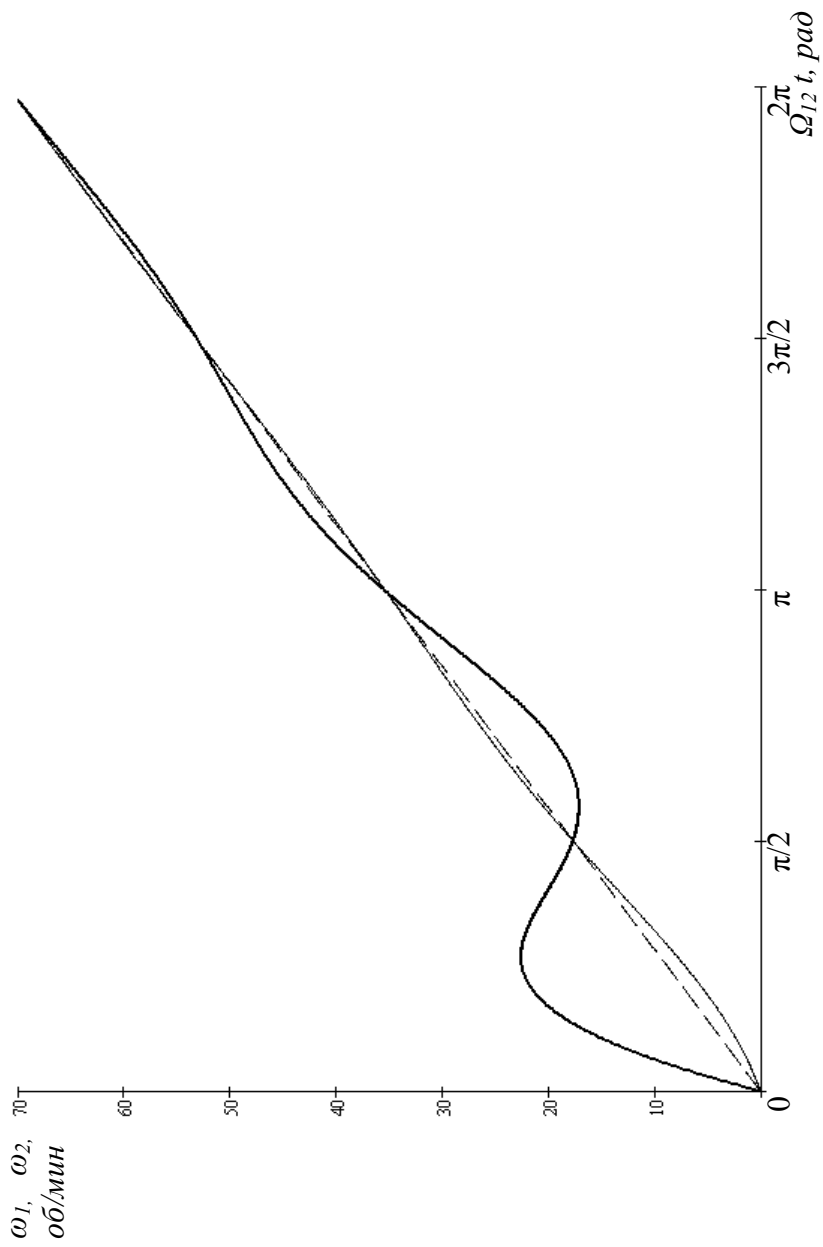


Рис. 2.9. Время переходного процесса  $t_{n.пр.} \approx 0,3$  сек

Определим двумя способами значение динамического коэффициента:

$$k_{\partial} = \frac{M_{12 \max}}{M_{12 \min}}, \quad (2.42)$$

$$k_{\partial} = \frac{9395}{7597,5} = 1,24$$

или

$$k_{\partial} = \frac{M_{C2} + 2 \cdot J_2 \cdot \varepsilon_{cp}}{M_{C2} + J_2 \cdot \varepsilon_{cp}}, \quad (2.43)$$

$$k_{\partial} = \frac{5800 + 2 \cdot 70,82 \cdot 25,38}{5800 + 70,82 \cdot 25,38} = 1,24.$$

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

#### 3.1. Данные двигателя постоянного тока

Некоторые технические параметры двигателя постоянного тока ДЭ816 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Наименование параметра	Значение параметра
номинальная частота вращения	$\omega_H = 480 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 50,27 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$
номинальная мощность	$P_H = 150 \text{ кВт}$
момент инерции ротора	$J_{\text{ротора}} = 16,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
момент трогания	$M_{\text{трог.}} = 8830 \text{ Н} \cdot \text{м}$
номинальное напряжение питания	$U_H = 440 \text{ В}$
номинальный ток	$I_H = 370 \text{ А}$
максимальная частота вращения	$\omega_{\text{max}} = 1600 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 167,6 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$
максимальный момент	$M_{\text{max}} = 7840 \text{ Н} \cdot \text{м}$
максимальный ток	$I_{\text{max}} = 1000 \text{ А}$
ток трогания	$I_{\text{трог.}} = 1125 \text{ А}$
сопротивление обмотки якоря	$R = 0,0114 \text{ Ом}$
число параллельных ветвей	$2a = 8$
продолжительность включения	$60 \text{ мин}$

**Примечание:** при расчетах принято следующее значение числа  $\pi = 3,142$ .

### 3.2. Задание

Для данного двигателя выполнить расчет и построить следующие характеристики:

1. Естественные механическую характеристику (МХ) и электромеханическую характеристику (ЭМХ) в абсолютных и относительных единицах и определить статическую жесткость МХ.

2. Искусственные МХ и ЭМХ в абсолютных и относительных единицах для случаев:

а) при введении в цепь якоря добавочного сопротивления ( $R_{\partial}$ ) для получения скорости  $0,5n_H$  при статическом моменте для прямого потока мощности;

б) при изменении напряжения на обмотке якоря для  $0,5n_H$  при том же статическом моменте;

в) при ослаблении магнитного потока достигнуть паспортного значения  $n_{\max}$  при постоянной мощности и определить скорость и ток при статическом моменте ( $M_C$ );

г) при переходе из двигательного режима при  $M_C$  в режим торможения противовключением (двумя способами) и в режим динамического торможения необходимо определить добавочное сопротивление  $R_{\partial}$  из условий допустимого ускорения механизма и коммутационной способности двигателя.

3. Динамическую и механическую характеристики при частоте вынуждающего воздействия ( $\Omega$ ) равной той же частоте сопряжения ( $\Omega_{\text{сопр.}}$ ) и при  $\Omega = 2 \cdot \Omega_{\text{сопр.}}$ .

4. Рассчитать и построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) для динамической жесткости  $\beta_{\text{дин.}}$ .

5. Сделать выводы по работе.

### 3.3. Решение

#### 3.3.1. Естественные механические и электромеханические характеристики

Электромеханическая характеристика – зависимость частоты вращения от тока  $\omega = f(I)$ , определяется уравнением

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{k\Phi}, \quad (3.1)$$

где  $\omega, \frac{1}{c}$  – угловая скорость двигателя;

$U, B$  – напряжение питания;

$k$  – конструктивная постоянная;

$\Phi, B\phi$  – магнитный поток, причем

$$k\Phi_H = C_e - const; \quad (3.2)$$

$I, A$  – ток двигателя;

$R_{я\Sigma}, Ом$  – суммарное сопротивление якоря.

Механическая характеристика  $\omega = f(M)$ :

$$\omega = \frac{U}{C_e} - M \cdot \frac{R_{я\Sigma}}{C_e^2}, \quad (3.3)$$

где  $M, H \cdot m$  – момент на валу двигателя.

Очевидно, что и МХ, и ЭМХ – прямые линии, где одна точка определяется номинальными значениями тока  $I_H = 370 A$  и момента, который определяется следующим образом:

$$M_H = P_H / \omega_H, \quad (3.4)$$

$$M_H = P_H / \omega_H = 150 \cdot 10^3 / 50,27 = 2984 H \cdot m,$$

а другая точка при  $I = 0$  и  $M = 0$  есть  $\omega_0, \frac{1}{c}$  – угловая скорость идеального холостого хода, которую определяем по формуле

$$\omega_0 = \omega_H \cdot \frac{U_H}{U_H - I_H \cdot R_{я\Sigma t_{\text{дон}}}}, \quad (3.5)$$

где  $R_{я\Sigma t_{\text{дон}}}$ , Ом – сопротивление обмотки якоря при допустимой температуре.

За допустимую температуру возьмем 155 °С (соответствует наиболее часто используемой изоляции класса «F»); исходное сопротивление якоря, приведенное в пункте 3.1, будем считать данным при 15 °С. Обозначим его  $R_{я\Sigma}(15) = 0,0114 \text{ Ом}$ , тогда сопротивление обмотки якоря при допустимой температуре определим по следующей формуле:

$$R_{я\Sigma t_{\text{дон}}} = R_{я\Sigma}(15) \cdot (1 + \chi \cdot \theta) + \frac{\Delta U_{щ}}{I_H}, \quad (3.6)$$

где  $\chi = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  – температурный коэффициент меди;

$\theta = 155 - 15 = 140^\circ\text{C}$  – разность температур;

$\Delta U_{щ}, B$  – падение напряжения на контакте «щетка – коллектор», принимаем  $\Delta U_{щ} = 2B$ ;

$$R_{я\Sigma t_{\text{дон}}} = 0,0114 \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 140) + \frac{2}{370} = 2,319 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

Зная  $R_{я\Sigma t_{\text{дон}}}$ , определим  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = 50,27 \cdot \frac{440}{440 - 370 \cdot 2,319 \cdot 10^{-2}} = 51,27 \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Таким образом, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 = 51,27 \frac{1}{^\circ\text{C}}; \\ I &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\omega \left| \begin{array}{l} = \omega_H = 50,27 \frac{1}{C}; \\ I = I_H = 370 A \end{array} \right.$$

$$\omega \left| \begin{array}{l} = \omega_0 = 51,27 \frac{1}{C}; \\ M = 0 \end{array} \right.$$

$$\omega \left| \begin{array}{l} = \omega_H = 50,27 \frac{1}{C} \\ M = M_H = 2984 H \cdot m \end{array} \right. .$$

Характеристики в естественных единицах показаны на рис. 3.1.

Построим аналогичные характеристики в относительных единицах. Для этого за базовые величины примем  $\omega_{\bar{\sigma}} = \omega_0$ ;  $I_{\bar{\sigma}} = I_H$ ;  $M_{\bar{\sigma}} = M_H$ . Тогда в относительных единицах частота идеального холостого хода, номинальные ток, момент, частота вращения будут иметь следующие значения:

$$\omega_0^{\circ} = \frac{\omega_0}{\omega_{\bar{\sigma}}} = \frac{\omega_0}{\omega_0}, \quad (3.7)$$

$$I_H^{\circ} = \frac{I_H}{I_{\bar{\sigma}}} = \frac{I_H}{I_H}, \quad (3.8)$$

$$M_H^{\circ} = \frac{M_H}{M_{\bar{\sigma}}} = \frac{M_H}{M_H}, \quad (3.9)$$

$$\omega_H^{\circ} = \frac{\omega_H}{\omega_{\bar{\sigma}}} = \frac{\omega_H}{\omega_0}, \quad (3.10)$$

$$\omega_0^{\circ} = 1;$$

$$I_H^{\circ} = 1;$$

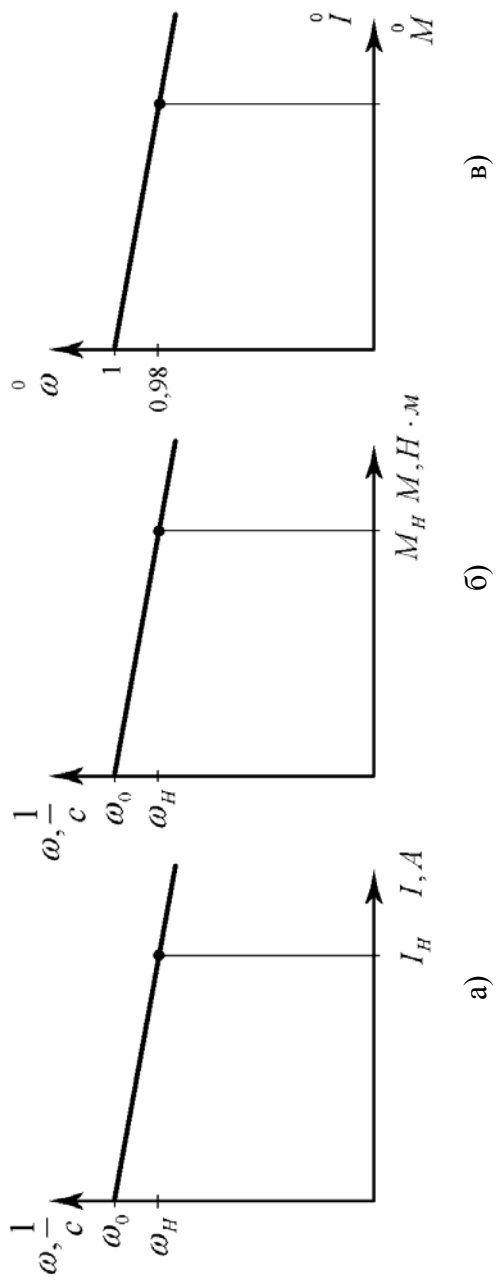


Рис. 3.1. Естественные характеристики электродвигателя:  
 а) ЕЭМХ; б) ЕМХ;  
 в) ЕМХ и ЕЭМХ в относительных единицах



$$\overset{o}{M}_H = 1;$$

$$\overset{o}{\omega}_H = \frac{50,27}{51,27} = 0,98.$$

Как известно, МХ и ЭМХ (естественные характеристики) в относительных единицах совпадают. Такие характеристики в относительных единицах показаны на рис. 3.1, в).

