

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Филиал БНТУ

«Минский государственный политехнический колледж»

Электронное учебно-методическое пособие по учебной дисциплине

**«ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА»**

для специальностей 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(по направлениям)»

Минск, 2020

**Автор:**  
Петрович Э.А.

**Рецензенты:**

Еременко В.В., преподаватель филиала БНТУ «Минский государственный политехнический колледж»

Опейко О.Ф., доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» ФИТР БНТУ, к.т.н., доцент

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Основы электропривода» учащимися специальностей 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы», 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт», 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования (по направлениям)». В учебно-методическом пособии представлен теоретический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения самоконтроля, текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.  
Филиал БНТУ «Минский государственный политехнический колледж».  
пр - т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42  
E-mail: [mgpk@bntu.by](mailto:mgpk@bntu.by)  
<http://www.mgpk.bntu.by/>  
Регистрационный № БНТУ/МГПК – 04.2020

© БНТУ, 2020  
© Петрович Э.А., 2020

## Содержание

Пояснительная записка.

Вспомогательный раздел.

Выписка из учебного плана.

Междисциплинарные связи.

Типовая программа учебной дисциплины.

Примерный тематический план.

Содержание программы.

Примерные критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся.

Существенные и несущественные ошибки.

Перечень разделов и тем учебной программы.

Теоретический раздел.

Теоретический материал по темам учебной программы.

Практический раздел.

Методические указания для проведения лабораторных работ.

Методические указания для проведения практических работ.

Раздел контроля знаний.

Материалы для тематического контроля.

Вопросы к тематическому контролю №1

Вопросы к тематическому контролю №2

Вопросы к тематическому контролю №3

Примерный перечень вопросов к ОКР.

Примерный перечень экзаменационных вопросов.

Примерный перечень вопросов к дифференцированному зачету.

Перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины.

## Пояснительная записка

Электронное учебно-методическое пособие «Основы электропривода» может использоваться преподавателями, учащимися дневной и заочной формы получения образования для самостоятельного и дистанционного изучения материала учебной дисциплины.

Целью изучения учебной дисциплины «Основы электропривода» является приобретение учащимися знаний о режимах работы, характеристиках, способах регулирования координат электроприводов постоянного и переменного тока, расчёте добавочных сопротивлений и параметров электрических двигателей, определении энергетических показателей работы электроприводов.

Изучение дисциплины «Основы электропривода» основывается на знании учебного материала дисциплин: «Техническая механика», «Электрические аппараты», «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины». В свою очередь, она является базовой при изучении дисциплин специализаций.

В результате изучения дисциплины учащиеся должны

*знать на уровне представления:*

- основные направления развития и пути совершенствования автоматизированных электроприводов;
- значение автоматизированного электропривода в современном производстве;
- классификацию электроприводов;
- принципиальные схемы электроприводов;
- общие цели и задачи автоматизации производственных и технологических процессов;

*знать на уровне понимания:*

- функциональную и кинематическую схемы механической части электропривода;
- основные способы регулирования координат электропривода;
- принципы работы основных схем силовых преобразователей в составе электропривода;

*уметь:*

- анализировать процессы, происходящие в электроприводе при различных режимах работы;
- составлять уравнения движения электроприводов;
- определять момент инерции электропривода;
- рассчитывать и исследовать электромеханические и механические характеристики электродвигателей;
- рассчитывать регулировочные и пусковые сопротивления;
- производить выбор и проверку электродвигателей по перегрузочной способности, пусковым условиям и нагреву.

Для закрепления теоретических знаний и формирования у учащихся практических умений программой дисциплины предусмотрено выполнение практических и лабораторных занятий.

В процессе изложения учебного материала необходимо отражать современные достижения науки и техники в области электромашиностроения, создания новых технических средств автоматизации, расширения применения регулируемого электропривода, применения схем тиристорного управления электроприводами постоянного и переменного тока.

Для контроля усвоения программного учебного материала предусмотрено проведение одной обязательной контрольной работы, трех тематических контролей, задания для которых разрабатываются преподавателем и рассматриваются на заседании предметной (цикловой) комиссии.