Статическую жесткость МХ определим по формуле

$$\beta = \frac{(C_e)^2}{R_{я\Sigma} t_{дон}}, \quad (3.11)$$

где коэффициент  $C_e$  определяется следующим образом:

$$C_e = \frac{M_H}{I_H}, \quad (3.12)$$

так как

$$M_H = C_e \cdot I_H, \quad (3.13)$$

$$C_e = \frac{2984}{370} = 8,065 \left( \frac{H \cdot м}{A} \right),$$

имеем:

$$\beta = \frac{(8,065)^2}{2,319 \cdot 10^{-2}} = 2805 \left( \frac{H^2 \cdot м^2}{A \cdot V} \right) = 2805 \text{ } H \cdot м \cdot с.$$

### 3.3.2. Искусственные механические и электромеханические характеристики

3.3.2.1. В цепь якоря вводится сопротивление  $R_\partial$ . Сохраняемый статический момент на валу двигателя, рассчитанный в первой контрольной работе, равен  $M_C = 5,8 \cdot 10^3 \text{ } H \cdot м$ . Заданная угловая скорость двигателя составляет

$$\omega = 0,5 \cdot \omega_H, \quad (3.14)$$

$$\omega = 0,5 \cdot 50,27 = 25,14 \frac{1}{C}.$$

Определим ток двигателя при данном статическом моменте  $M_C$ :

$$I_C = \frac{M_C}{C_e}, \quad (3.15)$$

$$I_C = \frac{5,8 \cdot 10^3}{8,065} = 719,2 \text{ A}.$$

Определим данные, необходимые для построения этих характеристик в относительных единицах:

$$0,5 \omega_H^o = \frac{0,5 \omega_H}{\omega_6}, \quad (3.16)$$

$$M_C^o = \frac{M_C}{M_6}, \quad (3.17)$$

$$I_C^o = \frac{I_C}{I_6}, \quad (3.18)$$

$$0,5 \omega_H^o = \frac{25,14}{51,27} = 0,49;$$

$$M_C^o = \frac{5,8 \cdot 10^3}{2984} = 1,94;$$

$$I_C^o = \frac{719,2}{370} = 1,94.$$

Искусственные характеристики показаны на рис. 3.2.

Величину добавочного сопротивления  $R_0$  определим из соотношения (3.1), которое принимает вид

$$\omega = \frac{U_H}{C_e} - I_C \cdot \frac{(R_{Я\Sigma t} + R_0)}{C_e}, \quad (3.19)$$

т. е.

$$I_C \cdot (R_{\Sigma} + R_{\partial}) = U_H - C_e \cdot \frac{\omega_H}{2}, \quad (3.20)$$

тогда

$$R_{\partial} = \frac{1}{I_C} (U_H - C_e \cdot \frac{\omega_H}{2} - I_C \cdot R_{\Sigma}), \quad (3.21)$$

$$R_{\partial} = \frac{1}{719,2} (440 - 8,065 \cdot \frac{50,27}{2} - 719,2 \cdot 2,319 \cdot 10^{-2}) = 0,307 \text{ Ом.}$$

Определим статическую жесткость МХ по формуле

$$\beta_u = \frac{C_e^2}{R_{\Sigma} + R_{\partial}}, \quad (3.22)$$

$$\beta_u = \frac{8,065^2}{0,307 + 2,319 \cdot 10^{-2}} = 197,0 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

3.3.2.2. Рассмотрим, как выглядят искусственные МХ и ЭМХ, если изменяется напряжение питания, причем при статическом моменте на валу двигателя, равном  $M_C$ , угловая скорость двигателя составляет  $0,5 \cdot \omega_H = 25,14 \frac{1}{\text{с}}$ .

Соотношение (1) принимает вид:

$$\frac{\omega_H}{2} = \frac{U}{C_e} - I_C \cdot \frac{R_{\Sigma}}{C_e}, \quad (3.23)$$

тогда имеем

$$U = C_e \cdot \frac{\omega_H}{2} + I_C \cdot R_{\Sigma}, \quad (3.24)$$

$$U = \frac{8,065 \cdot 50,27}{2} + 719,2 \cdot 2,319 \cdot 10^{-2} = 219,4 \text{ В.}$$

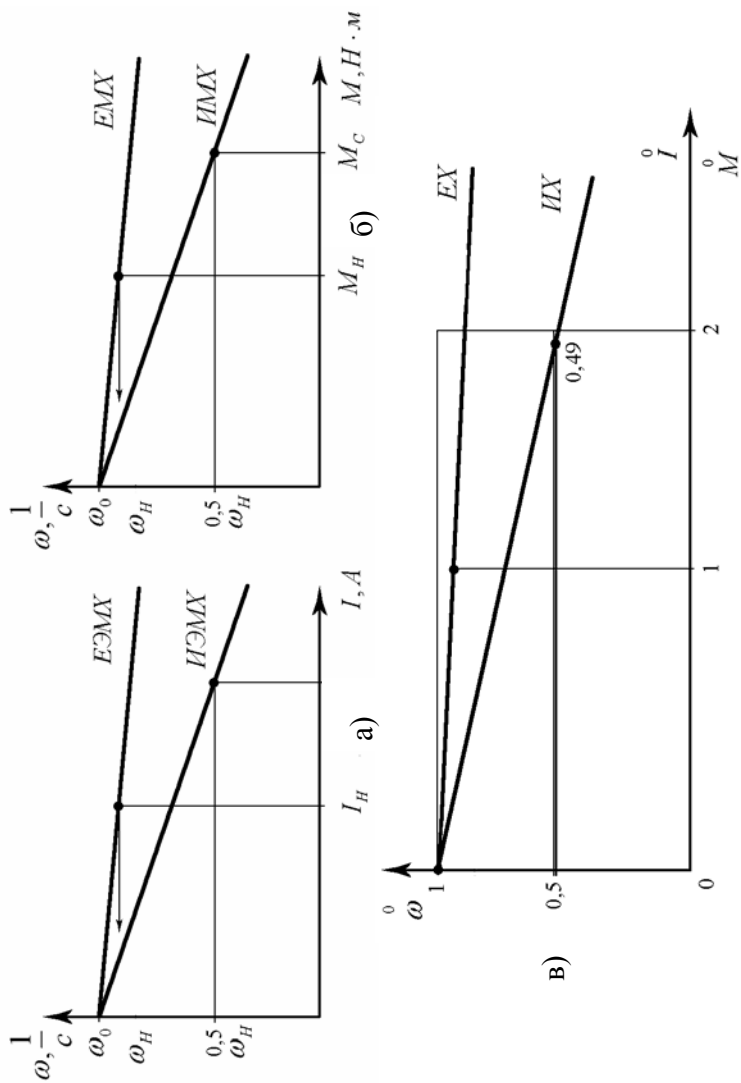


Рис. 3.2. Искусственные характеристики при добавочном сопротивлении:  
 а) искусственная ЭМХ; б) искусственная МХ  
 в) искусственные МХ и ЭМХ в относительных единицах

Заметим, что можно воспользоваться соотношением (3.2), тогда питающее напряжение будет равно

$$U = \frac{1}{C_e} \cdot \left[ C_e^2 \cdot \frac{\omega_H}{2} + M_C \cdot R_{\Sigma t} \right], \quad (3.25)$$

$$U = \frac{1}{8,065} \cdot \left[ (8,065)^2 \cdot \frac{50,27}{2} + 5,8 \cdot 10^3 \cdot 2,319 \cdot 10^{-2} \right] = 219,4 \text{ В.}$$

Получим новую точку характеристики при

$$M_C = 0 : \omega'_o = \frac{U}{C_e} = \frac{219,4}{8,065} = 27,20 \frac{1}{C}.$$

В относительных единицах:  $\omega'_o = \frac{27,20}{51,27} = 0,53$ ; остальные данные для построения характеристик известны.

Полученные характеристики показаны на рис. 3.3.

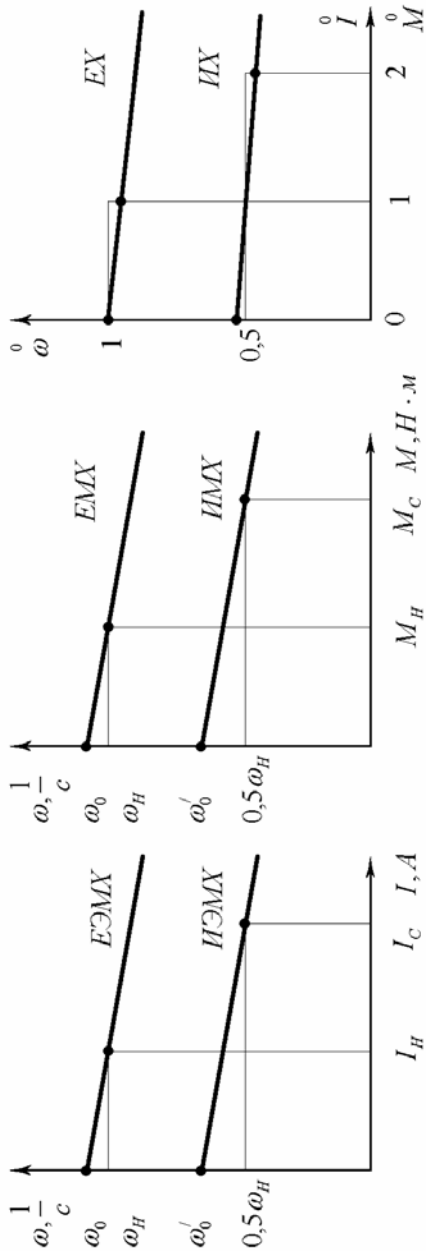
3.3.2.3. Рассмотрим, как выглядят искусственные МХ и ЭМХ при ослабленном магнитном потоке, причем при  $n = n_{\max}$ ,  $\omega = \omega_{\max} = 167,6 \frac{1}{C}$  необходимо сохранить мощность  $P = P_H = 150 \text{ кВт}$ . Также при статическом моменте на валу двигателя, равном  $M_C$ , необходимо определить скорость и ток в двигателе.

Воспользуемся уравнением (2.1), записанным для относительных величин

$$\omega = \frac{\overset{o}{U}}{\overset{o}{\Phi}} - I \cdot \frac{\overset{o}{R_{\Sigma}}}{\overset{o}{\Phi}}, \quad (3.26)$$

откуда выразим магнитный поток

$$\overset{o}{\Phi} = \frac{1}{\omega} \cdot \left[ \overset{o}{U} - I \cdot \overset{o}{R_{\Sigma}} \right]. \quad (3.27)$$



в)

б)

а)

Рис. 3.3. Искусственные характеристики при изменении напряжения:  
 а) ИЭМХ; б) ИМХ; в) характеристики в относительных единицах

За базовые единицы примем номинальные значения напряжения, тока и магнитного потока:

$$U_{\delta} = U_H, \quad (3.28)$$

$$I_{\delta} = I_H, \quad (3.29)$$

$$\Phi_{\delta} = \Phi_H, \quad (3.30)$$

тогда базовое значение сопротивления определим по следующей формуле

$$R_{\delta} = R_H = \frac{U_H}{I_H}, \quad (3.31)$$

$$R_{\delta} = R_H = \frac{440}{370} = 1,19 \text{ Ом}.$$

Переведем в относительные единицы сопротивление  $R_{Я\Sigma}$

$$\overset{\circ}{R}_{Я\Sigma} = \frac{R_{Я\Sigma}}{R_{\delta}}, \quad (3.32)$$

$$\overset{\circ}{R}_{Я\Sigma} = \frac{2,319 \cdot 10^{-2}}{1,19} = 1,95 \cdot 10^{-2}.$$

Переведем в относительные единицы мощность

$$\overset{\circ}{P} = \frac{P}{P_H} = \frac{U \cdot I}{U_H \cdot I_H} = \overset{\circ}{U} \cdot \overset{\circ}{I}, \quad (3.33)$$

$$\overset{\circ}{P} = 1.$$

Определим величину угловой частоты вращения в относительных единицах

$$\overset{\circ}{\omega} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_0}, \quad (3.34)$$

$$\overset{\circ}{\omega} = \frac{167,6}{51,27} = 3,27.$$

Магнитный поток в относительных единицах определим

при достижении максимальной скорости в номинальном режиме:

$$\overset{o}{\Phi} = \frac{1}{\omega_{max}} \cdot \left[ U_H^o - I_H^o \cdot R_{я\Sigma}^o \right], \quad (3.35)$$

$$\overset{o}{\Phi} = \frac{1}{3,27} \cdot \left[ 1 - 1 \cdot 1,95 \cdot 10^{-2} \right] = 0,3.$$

Так же, руководствуясь теоретическими сведениями, приведенными в [6, с. 120], определим значения тока и момента короткого замыкания в относительных единицах

$$I_{K3}^o = \frac{U_H^o}{R_{я\Sigma}}, \quad (3.36)$$

$$M_{K3}^o = I_{K3}^o \cdot \overset{o}{\Phi}, \quad (3.37)$$

$$I_{K3}^o = \frac{1}{1,95 \cdot 10^{-2}} = 51,3,$$

$$M_{K3}^o = 51,3 \cdot 0,3 = 15,4.$$

Определим скорость идеального хода в относительных единицах:

$$\omega_0^o = \frac{U}{\overset{o}{\Phi}}, \quad (3.38)$$

$$\omega_0^o = \frac{1}{0,3} = 3,33.$$

Определим ток и скорость двигателя в относительных единицах при  $M_c^o = 1,94$ :



$$\omega_c = \frac{U_H}{\Phi} - M_c \cdot \frac{R_{Я\Sigma}}{(\Phi)^2}, \quad (3.39)$$

$$I_c = \frac{\Phi}{R_{Я\Sigma}} \cdot \left[ \frac{U_H}{\Phi} - \omega_c \right], \quad (3.40)$$

$$\omega_c = \frac{1}{0,3} - \frac{1,94 \cdot 1,95 \cdot 10^{-2}}{(0,3)^2} = 2,91,$$

$$I_c = \frac{0,3}{1,95 \cdot 10^{-2}} \cdot \left[ \frac{1}{0,3} - 2,91 \right] = 6,51.$$

Переведем в абсолютные единицы следующие величины:

$$I_C = I_C' \cdot I_H, \quad (3.41)$$

$$\omega_C = \omega_C' \cdot \omega_o, \quad (3.42)$$

$$\omega_o' = \omega_o' \cdot \frac{1}{\Phi} = \omega_o' \cdot \omega_o, \quad (3.43)$$

$$I_{K3} = I_{K3}' \cdot I_H, \quad (3.44)$$

$$M_{K3} = M_{K3}' \cdot M_H, \quad (3.45)$$

$$I_C = 6,51 \cdot 370 = 2410 \text{ A},$$

$$\omega_C = 2,91 \cdot 51,27 = 149,2 \frac{1}{c},$$

$$\omega_o' = 51,27 \cdot \frac{1}{0,3} = 3,33 \cdot 51,27 = 170,9 \frac{1}{c},$$

$$I_{K3} = 51,3 \cdot 370 = 18980 \text{ А},$$

$$M_{K3} = 15,4 \cdot 2984 = 45950 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученные характеристики показаны на рис. 3.4.

3.3.2.4. Переводим двигатель при статическом моменте на валу двигателя, равном  $M_C$ , в режим торможения противовключением, при этом необходимо определить добавочное сопротивление  $R_\partial$ , включенное в цепь якоря, из условий допустимого ускорения механизма и коммуникационной способности двигателя.

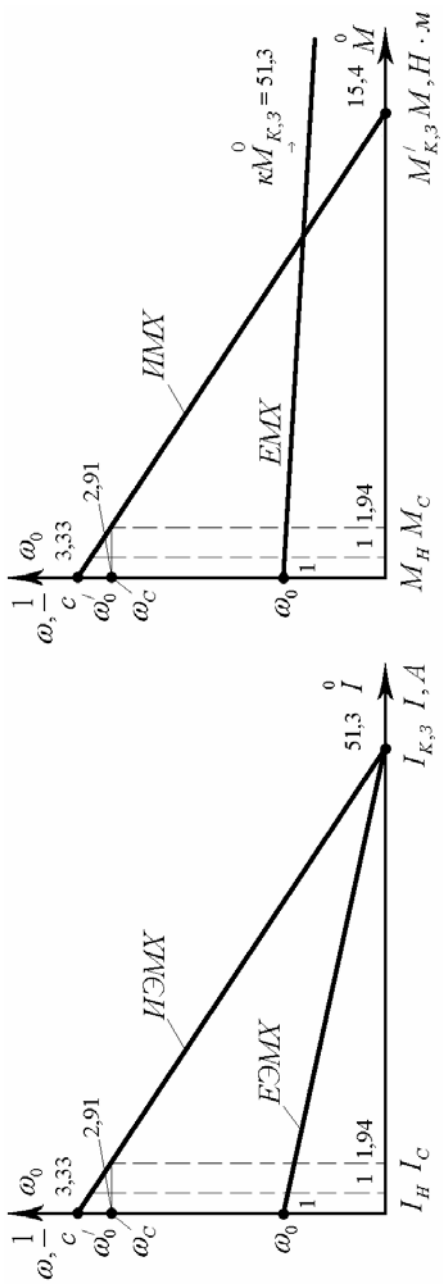
Собственно, в режиме торможения противовключением путем включения в цепь якоря  $R_\partial$  нет необходимости ограничивать ток якоря, потому что, как будет видно из характеристики, его величина будет меньше, чем  $I_C$ . Весь расчет практически не отличается от пункта 2.3.1.

Установившимся режимом работы считаем режим, в котором угловая скорость на валу двигателя становится отрицательной и равной  $\omega_c$ , а ток и момент при этом соответственно равны  $I = I_C$ ,  $M = M_C$ . Исходя из этого,  $R_\partial$  рассчитываем по формуле

$$R_\partial = \frac{1}{I_C} \cdot \left[ U_H + \omega_c \cdot C_E - I_C \cdot \overset{o}{R}_{Я\Sigma} \right], \quad (3.46)$$

где

$$\omega_c = \omega_O - \Delta\omega_{O,C} = \omega_O - I_C \cdot \frac{R_{Я\Sigma}^o}{C_E}, \quad (3.47)$$



а)

б)

Рис. 3.4. Искусственные характеристики при ослаблении магнитного поля:  
а) ЭМХ; б) МХ;

$$\overset{o}{\omega}_C = \frac{\omega_C}{\omega_o}, \quad (3.48)$$

$$\omega_C = 51,27 - 719,2 \cdot \frac{2,319 \cdot 10^{-2}}{8,065} = 49,20 \frac{1}{c},$$

$$\overset{o}{\omega}_C = \frac{49,2}{51,27} = 0,96,$$

тогда

$$R_{\partial} = \frac{1}{719,2} \cdot \left[ 440 + 8,065 \cdot 49,20 - 719,2 \cdot 2,319 \cdot 10^{-2} \right] = 1,14 \text{ Ом}.$$

Характеристики режима торможения противовключением показаны на рис. 3.5.

3.3.2.5. Переводим двигатель при статическом моменте на валу двигателя, равном  $M_C$ , в режим торможения противовключением путем изменения полярности  $U_{я}$ , при этом необходимо определить добавочное сопротивление  $R_{\partial}$ , включенное в цепь якоря, из условий допустимого ускорения механизма и коммуникационной способности двигателя.

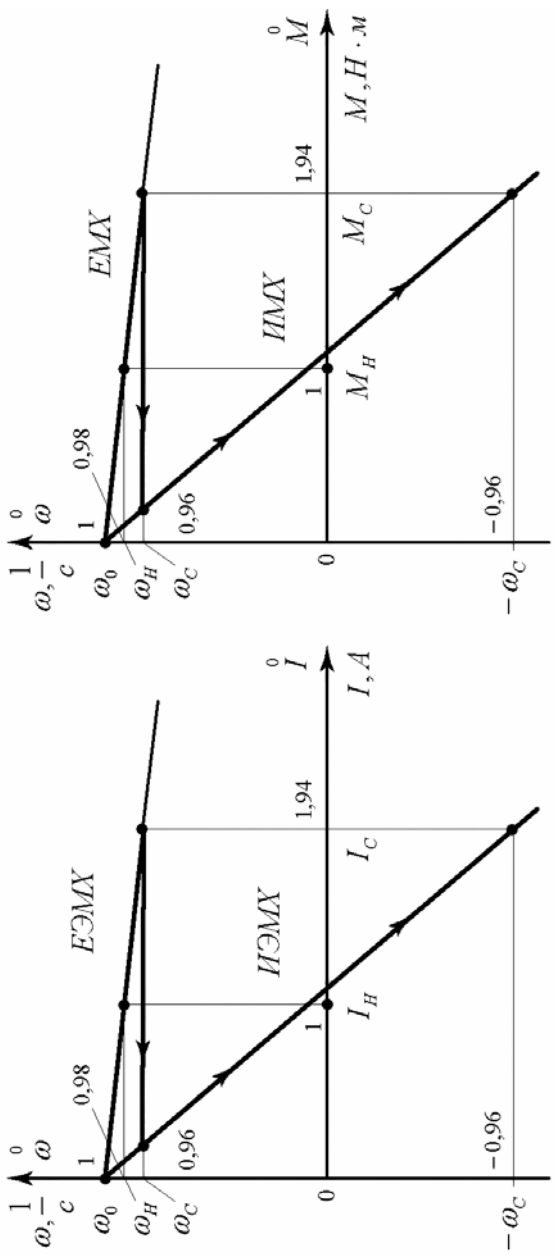
Определим ток в якорной цепи в этом режиме в абсолютных и относительных единицах:

$$I_{я,m} = \frac{-U_H - E}{R_{я\Sigma t}}, \quad (3.49)$$

$$\overset{o}{I}_{я,m} = \frac{I_{я,m}}{I_{\partial}} = \frac{I_{я,m}}{I_H}, \quad (3.50)$$

$$I_{я,m} = \frac{-440 - 422}{2,319 \cdot 10^{-2}} = -37171 \text{ А},$$

$$\overset{o}{I}_{я,m} = \frac{37171}{370} = 100,46.$$



а)

б)

Рис. 3.5. Характеристики при в режиме торможения противключением при включении в цепь якоря добавочного сопротивления:  
 а) ЭМХ; б) МХ

Очевидно, что полученная величина  $I_{я,m}$  значительно превосходит допустимое значение тока  $I_{\text{доп}} = 1000 \text{ А}$ . Поэтому необходимо включить в цепь обмотки якоря добавочное сопротивление  $R_{\text{д}}$ . Выполним расчет этого сопротивления из условия допустимой коммутации  $I_{\text{max}} = I_{\text{доп}} = 1000 \text{ А}$ :

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{H}}}, \quad (3.51)$$

$$I_{\text{доп}} = \frac{1000}{370} = 2,7.$$

Из равенства моментов и токов в относительных единицах следует, что  $\overset{\circ}{I}_{\text{доп}} = \overset{\circ}{M}_{\text{доп}}$ , т. е.  $\overset{\circ}{M}_{\text{доп}} = 2,7$ , тогда

$$\overset{\circ}{M}_{\text{дин}} = \overset{\circ}{M}_{\text{доп}} + \overset{\circ}{M}_{\text{С}}, \quad (3.52)$$

$$\overset{\circ}{M}_{\text{дин}} = 2,7 + 1,94 = 4,64.$$

В абсолютных единицах имеем

$$M_{\text{дин}} = \overset{\circ}{M}_{\text{дин}} \cdot M_{\text{б}} = \overset{\circ}{M}_{\text{дин}} \cdot M_{\text{H}}, \quad (3.53)$$

$$M_{\text{дин}} = 3 \cdot 10^3 \cdot 4,64 = 13920 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{дин.доп}} = 8741 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{дин}} \gg M_{\text{дин.доп}}.$$

Определим допустимое ускорение:

$$\varepsilon_p = \frac{M_{\text{дин}}}{J_{\Sigma}}, \quad (3.54)$$

$$\varepsilon_p = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 4,64}{87,41} = 159,2 \frac{1}{c^2},$$

$$\varepsilon_{\text{доп}} = 100 \frac{1}{c^2},$$

$$\varepsilon_p > \varepsilon_{\text{дон}},$$

что недопустимо для данного механизма.