## Вспомогательный раздел

Выписка из учебного плана.

специальности 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
специализации 2-53 01 05 01 «Автоматизированный электропривод  
промышленных и транспортных установок»

утвержденного Министерством образования Республики Беларусь  
09.06.2015 № 56 РБ ст.№640/639 Д/тип.спец.01

Учебная дисциплина «Основы электропривода» изучается на протяжении  
1 семестра (дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов
	5 семестр обучения
Всего часов	70
Из них: практических занятий	12
лабораторных работ	8
курсовое проектирование	—
Количество: тематических контрольных работ	3
обязательных контрольных работ	1
Экзамен	1

Выписка из учебного плана специальности  
 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»,  
 утвержденного директором филиала БНТУ «МГПК»658 Д/тип от 09.06.2015  
 Учебная дисциплина «Основы электропривода» изучается на  
 протяжении 1 семестра (дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов
	6 семестр обучения
Всего часов	60
Из них: практических занятий	10
лабораторных работ	6
курсовое проектирование	—
Количество: тематических контрольных работ	3
обязательных контрольных работ	1
Экзамен	—

Выписка из учебного плана  
специальности 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(по направлениям)»,  
утвержденного Министерством образования Республики Беларусь  
02.08.2013 № 60 РБ ст. № 269 Д/тип-01

Учебная дисциплина «Основы электропривода» изучается на  
протяжении 1 семестра (дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов
	5 семестр обучения
Всего часов	60
Из них: практических занятий	10
лабораторных работ	6
курсовое проектирование	—
Количество: тематических контрольных работ	3
обязательных контрольных работ	1
Дифференцированный зачет	1



Междисциплинарные связи.

- 1 Основы промышленной электроники
- 2 Электрические машины
- 3 Математика
- 4 Основы технической механики
- 5 Нормативно-техническая документация
- 6 Теоретические основы электротехники
- 7 Электротехнические материалы
- 8 Электрические аппараты
- 9 Электробезопасность
- 10 Информационные технологии

# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

## РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

### УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления высшего  
и среднего специального образования  
Министерства образования  
Республики Беларусь

Ю.И.Миксюк

« 29 » 01 \_\_\_\_\_ 2009 г.

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### ТИПОВАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

для учреждений, обеспечивающих получение среднего  
специального образования по специальностям  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»  
2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования»  
2-53 01 32 «Автоматизация технологических процессов и  
производств»

Минск  
2009

Автор: Э.А.Петрович, преподаватель УО «Минский государственный политехнический колледж»

Ответственный за выпуск: Н.Е.Альхимович, заведующий сектором  
Республиканского института профессионального образования

При разработке содержания типовой учебной программы использована типовая программа «Основы электропривода», утвержденная Министерством образования Республики Беларусь 27 мая 1997 г.

Программа рассмотрена и одобрена  
на заседании цикловой комиссии  
специальных дисциплин специальностей  
2- 53 01 05 и 2- 36 01 05  
Протокол № \_\_\_ от « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2009г  
Председатель комиссии \_\_\_\_\_