Таким образом, расчет добавочного сопротивления из условия допустимой коммунікации не проходит.

Поэтому определим значение  $R_{\text{д}}$  из условия допустимого ускорения.

Из условия допустимого ускорения имеем:

$$M_{\text{дин}} = M_C + M = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad (3.55)$$

где  $M, H \cdot m$  – момент двигателя при  $I_{\text{дон.м.}}$ ;

$J_{\Sigma}, кг \cdot м^2$  – суммарный момент инерции механизма (из предыдущего расчета  $J_{\Sigma} = 87,41 кг \cdot м^2$ ), имеем:

$$M = M_C - J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = M_{\text{дон.м.}}, \quad (3.56)$$

$$M = M_{\text{дон.м.}} = 87,41 \cdot 100 - 5,8 \cdot 10^3 = 2941 H \cdot m.$$

Переведем полученную величину момента в относительные единицы:

$$M_{\text{дон.м.}}^{\circ} = \frac{M_{\text{дон.м.}}}{M_H}, \quad (3.57)$$

$$M_{\text{дон.м.}}^{\circ} = \frac{2941}{2984} = 0,99$$

Из равенства моментов и токов в относительных единицах следует, что

$$M_{\text{дон.м.}}^{\circ} = I_{\text{дон.м.}}^{\circ}, \quad (3.58)$$

$$I_{\text{дон.м.}}^{\circ} = 0,99.$$

Переведем полученную величину тока в абсолютные единицы:

$$I_{\text{дон.м.}} = I_{\text{дон.м.}}^{\circ} \cdot I_{\text{б}} = I_{\text{дон.м.}}^{\circ} \cdot I_H, \quad (3.59)$$

$$I_{\partial on.m.} = 0,99 \cdot 370 = 364,7 \text{ A}.$$

Запишем уравнение равновесия напряжения в данном режиме с учетом  $R_{\partial}$ :

$$R_{\Sigma t} \cdot (-I_{\partial on.m.}) + R_{\partial} \cdot (-I_{\partial on.m.}) = -(U_H + E), \quad (3.60)$$

тогда имеем:

$$R_{\partial} = \frac{1}{-I_{\partial on.m.}} \cdot \left[ -(U_H + E) - I_{\partial on.m.} \cdot R_{\Sigma t} \right], \quad (3.61)$$

$$R_{\partial} = \frac{1}{-364,7} \cdot \left[ -(440 + 422) - (-364,7) \cdot 2,319 \cdot 10^{-2} \right] = 2,34 \text{ Ом}.$$

Определим статическую жесткость МХ по формуле:

$$\beta_U = \frac{C_E^2}{R_{\Sigma}}, \quad (3.62)$$

$$\beta_U = \frac{(8,065)^2}{2,34 + 2,3 \cdot 10^{-2}} = 20,53 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Характеристики при торможении противовключением при изменении полярности напряжения якоря показаны на рис. 3.6.

3.3.2.5. Далее необходимо рассмотреть, как реализуется режим динамического торможения. Для этого определим  $R_{\partial}$

из условий допустимого ускорения механизма  $\varepsilon_{\partial on} = 100 \frac{1}{c^2}$  и

коммуникационной способности двигателя  $I_{\partial on} = 1000 \text{ A}$ .

Этот режим используют в аварийных ситуациях, он реализуется отключением двигателя от источника питания и замыканием обмотки якоря на добавочное сопротивление  $R_{\partial}$ , т.к. при простом замыкании якоря в цепи течет ток очень большой кратности по отношению к номинальному ( $I_{K3} \approx 9 \cdot I_H$ ).



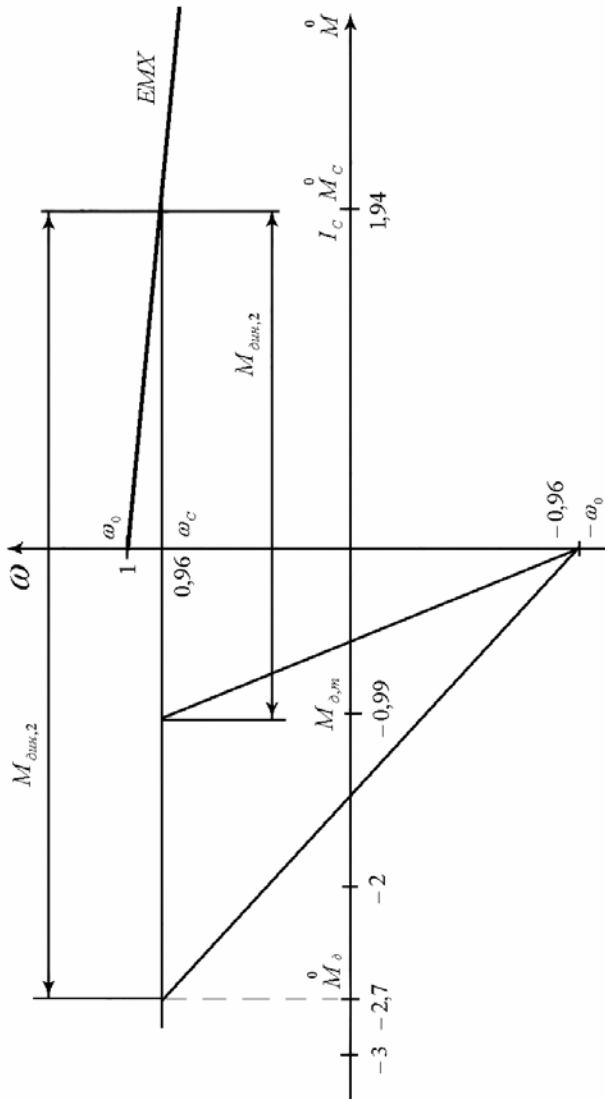


Рис. 3.6. Механические характеристики в режиме торможения противовключением при изменении полярности напряжения

Определим сначала перегрузочную способность двигателя, считая, что он работает при номинальном токе:

$$\lambda = I_{\text{дон}}/I_H, \quad (3.63)$$

$$\lambda = 1000/370 = 2,7.$$

Затем определим перегрузочную способность двигателя при  $I_C$ :

$$\lambda_C = I_{\text{дон}}/I_C, \quad (3.64)$$

$$\lambda_C = 1000/719,2 = 1,39,$$

Определим величину  $R_\partial$  в относительных единицах при  $I_C$ :

$$R_\partial = \frac{E_a^o}{\lambda_C} - R_{\text{я}\Sigma t}, \quad (3.65)$$

$$R_\partial = \frac{1}{1,39} - 1,95 \cdot 10^{-2} = 0,7.$$

Выразим полученную величину  $R_\partial$  в абсолютных единицах:

$$R_\partial = R_\partial^o \cdot R_\partial^o, \quad (3.66)$$

$$R_\partial = 0,7 \cdot 1,19 = 0,83 \text{ Ом.}$$

Определим значение ЭДС якоря:

$$E_a = \omega_C \cdot U_H = E_a^o \cdot U_H \quad (3.67)$$

$$E_a = 0,96 \cdot 440 = 422 \text{ В.}$$

Далее определим  $R_\partial$ :

$$R_\partial = \frac{E_a}{I_{\text{дон.н.}}} - R_{\text{я}\Sigma t}, \quad (3.68)$$

$$R_\partial = \frac{422}{364,7} - 2,319 \cdot 10^{-2} = 1,134 \text{ Ом.}$$

Очевидно, что величину  $R_{\partial}$  будет определять именно условие допустимого ускорения. Характеристики при динамическом торможении показаны на рис. 3.7.

### 3.3.3. Динамические механические характеристики

Проведем исследование динамических свойств электродвигателя. Уравнение динамических ЭМХ и МХ имеет вид

$$\omega = \omega_o - \frac{i_{я} \cdot R_{я \Sigma t}}{C_e} \cdot (T_a p + 1), \quad (3.69)$$

$$\omega = \omega_o - M \cdot \frac{1}{\beta} \cdot (T_a p + 1), \quad (3.70)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор,

$T_{я}$ , с – электромагнитная постоянная времени цепи якоря, которая определяется по формуле:

$$T_{я} = \frac{L_a}{R_{я \Sigma t}}, \quad (3.71)$$

где  $L_{я}$  – индуктивность якоря, определяемая по формуле [6, с. 130]

$$L_a = \frac{\gamma \cdot U_H}{p_{\Pi} \cdot \omega_H \cdot I_H}, \quad (3.72)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, равный 0,6 для некомпенсированных двигателей, и 0,25 – для компенсированных;

$p_{\Pi}$  – число полюсов.

Считая наш двигатель компенсированным и, зная, что обычно у таких двигателей  $2p_{\Pi} = 2a$ ,  $p_{\Pi} = 4$ , имеем

$$L_a \approx \frac{0,25 \cdot 400}{4 \cdot 50,27 \cdot 370} = 1,479 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

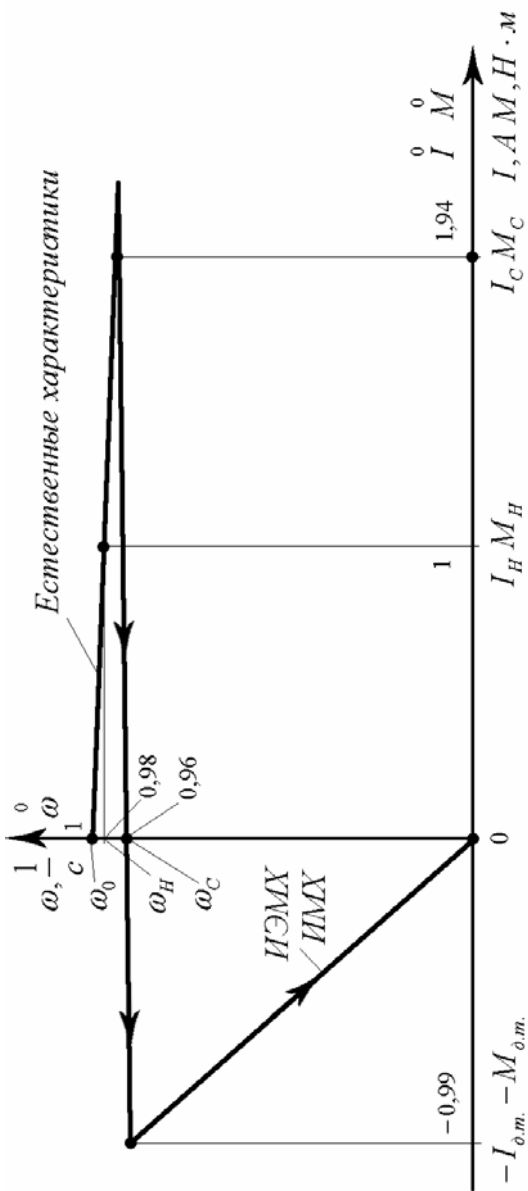


Рис. 3.7. Характеристики в режиме динамического торможения

Следовательно, постоянная времени

$$T_a = \frac{1,479 \cdot 10^{-3}}{2,319 \cdot 10^{-2}} = 0,064 \text{ с.}$$

По заданию мы должны исследовать динамические свойства электродвигателя при частоте вынуждающего воздействия  $\Omega$ , равного  $\Omega_{conp}$  (сопряжение), т. е.

$$\Omega_{conp} = 1/T_a, \quad (3.73)$$

$$\Omega_{conp} = 15,69 \frac{1}{\text{с}},$$

и при  $\Omega_2 = 2\Omega_{conp}$  имеем, что

$$\Omega_2 = 2 \cdot 15,69 = 31,37 \frac{1}{\text{с}}.$$

По [6, с. 131], при изменении по следующему закону

$$M_c = M_{c,ep} + \Delta M_{max} \cdot \sin \Omega t, \quad (3.74)$$

закон изменения скорости примет следующий вид:

$$\omega_e = \omega_{ep,c} - \frac{\Delta M_{max}}{\beta} \cdot \sqrt{1 + T_a^2 \cdot \Omega^2} \cdot \sin(\Omega t + \Psi), \quad (3.75)$$

где

$$\Psi = \text{arctg}(\Omega \cdot T_a), \quad (3.76)$$

т. е. имеем:

$$\Psi = \text{arctg}(\Omega_{conp} \cdot T_a), \quad (3.77)$$

$$\Psi = \text{arctg}(2 \cdot \Omega_{conp} \cdot T_a), \quad (3.78)$$

$$\Psi = \text{arctg} 1 = 45^\circ,$$

$$\Psi = \text{arctg} 2 = 63,43^\circ.$$

Динамическая механическая характеристика и подобная ей динамическая электромеханическая характеристика двигателя в режиме установившихся колебаний имеет форму эллипса.

Пусть  $\Delta M_{\max} = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; что составляет 20 % от  $M_H$ , тогда

$$\Delta \omega_{e, \max, 1} = \frac{\Delta M_{\max}}{\beta} \cdot \sqrt{1 + T_{я}^2 \cdot \Omega^2}, \quad (3.79)$$

$$\Delta \omega_{e, \max, 2} = \frac{\Delta M_{\max}}{\beta} \cdot \sqrt{1 + T_{я}^2 \cdot (2\Omega)^2}, \quad (3.80)$$

$$\Delta \omega_{e, \max, 1} = \frac{1000}{2805} \sqrt{1 + (0,064 \cdot 15,69)^2} = 0,51 \frac{1}{с},$$

$$\Delta \omega_{e, \max, 2} = \frac{1000}{2805} \sqrt{1 + (0,064 \cdot 31,37)^2} = 0,8 \frac{1}{с}.$$

Динамические механические характеристики показаны на рис. 3.8.

### 3.3.4. АЧХ для динамической жесткости

Анализ динамических свойств двигателя проводят с помощью частотного метода. Передаточная функция динамической жесткости механической характеристики [6, с. 131]:

$$\beta_{\text{дин}}(P) = \frac{-\beta}{(1 + T_{aP})}. \quad (3.81)$$

Заменяя  $P \rightarrow j\Omega$ , имеем

$$\beta_{\text{дин}}(j\Omega) = \beta \cdot \frac{-1 + jT_a \cdot \Omega}{1 + T_a^2 \cdot \Omega^2}. \quad (3.82)$$

Соответственно, АЧХ определяется по формуле

$$|\beta_{\text{дин}}| = \frac{\beta}{\sqrt{1 + T_a^2 \cdot \Omega^2}}. \quad (3.83)$$

На рис. 3.9 показана АЧХ для данной системы, построенная для удобства в относительных единицах: по оси абсцисс отложена величина  $\beta_{\text{дин}}(j\Omega)/\beta$ , а по оси ординат –  $\Omega/\Omega_{\text{сопр}}$ .

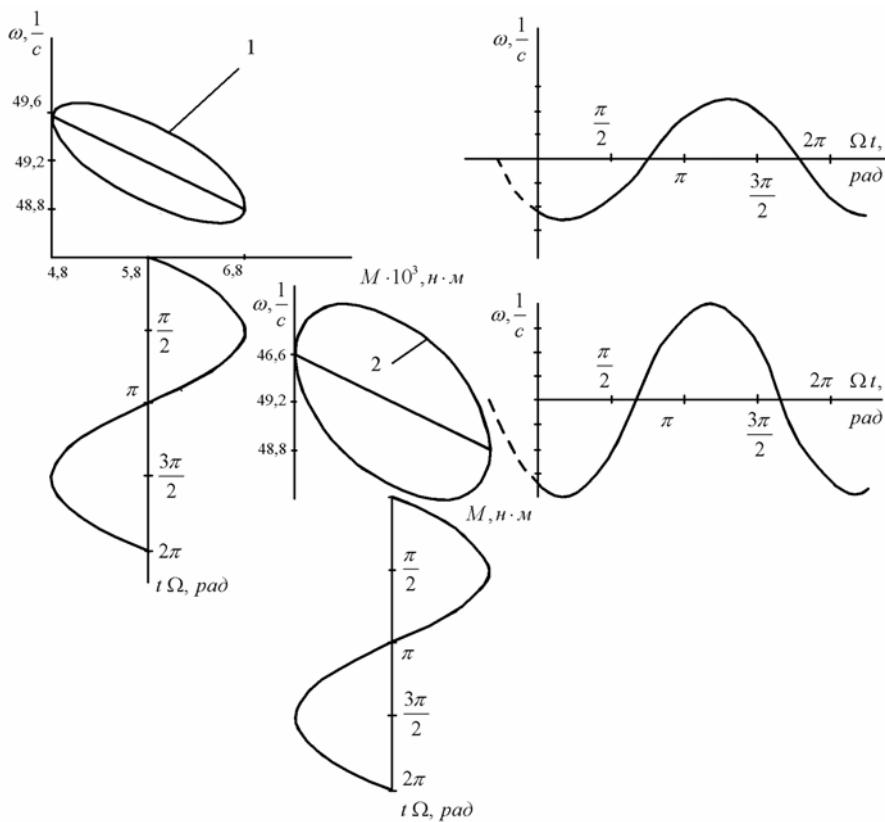


Рис. 3.8. Динамические механические характеристики:  
 кривая 1 –  $\Omega = \Omega_{\text{сопр}}$ ,  
 кривая 2 –  $\Omega = 2 \cdot \Omega_{\text{сопр}}$

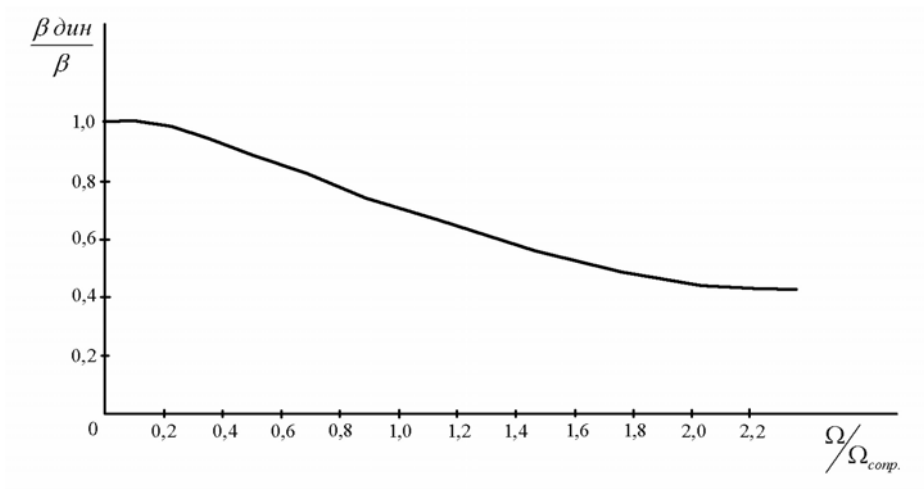


Рис. 3.9. АЧХ для динамической жесткости



## 4. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

### 4.1. Данные асинхронного двигателя

При выборе двигателя переменного тока из базы данных руководствуемся рекомендациями, приведенными в разделе 1. Выбираем двигатель МТН200LB8, некоторые технические параметры которого приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Наименование параметра	Значение параметра
номинальная мощность	$P_H = 22,0 \text{ кВт}$
коэффициент мощности	$\cos \varphi = 0,70$
активное сопротивление фазы обмотки статора при 20 °С	$R_1 = 0,14 \text{ Ом}$
индуктивное сопротивление обмотки статора	$x_1 = 0,31 \text{ Ом}$
приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора	$x_2' = 0,47 \text{ Ом}$
приведенное активное сопротивление обмотки ротора	$R_2' = 0,068 \text{ Ом}$
напряжение ротора	$E_{2,0} = 241 \text{ В}$
номинальный ток статора	$I_{1H} = 59 \text{ А}$
максимальный момент	$M_K = M_{MAX} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м}$
масса	$m = 320 \text{ кг}$
число полюсов	$p = 8$
момент инерции ротора двигателя	$J_{\text{ротора}} = 0,74 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
продолжительность включения	$ПВ = 40\%$
номинальная частота вращения	$n_H = 715 \text{ об/мин}$
ток холостого хода	$I_0 = I_\mu = 37,3 \text{ А}$

Описание типоразмера двигателя 4МТН200LB8:

4 – порядковый номер серии (серия 4А);

МТ – краново-металлургический АД;

Н – исполнение по степени защиты IP23 (защита от попадания твердых частиц диаметром более 12 мм) и брызгозащищенный при угле разбрызгивания не более  $60^\circ$  к вершинам);

200 – высота оси вращения;

L – условная длина станины;

B – условная длина сердечника статора;

8 – число полюсов.

## 4.2. Задание

Для данного электродвигателя построить следующие характеристики:

1. Естественную механическую характеристику (EMX).

2. Естественную электромеханическую характеристику (ЕЭМХ).

3. Реостатную характеристику при значении добавочного сопротивления в цепи ротора  $\overset{o}{R}_{2\partial} = 0,45$ .

4. Искусственную механическую характеристику (ИМХ) при понижении фазного напряжения обмотки статора до величины  $\overset{o}{U}_{1\phi} = 0,95$ .

5. Для рабочего участка МХ определить модуль статической жесткости и постоянную времени при  $J_{пр, мех} = 70,82 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  (момент инерции механизма, приведенный к ротору двигателя).

6. Для того же асинхронного двигателя с фазным ротором рассчитать ИМХ:

а) при увеличении частоты питания:  $\overset{o}{f}_1 = 1,7$ ;

б) при уменьшении частоты питания:  $f_1^o = 0,65$  по закону  $\frac{U_1^o}{S_1^o} = const$ ;

в) в режиме торможения противовключением, полагая, что статический момент реактивный и численно равен  $M_C^o = 0,65$ ; здесь же рассчитать величину добавочного резистора противовключения  $R_{ПТ}$  в цепи ротора.

### 4.3. Решение

#### 4.3.1. Естественные механические и электромеханические характеристики

Для построения естественных характеристик найдем следующие необходимые величины.

Определим синхронную скорость двигателя:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_n}{P_{\Pi}}, \quad (4.1)$$

где  $f_n$  – номинальная частота в сети, Гц;

$P_{\Pi}$  – число пар полюсов, так как все полюсов в двигателе (если  $p = 8$ , то  $P_{\Pi} = 4$ ),

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot 50}{4} = 78,75, c^{-1}.$$

Определим критическое скольжение:

$$s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}}, \quad (4.2)$$

где  $x_K$  – индуктивное фазное сопротивление при коротком замыкании, которое определяется по следующей формуле:

$$x_K = x_1 + x_2', \quad (4.3)$$

$$x_K = (0,31 + 0,47) = 0,78 \text{ Ом},$$

тогда

$$S_K = \frac{0,082}{\sqrt{0,17^2 + 0,78^2}} = 0,104 \text{ (10,4 \%)}.$$

Необходимо отметить, что активные сопротивления необходимо привести к рабочей температуре 70 °С, для чего их умножаем на поправочный коэффициент равный 1,22:

$$R_1 = 1,22 \cdot 0,14 = 0,17 \text{ Ом};$$

$$R_2' = 1,22 \cdot 0,068 = 0,082 \text{ Ом}.$$

Найдем номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (4.4)$$

где

$$\omega_H = n_H \cdot \frac{2\pi}{60}, \quad (4.5)$$

$$\omega_H = 715 \cdot 0,105 = 75,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$M_H = \frac{22 \cdot 10^3}{75,08} = 293 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найдем номинальное скольжение:

$$S_H = 1 - \frac{\omega_H}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \quad (4.6)$$

где  $n_1$  – синхронная скорость, об/мин,

$$n_1 = \omega_1 \frac{60}{2\pi} = 9,55\omega_1, \quad (4.7)$$

$$n_1 = 9,55 \cdot 78,75 \text{ с}^{-1} = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

$$S_H = \frac{750 - 715}{750} = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ (4,7 \%)}.$$