© Республиканский институт  
профессионального образования, 2009

## Примерный тематический план

Наименование разделов и тем	Количество часов								
	2-37 01 05 2-36 03 31			2-53 01 32			2-53 01 05		
	Всего	В том числе		Всего	В том числе		Всего	В том числе	
		на лабор работы	на практ. работы		на лабор работы	на практ. работы		на лабор. работы	на практ. работы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Введение	<b>2</b>			<b>2</b>			<b>2</b>		
Раздел 1. Механика электропривода	<b>8</b>	<b>2</b>		<b>10</b>	<b>2</b>		<b>10</b>	<b>2</b>	
1.1. Структура механической части электропривода	4			4			4		
1.2. Неустановившееся механическое движение электропривода	4	2		6	2		6	2	
Раздел 2. Электропривод с двигателями постоянного тока	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>22</b>		<b>4</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
2.1. Электропривод с двигателями постоянного тока независимого возбуждения	14	2	4	18		4	14	2	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.2. Электропривод с двигателями постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	4			4			4		
Раздел 3. Электропривод с двигателями переменного тока	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>28</b>		<b>4</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
3.1. Электропривод с асинхронными двигателями	20	2	4	22		4	20	2	4
3.2. Электропривод с синхронными двигателями	4			6			6		
Раздел 4. Энергетика электропривода	<b>8</b>		<b>2</b>	<b>8</b>		<b>2</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
4.1. Энергетические показатели работы электропривода	2			2			4		2
<i>Обязательная контрольная работа</i>	1						1		
4.2. Расчёт мощности, выбор и проверка электродвигателей	5		2	5		2	9	2	2
<i>Обязательная контрольная работа</i>				1					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Раздел 5. Системы автоматизированного управления электроприводами				<b>20</b>	<b>4</b>				
5.1. Общие вопросы управления электроприводами				2					
5.2. Разомкнутые системы автоматизированного управления электроприводами				12	2				
5.3. Замкнутые системы автоматизированного управления электроприводами				6	2				
Итого:	60	6	10	90	6	10	70	8	12

## Содержание программы

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b>Введение</b>		
<p>Ознакомить с целями, задачами дисциплины. Дать представление о предмете дисциплины, её связи с другими учебными дисциплинами.</p> <p>Сформировать понятие об электрическом приводе (ЭП), о классификации ЭП, истории развития и основных направлениях развития ЭП.</p>	<p>Цели, задачи, предмет дисциплины.</p> <p>Связь с другими учебными дисциплинами.</p> <p>Понятие, классификация электрических приводов (ЭП) (по назначению, по характеру движения, по виду силового преобразователя, по роду тока, по числу используемых двигателей).</p> <p>Краткий исторический обзор развития ЭП и основные направления его развития.</p>	<p>Высказывает общие суждения о целях и задачах дисциплины, о её предмете и связях с другими учебными дисциплинами.</p> <p>Раскрывает понятие электрического привода, излагает классификацию электрических приводов, определяет связь с другими дисциплинами.</p> <p>Описывает историю и основные направления развития ЭП.</p>

## РАЗДЕЛ 1 Механика электропривода

### Тема 1.1 Структура механической части электропривода (ЭП)

<p>Сформировать понятия о механических звеньях ЭП и расчётных схемах механической части ЭП. Сформировать понятие об активном и реактивном моментах сопротивления. Научить приводить статические моменты и силы, моменты инерции и поступательно движущиеся массы к валу двигателя. Сформировать понятие о механических характеристиках двигателя и исполнительного органа рабочей машины. Сформировать понятие о естественной и искусственных характеристиках двигателя.</p>	<p>Механические звенья электропривода (ЭП). Расчётные схемы механической части ЭП. Статические моменты сопротивления. Приведение статических моментов и сил, моментов инерции поступательно движущихся масс к валу двигателя. Понятие механической характеристики электродвигателя и исполнительного органа рабочей машины.</p>	<p>Описывает механические звенья ЭП, расчётные схемы механической части ЭП. Раскрывает понятия активного и реактивного моментов сопротивления, механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины. Производит приведение статических моментов и сил, моментов инерции и поступательно движущихся масс к валу двигателя, определяет приведённые моменты инерции и нагрузки. Раскрывает понятия естественной и искусственных характеристик двигателя.</p>
--	---	---



## Тема 1.2 Неустановившееся механическое движение электропривода

<p>Дать представление об уравнении движения электропривода.</p> <p>Сформировать понятие о неустановившемся движении при постоянных моментах двигателя и нагрузки и времени переходного процесса. Сформировать понятие о неустановившемся движении ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа.</p>	<p>Уравнение движения электропривода.</p> <p>Неустановившееся движение при постоянных моментах двигателя и нагрузки. Определение времени переходного процесса.</p> <p>Неустановившееся движение ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа.</p>	<p>Высказывает общие суждения об уравнении движения электропривода.</p> <p>Описывает неустановившееся движение при постоянных моментах двигателя и нагрузки. Определяет время переходного процесса.</p> <p>Описывает неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа.</p>
--	--	--