Зная критический (максимальный) момент двигателя  $M_K = M_{\max} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , определим его перегрузочную способность:

$$\lambda = \frac{M_K}{M_H} = \frac{M_{\max}}{M_H}, \quad (4.8)$$

$$\lambda = \frac{800}{293} = 2,73.$$

Определим величину пускового момента по формуле, полученной из уточненной формулы Клосса (4.14), при подстановке в нее значения скольжения при пуске двигателя  $S = 1$ . Эта формула, как правило, применяется для двигателей малой мощности

$$M_{\Pi} = \frac{2M_K(1+aS_K)}{1/S_K + S_K + 2aS_K}, \quad (4.9)$$

где  $S_K$  – критическое скольжение, соответствующее величине максимального или критического момента,

$$a = R_1 / R_2', \quad (4.10)$$

тогда

$$a = \frac{0,17}{0,082} = 2,073,$$

$$M_{\Pi} = \frac{2 \cdot 800 \cdot (1 + 2,073 \cdot 0,104)}{1/0,104 + 0,104 + 2 \cdot 2,073 \cdot 0,104} = 191,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Зная величину пускового момента, определим его кратность

$$m_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H}, \quad (4.11)$$

$$m_{\Pi} = \frac{191,6}{293} = 0,65.$$

Номинальное фазное напряжение  $U_{1\Phi H}$  определим из формулы для критического момента:

$$M_K = \frac{3(U_{1\Phi H})^2}{2\omega_1(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2})}, \quad (4.12)$$

тогда

$$U_{1\Phi H} = \sqrt{\frac{M_K \cdot 2\omega_1(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2})}{3}}, \quad (4.13)$$

$$U_{1\Phi H} = \sqrt{\frac{800 \cdot 2 \cdot 78,75(0,17 + \sqrt{0,17^2 + 0,78^2})}{3}} = 200 \text{ В}.$$

Для построения ЕМХ воспользуемся уточненной формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_K(1 + aS_K)}{S/S_K + S_K/S + 2aS_K}, \quad (4.14)$$

т. е. зависимостью  $M = f(S)$  или  $M = f(\omega)$ .

Для построения ЕЭМХ воспользуемся формулой:

$$I_2' = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{(R_1 + R_2'/S)^2 + x_K^2}}, \quad (4.15)$$

т. е. зависимостью  $I_2' = f(S)$  или  $I_2' = f(\omega)$ , где  $I_2'$  – приведенный к обмотке статора ток ротора.

Для построения ЕЭМХ АД проанализируем характерные точки этой зависимости и ее асимптоты, придавая скольжению  $S$  и скорости  $\omega$  различные значения в пределах  $\pm \infty$ :

1.  $S = 0$ ,  $\omega = \omega_0 = \omega_1 = 78,75 \text{ с}^{-1}$ ,  $I_2' = 0 \text{ А}$  – точка идеального холостого хода;

$$2. \quad S = 1, \quad \omega = 0, \quad I_2' = I_{K3} = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + x_K^2}} \quad - \text{ точка}$$

короткого замыкания, имеем:

$$I_2' = I_{K3} = \frac{200}{\sqrt{(0,17 + 0,082)^2 + 0,78^2}} = 243,9 \text{ A}.$$

$$3. \quad S_{KP} = -R_2'/R_1, \quad \omega = \omega_0(1 - S_{KP}), \quad I_2' = I_{2,\max}' = \frac{U_{1\Phi H}}{x_K}$$

— точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных значений, имеем:

$$S_{KP} = \frac{-0,082}{0,17} = -0,488.$$

$$\omega = 78,75(1 + 0,488) = 117,2 \text{ c}^{-1},$$

$$I_2' = I_{2,\max}' = \frac{200}{0,78} = 256,4 \text{ A}.$$

$$4. \quad S = \pm\infty, \quad \omega = \pm\infty, \quad I_2' = I_\infty = I_{2,\text{Lim}}' = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}} \quad -$$

асимптотическое значение тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости, имеем:

$$I_2' = \frac{200}{\sqrt{0,17^2 + 0,78^2}} = 250,5 \text{ A}.$$

Данные для построения ЕМХ и ЕЭМХ приведены в сводной табл. 4.2; графики ЕМХ и ЕЭМХ показаны на рис. 4.1.

Таблица 4.2

Сводная таблица к пунктам 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3

		Е М Х	Е Э М Х	ИМХ при $\sigma$ $R_{2\sigma} = 0,45$ $M_i = const$	ИМХ при $\sigma$ $U_{1\Phi} = 0,95$ $S_i = const$
$S$	$\omega, c^{-1}$	$M, H \cdot m$	$I_2, A$	$S_{II}$	$M_{II}, H \cdot m$
1	2	3	4	5	6
-3	315		252		
-2,2	252		252,8		
-1,8	221		253		
-1,4	189		253,9		
-1	157,5		255		
-0,8	141,8		255,5		
-0,6	126		256,2		
-0,488	117,2		256,4		
-0,4	110		256		
-0,2	94,5		245		
-0,1	86,6		196		
0	78,75	0	0	0	
0,01	78	178	23,5	0,13	
0,02	77,2	334	45,6	0,26	
0,03	76,4	465	65,8	0,39	
0,04	75,6	569	84,2	0,52	
0,047	75,05	600	95,8	0,61	
0,05	74,8	650	100,5	0,65	587
0,06	74,0	710	115,1	0,78	
0,07	73,2	751	128	0,91	
0,08	72,5	778	139		
0,09	71,7	793	149		



1	2	3	4	5	6
0,1	70,88	799,7	161	1,55	721
0,104	70,56	800,0	223		722
0,2	63	677	231		611
0,3	55	531	236		479
0,4	47,3	429	239		387
0,5	39,4	357	241		322
0,6	31,5	305	242		275
0,7	23,6	266	243		240
0,8	15,75	236			213
0,9	7,9	211			190
1	0	192	243,9		173,3
1,5	-39,4				
2	-78,75				

#### 4.3.2. Искусственные механические и электромеханические характеристики

Для построения реостатной искусственной характеристики (ИМХ) используем ЕМХ, зная, что при постоянном статическом моменте скольжение  $S$ , а следовательно, и перепад скорости зависят от сопротивления роторной цепи

$$S_H = S_e \frac{R_2' + R_{2\partial}'}{R_2'} \quad (4.16)$$

где  $S_H$ ,  $S_e$  – соответственно, скольжение на ИМХ и на ЕМХ;

$R_{2\partial}'$  – добавочное сопротивление в цепи ротора, которое равно  $R_{2\partial}' = 0,45$ .

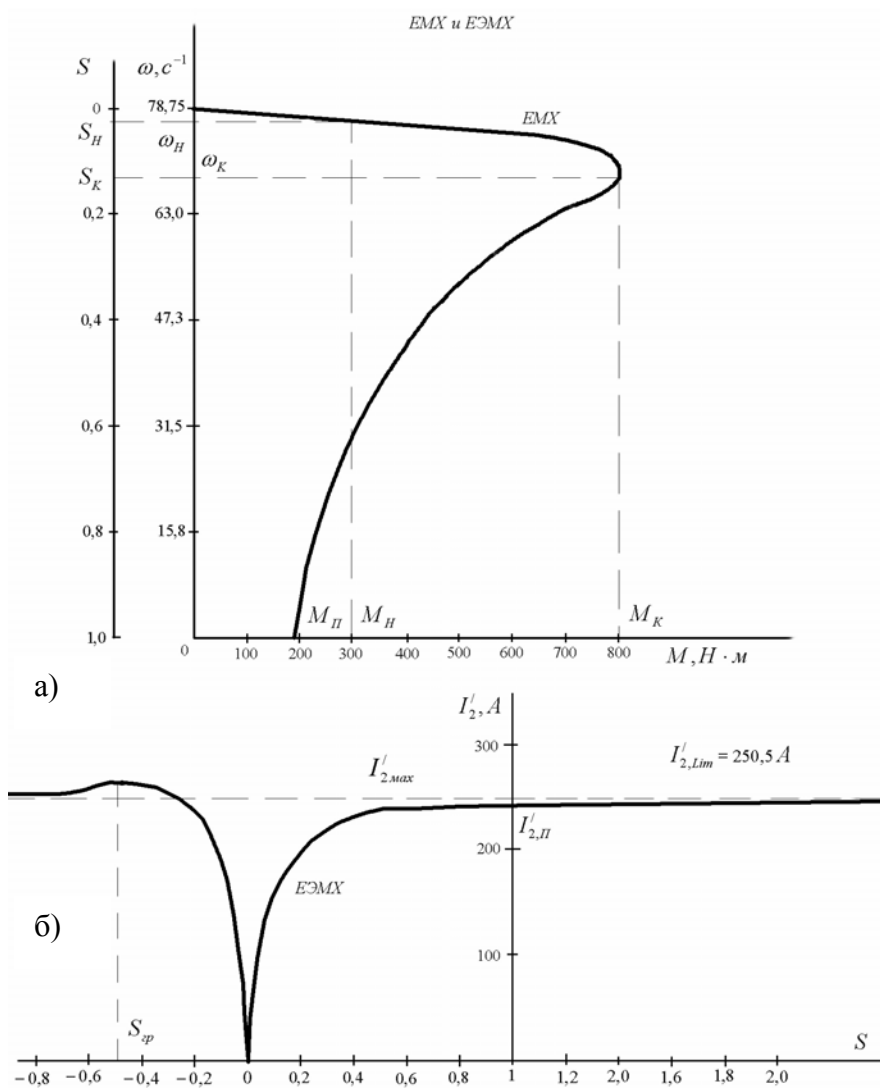


Рис. 4.1. Естественные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором 4МТН200LB8:  
 а) механическая; б) электромеханическая

Сначала определим коэффициент приведения для данного асинхронного двигателя с фазным ротором (АД ФР):

$$K_e = \frac{E_1}{E_{2,0}}, \quad (4.17)$$

где  $E_{2,0}$  – линейное напряжение на заторможенном роторе, которое известно по заданию  $E_{2,0} = 241B$ ;

$E_1, B$  – линейное напряжение на статоре, которое определим следующим образом:

$$E_1 \approx \sqrt{3} \cdot \frac{U_{1\phi}}{0,95}, \quad (4.18)$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{0,95} \approx 400 \text{ В},$$

тогда

$$K_e = \frac{400}{241} = 1,66.$$

Теперь мы можем найти величину базового сопротивления в цепи ротора

$$R_{\sigma} = \frac{E_{2,0}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}, \quad (4.19)$$

где  $I_{2H}$  – номинальный ток ротора, который определяется следующим образом:

$$I_{2H} = I'_{2H} \cdot K_e = K_e \cdot \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + R'_2/S_H)^2 + x_K^2}}, \quad (4.20)$$

$$I_{2H} = 1,66 \cdot \frac{220}{\sqrt{\left(0,17 + \frac{0,082}{4,7 \cdot 10^{-2}}\right)^2 + 0,78^2}} = 175,4 \text{ А},$$

тогда

$$R_{\sigma} = \frac{241}{\sqrt{3} \cdot 175,4} = 0,79,$$

далее переведем значение добавочного сопротивления в роторной цепи в абсолютные единицы, т. е.

$$R_{2\partial} = R_{2\partial}^{\circ} \cdot R_{\sigma}, \quad (4.21)$$

$$R_{2\partial} = 0,79 \cdot 0,45 = 0,357 \text{ Ом}.$$

Определим собственное сопротивление роторной цепи

$$R_2 = R_2^{\circ} / (K_e)^2, \quad (4.22)$$

$$R_2 = \frac{0,082}{1,66^2} = 2,98 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

Далее рассчитаем величину множителя  $\frac{R_2 + R_{2\partial}}{R_2}$ :

$$\frac{R_2 + R_{2\partial}}{R_2} = \frac{2,98 \cdot 10^{-2} + 0,357}{2,48 \cdot 10^{-2}} = 12,97,$$

тогда имеем:

$$S_{Иi} = 12,97 \cdot S_{ei}. \quad (4.23)$$

Рассчитанные таким образом значения  $S_{Иi}$  приведены в сводной табл. 4.2, а реостатная ИМХ показана на рис. 4.2.

ИМХ при пониженном напряжении  $U_{1\Phi}^{\circ} = 0,95$  строим подобно предыдущей характеристике, только в этом случае учитываем, что

$$M_{Иi} = M_{ei} \cdot (U_{1\Phi}^{\circ})^2, \quad (4.24)$$

$$M_{Иi} = M_{ei} \cdot (0,95)^2 = 0,9025 \cdot M_{ei}.$$

По данным сводной табл. 4.2 строим ИМХ  $U_{1\Phi}^{\circ} = 0,95$ , которую покажем на рис. 4.2.

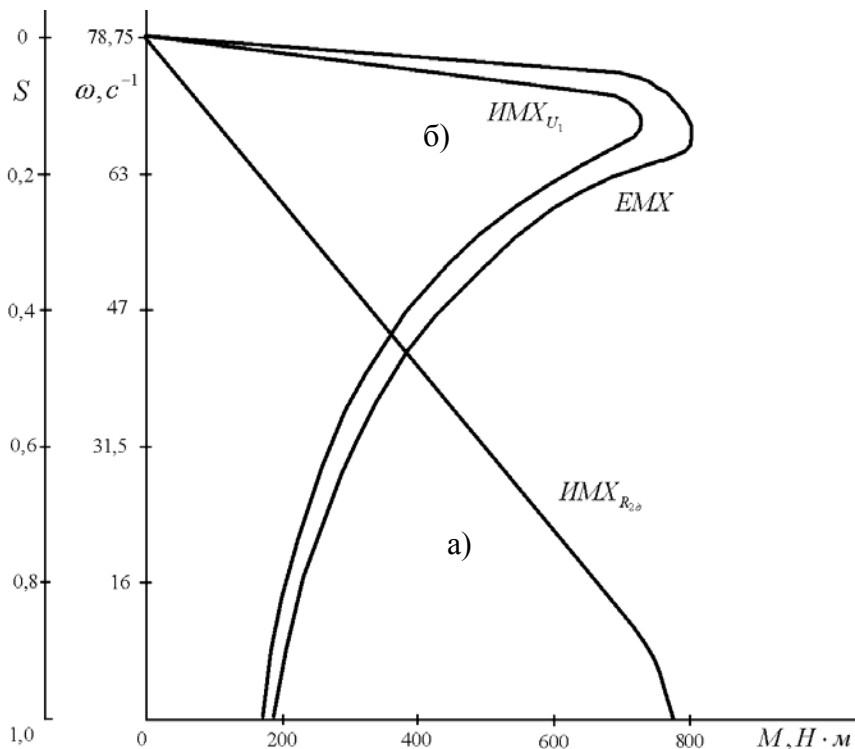


Рис. 4.2. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором 4MTH200LB8:  
 а) реостатная; б) при снижении напряжения на 5 %

#### 4.3.3. Расчет модуля статической жесткости и постоянной времени

Определим модуль статической жесткости по формуле

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_1 \cdot S_H}, \quad (4.25)$$

$$\beta = \frac{293}{78,75 \cdot 4,7 \cdot 10^{-2}} = 79,16 \text{ H} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем постоянную времени

$$T_M = J_\Sigma \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (4.26)$$

где  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции привода,

$$J_\Sigma = J_{np, mex} + J_p, \quad (4.27)$$

$$J_\Sigma = 0,74 + 70,82 = 71,56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

тогда

$$T_M = 71,56 \cdot \frac{1}{79,16} = 0,904 \text{ с}.$$

#### 4.3.4. Искусственные механические характеристики при увеличении частоты напряжения питания

С увеличением частоты питания источника при  $U_{1\Phi H}$  до величины, указанной в задании,

$$f_1 = f_0 \cdot f_1^o = f_H \cdot f_1^o, \quad (4.28)$$
$$f_1 = 50 \cdot 1,7 = 85 \text{ Гц},$$

критическое скольжение  $S_{KH}$  и критический момент  $M_{KH}$  уменьшаются согласно формулам:

$$S_{KH} = S_{Ke} \cdot \frac{1}{f_1}, \quad (4.29)$$

$$M_{KH} = M_{Ke} \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right)^2, \quad (4.30)$$

соответственно имеем

$$S_{KH} = 0,104 \cdot \frac{1}{1,7} = 0,06,$$

$$M_{KI} = 800 \cdot \left( \frac{1}{1,7} \right)^2 = 277 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

При изменении частоты питания изменится и синхронная скорость двигателя

$$\omega_{СИ} = \frac{2\pi f_1}{P_{II}} , \quad (4.31)$$

$$\omega_{СИ} = \frac{2\pi 85}{4} = 133,5 \text{ с}^{-1} .$$

Далее расчет проведем по формуле Клосса с новыми значениями  $M_{KI}$ ,  $S_{KI}$

$$M_{II} = \frac{2M_{KI}(1+a \cdot S_{KI})}{S/S_{KI} + \frac{S_{KI}}{S} + 2aS_{KI}} , \quad (4.32)$$

а также учтем, что

$$\omega_{II} = \omega_{СИ}(1-S) . \quad (4.33)$$

Данные расчетов приведены в табл. 4.3, а график ИМХ при увеличении частоты напряжения питания показан на рис. 4.3.

#### 4.3.5. Искусственные механические характеристики при уменьшении частоты напряжения питания

ИМХ при уменьшении частоты до величины, указанной в задании, при соблюдении закона  $\overset{o}{U}_1 / \overset{o}{S}_1 = const$  строим аналогично предыдущей.

Воспользуемся формулами (4.28), (4.31), (4.12) и учтем при этом, что индуктивные параметры двигателя, а также напряжение питания изменятся в соответствии с законом

$$\overset{o}{U}_1 / \overset{o}{S}_1 = const .$$

Таблица 4.3

Данные расчета ИМХ при увеличении частоты напряжения питания

$S$	$\omega, c^{-1}$	$M, H \cdot m$
0,05	126,8	272,75
$S_K = 0,06$	125,5	276,8
0,1	120,15	247,4
0,2	106,8	160,29
0,3	93,45	114,19
0,4	80,1	88,06
0,5	66,75	71,5
0,6	53,4	60,12
0,7	40,05	51,84
0,8	26,7	45,55
0,9	13,35	40,62
1,0	0	36,65

Для параметров ИМХ получим следующие значения:

$$f_1 = 50 \cdot 0,65 = 32,5 \text{ Гц},$$

$$\omega_{СИ} = \frac{2\pi \cdot 32,5}{4} = 51,05 \text{ c}^{-1},$$

$$M_K = \frac{3 \cdot 143^2}{2 \cdot 51,05(0,17 + \sqrt{0,17^2 + 0,51^2})} = 849,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Далее расчет проводим по формуле Клосса. График ИМХ при уменьшении частоты напряжения питания показан на рис. 4.3.

Практически график построен по двум точкам:

$$1. \omega_{СИ} = 51,05 \text{ c}^{-1}; M=0; S=0;$$

$$2. \omega = 48,5 \text{ c}^{-1}; M = 541,8 \text{ Н} \cdot \text{м}; S=0,05.$$



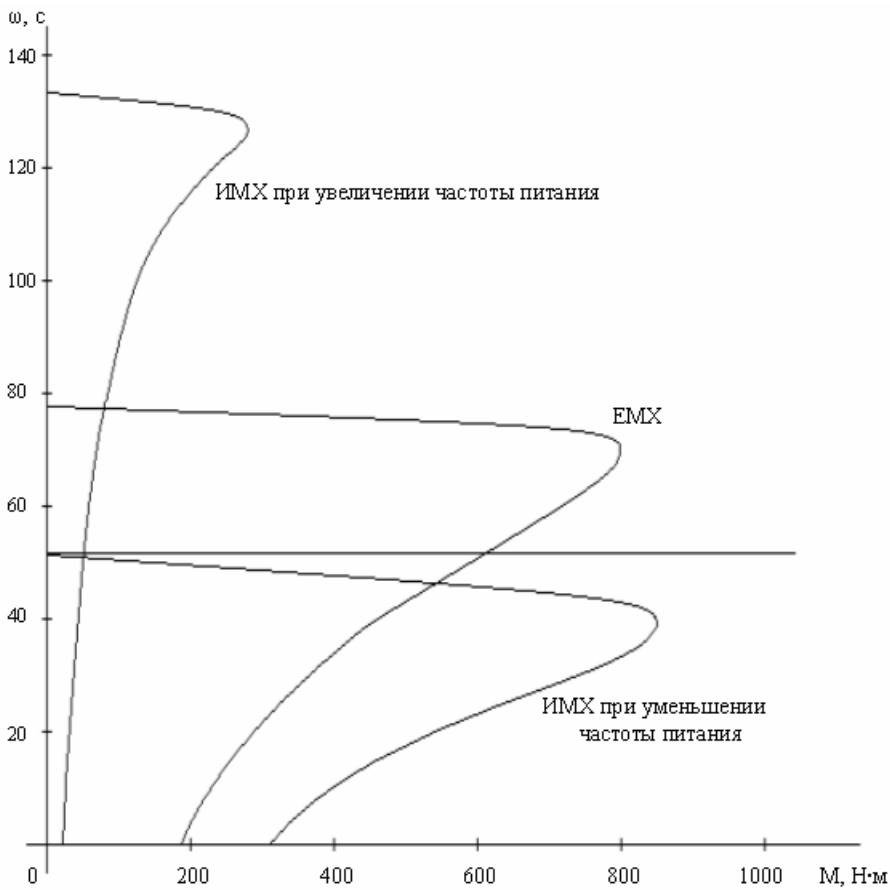


Рис. 4.3. Искусственные механические характеристики двигателя 4МТН200LB8 при изменении частоты питания

#### 4.3.6. Искусственные механические характеристики в режиме противовключения

$$M_C = M_H \cdot M_C^o, \quad (4.34)$$

$$M_C = 293 \cdot 0,653 = 190,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $M_C$  – реактивный статический момент сопротивления.

При этом характеристика двигателя переходит во II квадрант по расчетной характеристике. Величина сопротивления добавочного резистора  $R_{ПТ}$  в этом режиме определится следующим образом:

$$R_{ПТ} = R_2 \cdot \left( \frac{S_{II}}{S_e} - 1 \right), \quad (4.35)$$

где  $S_{II}$  – скольжение ротора в момент переключения АД ФР с двигательного режима при угловой скорости  $\omega_C$  в режим торможения противовключением;

$S_e$  – естественное скольжение при  $M_C$ .

Фактически нам необходимо решить уравнение, составленное по формуле Клосса, при известном  $M_C = 190,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и неизвестном скольжении. Решение этого уравнения даст нам искомые значения  $S_{II}$  и  $S_e$ .

Уравнение имеет следующий вид:

$$S^2 - 1,02S + 1,08 \cdot 10^{-2} = 0.$$

Уравнение имеет следующие корни:

$$S_1 = 1,01 \text{ (это } S_{II}),$$

$$S_2 = 0,01 \text{ (это } S_e).$$

Далее определим сопротивления добавочного резистора

$$R_{ПТ} = 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{1,01}{0,01} - 1 \right) = 3 \text{ Ом}.$$

На рис. 4.4. построена требуемая ИМХ при торможении в режиме противовключения.

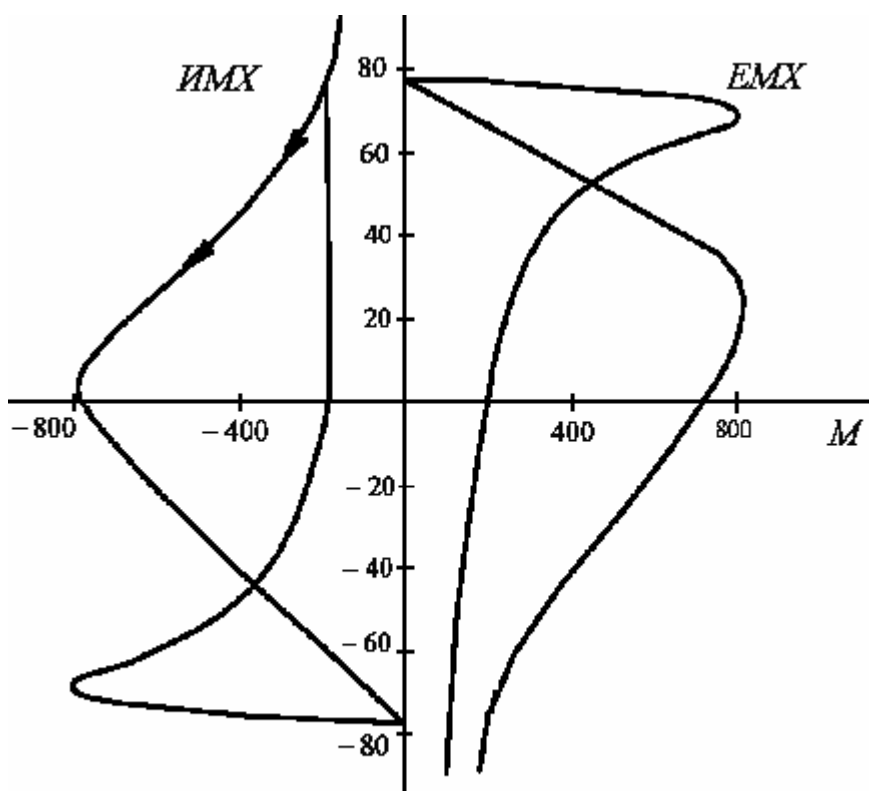


Рис. 4.4. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором 4МТН200ЛВ8 при торможении противовключением

## 5. ЗАДАЧИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Для кинематической схемы подъемника, приведенной на рис. 5.1, с параметрами, представленными в табл. 5.1 и двигателем постоянного тока независимого возбуждения, параметры которого даны в табл. 5.2, решите задачи 1-6.

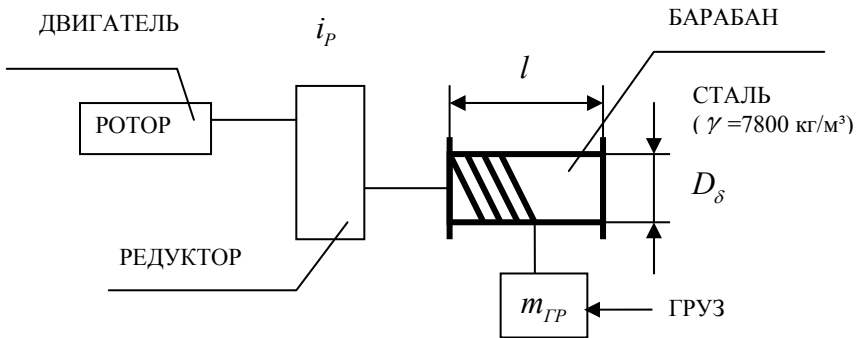


Рис. 5.1. Кинематическая схема подъемника

### Задача 1.

Определите массу поднимаемого груза с номинальной скоростью двигателя при номинальном моменте.

### Задача 2.

Определите передаточное число редуктора и приведите параметры кинематической схемы к валу двигателя.

### Задача 3.

Определите статическую нагрузку на валу двигателя при подъеме груза.

### Задача 4.

Определите статическую нагрузку на валу двигателя при спуске груза.

### **Задача 5.**

Осуществите подъем груза с заданной скоростью двигателя (см. столбец 5 табл. 5.1) с помощью добавочного резистора в цепи якоря. Приведите принципиальную электрическую схему и расчетные значения сопротивления. Укажите направление потоков мощности в электроприводе.

### **Задача 6.**

Выполните подъем груза с той же скоростью двигателя, что и в задаче 5, но путем регулирования напряжения на якоре двигателя. Приведите принципиальную электрическую схему и расчетные значения напряжения. Укажите направление потоков мощности в электроприводе. Сравните потери энергии при этих способах регулирования.

### **Задача 7.**

Подберите асинхронный двигатель с фазным ротором с номинальной мощностью и скоростью, близкой к значению для предложенного ранее двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Приведите принципиальную электрическую схему и паспортные данные двигателя.

### **Задача 8.**

Реализуйте тормозной спуск ранее рассчитанного груза с помощью выбранного асинхронного двигателя со скоростью, приведенной в столбце 6 табл. 5.1. Укажите направление потоков мощности.

### **Задача 9.**

Осуществите подъем ранее рассчитанного груза по системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ-АД) на скорости двигателя, приведенной в столбце 5 в табл. 5.1. Определите необходимые для этого параметры. Двигатель аналогичен предложенному в задаче 8.

### **Задача 10.**

Укажите способы управления величиной критического момента и критического скольжения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбужде-

нием. Приведите принципиальную электрическую схему, механические характеристики и направление потоков мощности.

Примеры расчета задач домашнего задания содержатся в учебном пособии [7].

Таблица 5.1

Данные для выполнения домашних заданий

№ варианта	Размеры барабана		Скорость, м/с	ИМХ, о. е.	
	$D_{\delta}$ , м	$l$ , м		подъём	спуск
1	2	3	4	5	6
1	0,20	0,5	4	0,8	0,22
2	0,25	0,55	3,8	0,78	0,24
3	0,30	0,6	3,6	0,76	0,26
4	0,35	0,65	3,4	0,74	0,28
5	0,4	0,7	3,2	0,72	0,3
6	0,45	0,75	3,0	0,70	0,32
7	0,5	0,8	3,2	0,68	0,34
8	0,55	0,85	3,6	0,66	0,36
9	0,6	0,9	3,0	0,64	0,38
10	0,55	0,95	3,6	0,62	0,4
11	0,5	1,0	3,8	0,60	0,42
12	0,45	0,8	4,0	0,58	0,44
13	0,4	0,9	3,6	0,56	0,46
14	0,45	0,85	3,2	0,54	0,48
15	0,5	0,95	3,4	0,52	0,5
16	0,55	1,05	3,0	0,5	0,52
17	0,6	1,1	2,8	0,48	0,54
18	0,65	0,95	2,6	0,46	0,56
19	0,7	1,15	2,4	0,44	0,58
20	0,65	1,0	3,0	0,42	0,60

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5	6
21	0,6	0,95	4,0	0,40	0,62
22	0,55	0,9	3,8	0,38	0,64
23	0,5	0,95	2,8	0,36	0,66
24	0,55	1,0	2,6	0,34	0,68
25	0,6	1,05	2,2	0,32	0,70
26	0,65	1,2	2,4	0,30	0,72
27	0,7	1,05	2,8	0,28	0,74
28	0,75	1,15	2,6	0,26	0,76
29	0,8	1,2	3,8	0,24	0,78
30	0,75	1,1	3,2	0,22	0,8

Таблица 5.2

## Параметры двигателей постоянного тока

№ варианта	Тип ДПТ	Параметры		
		$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$U_H$ , В
1	1	2	3	4
1	2ПН-112ЛУ4	1,25	1000	220
2	2ПН-132МУ4	1,6	750	340
3	2ПН-132МУ4	2,5	1000	440
4	2ПН-132МУ4	4,0	1500	220
5	2ПН-132ЛУ4	3,0	950	110
6	2ПН-160МУ4	4,5	950	440
7	2ПН-1160ЛУ4	6,3	1000	340
8	2ПН-180МУ4	5,6	750	220
9	2ПН-180МУ4	8	1000	440
10	2ПН-200МУ4	8,5	750	340
11	2ПН-200МУ4	13	1000	220

Продолжение табл. 5.2

1	2	3	4	5
12	2ПН-200LY4	16	1000	440
13	2ПБ-200MY4	8	950	220
14	2ПБ-200MY4	11	1500	440
15	2ПФ-160MY4	4,2	750	340
16	2ПФ-160MY4	7,5	1500	220
17	2ПФ-160LY4	5,6	750	110
18	2ПФ-160LY4	8	1000	220
19	2ПФ-180MY4	9	750	340
20	2ПФ-180MY4	12	1000	340
21	2ПФ-180MY4	15	1500	220
22	2ПФ-180LY4	10	750	110
23	2ПФ-180LY4	14,0	1000	220
24	2ПФ-180LY4	18,5	1500	340
25	2ПФ-200MY4	22	1500	340
26	2ПФ-200LY4	15	750	110
27	2ПФ-200LY4	20	1000	340
28	2ПФ-200LY4	30	1500	440
29	2ПО-160 LY4	4	950	110
30	2ПО-180 LY4	7,5	1000	220



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное назначение данного учебного пособия – закрепить у студентов базовые знания по электроприводу для последующего углубленного изучения специальных дисциплин, а также оказать им помощь в практическом применении теоретических знаний для выполнения реальных расчетов автоматизированных электроприводов с использованием современных информационных технологий.

Помимо этого, используя данное учебное пособие, студент имеет возможность самостоятельно научиться рассчитывать естественные и искусственные механические и электро-механические характеристики электрических машин постоянного и переменного тока, составлять структурные и расчетные схемы механической части электропривода, выполнять анализ динамических свойств систем электропривода, рассчитывать мощность и выбирать электродвигатель при различных режимах работы из специализированной базы данных, рассчитывать амплитудочастотные и фазочастотные характеристики.

При пользовании учебным пособием необходимо иметь в виду, что оно не заменяет учебник и для успешного решения поставленных практических задач в автоматизированных электроприводах требуется и систематическое изучение дисциплины по рекомендуемой учебной литературе [6, 7].

Изучая дисциплину «Электрический привод» при таком комплексном подходе, студент, обучающийся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», впервые может осознанно определиться – насколько правильно была выбрана им специальность.

Имея на руках подробный теоретический материал по всем разделам учебной дисциплины и примеры решения конкретных задач, которые приводятся в данном пособии, студент

имеет возможность более тщательно готовиться к практическим и лабораторным занятиям.

После изучения теоретического материала по конспектам лекций, студенту будет значительно легче воспринимать их содержание, а также заранее подготавливать вопросы по интересующим темам. А после ознакомления с примерами решения задач по данному учебному пособию, ему будет проще выполнять практические задания и защищать лабораторные работы, а также получать к ним допуск, оформлять отчет, выполнять все необходимые расчеты. Все это, в конечном итоге, будет способствовать повышению качества обучения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине « Электрический привод» для студентов специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» очной формы обучения. / Воронеж. гос. техн. ун-т; сост. Ю.М. Фролов. Воронеж, 2003. 38 с.

2. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат. 1989.

3. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. М.: Энергоатомиздат. 1982. 504 с.

4. <http://www.aits-aper.narod.ru> – Автоматизированный учебный комплекс по дисциплине "Автоматизированное проектирование электроприводов".

5. Подвальный С.Л. Базы данных: учебное пособие. / С.Л. Подвальный, С.Л. Сергеева, Д.А. Ризванов. Уфа; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2004. 219 с.

6. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. / В.И. Ключев. М.: Энергоатомиздат. 1985. 560 с.

7. Фролов Ю.М. Электрический привод: учеб. пособие: в 2-х ч. / Ю.М. Фролов. Воронеж: Издательство Кварта, 2004. Ч.1. 116 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Использование баз данных для поиска технической информации по электродвигателям .....	7
1.1. Общие сведения .....	7
1.2. База данных «Карат» .....	8
1.3. База технической информации ВТИ .....	11
1.4. Особенности установки и эксплуатации программного обеспечения .....	22
2. Пример расчета механической части электропривода ..	27
2.1. Данные для выполнения расчета .....	27
2.2. Задание .....	29
2.3. Приведение схемы .....	29
2.4. Выбор электродвигателя .....	33
2.5. Структурная схема и передаточные функции .....	33
2.6. Амплитудочастотная и фазочастотная характеристики для управляющего воздействия .....	37
2.7. Переходные процессы .....	42
3. Построение характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	50
3.1. Данные двигателя постоянного тока .....	50
3.2. Задание .....	51
3.3. Решение .....	52
3.3.1. Естественные механические и электромеханические характеристики .....	52
3.3.2. Искусственные механические и электромеханические характеристики .....	56
3.3.3. Динамические механические характеристики ..	74
3.3.4. АЧХ для динамической жесткости .....	77
4. Построение характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором .....	80
4.1. Данные асинхронного двигателя .....	80
4.2. Задание .....	81
4.3. Решение .....	82

4.3.1. Естественные механические и электромеханические характеристики .....	82
4.3.2. Искусственные механические и электромеханические характеристики .....	88
4.3.3. Расчет модуля статической жесткости и постоянной времени .....	92
4.3.4. Искусственные механические характеристики при увеличении частоты напряжения питания .....	93
4.3.5. Искусственные механические характеристики при уменьшении частоты напряжения питания .....	94
4.3.6. Искусственные механические характеристики в режиме противовключения .....	96
5. Задачи для выполнения домашнего задания .....	99
Заключение .....	104
Библиографический список .....	106

Учебное издание

Романов Андрей Владимирович  
Тонн Дмитрий Александрович

**ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Редактор Ю.В. Татаренко

Выпускающий редактор И.В. Медведева

Компьютерный набор А.В. Романова, Д.А. Тонна

Подписано в печать 12.03.2007.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 6,8. Уч.-изд. л. 5,2. Тираж 250 экз.

Зак. №

ГОУВПО «Воронежский государственный технический  
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14