### Лабораторная работа №1

<p>Сформировать умения определять момент инерции и маховый момент электропривода по методу свободного выбега.</p>	<p>Определение момента инерции и махового момента электропривода по методу свободного выбега.</p>	<p>Получает опытные данные, рассчитывает момент инерции и маховый момент электропривода по методу свободного выбега.</p>
---	---	--

## РАЗДЕЛ 2 Электропривод с двигателями постоянного тока

### Тема 2.1 Электропривод с двигателями постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

<p>Сформировать понятия о схеме включения ДПТ НВ, режимах его работы, способах пуска и торможения ДПТ, электромеханических и механических характеристиках.</p> <p>Сформировать понятие о регулировании координат с помощью резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока и подводимого напряжения. Дать понятие о схемах регулирования координат в системе «преобразователь напряжения – ДПТ» и импульсного регулирования координат ЭП с ДПТ НВ.</p> <p>Сформировать понятие о расчёте регулировочных и пусковых сопротивлений.</p>	<p>Схема включения ДПТ НВ и режимы его работы. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ в двигательном режиме. Пуск и торможение ДПТ. Регулирование координат с помощью резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока, изменением подводимого к якорю напряжения. Расчёт регулировочных и пусковых сопротивлений. Схемы регулирования координат в системе «преобразователь напряжения – ДПТ». Понятие импульсного регулирования координат ЭП с ДПТ НВ.</p>	<p>Описывает схему включения ДПТ НВ и режимы его работы, электромеханические и механические характеристики. Описывает способы пуска и торможения ДПТ, способы регулирования координат с помощью резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока, изменением подводимого напряжения. Излагает методику расчёта регулировочных и пусковых сопротивлений. Описывает схему регулирования координат и статические характеристики системы «преобразователь напряжения – ДПТ». Объясняет сущность понятия импульсного регулирования координат ЭП с ДПТ НВ.</p>
---	--	---

<b>Лабораторная работа №2</b>		
Сформировать умения анализировать электромеханические и механические характеристики электропривода с ДПТ НВ.	Снятие и исследование электромеханических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.	Анализирует электромеханические и механические характеристики ЭП с ДПТ НВ, делает заключение о свойствах ЭП по его характеристикам.
<b>Практическая работа №1</b>		
Сформировать умения выполнять расчет сопротивлений ступеней пускового реостата в цепи обмотки якоря ДПТ НВ.	Расчёт сопротивлений пускового реостата, включённого в цепь обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	Рассчитывает сопротивления ступеней пускового реостата в цепи обмотки якоря ДПТ НВ.
<b>Практическая работа №2</b>		
Сформировать умения выполнять расчет параметров ДПТ НВ при различных способах регулирования скорости: конструктивную постоянную двигателя, напряжение питания, скорость, сопротивление в цепи якоря.	Расчёт параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости вращения.	Рассчитывает параметры ДПТ НВ при различных способах регулирования скорости: конструктивную постоянную двигателя, напряжение питания, скорость, сопротивление в цепи якоря.

### Тема 2.1. Электропривод с двигателями постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Сформировать понятие о схемах включения, статических характеристиках и режимах работы двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Сформировать понятие о способах пуска и торможения двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Схемы включения, статические характеристики и режимы работы двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Способы пуска и торможения двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Описывает и объясняет схемы включения, статические характеристики и режимы работы двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Описывает способы пуска и торможения двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.
--	--	--

### РАЗДЕЛ 3 Электропривод с двигателями переменного тока

### Тема 3.1 Электропривод с асинхронными двигателями (АД)

<p>Сформировать понятие о схемах включения, статических характеристиках и режимах работы АД. Сформировать понятие о способах пуска и торможения АД. Сформировать понятие о регулировании координат с помощью сопротивлений, изменением числа пар полюсов, изменением величины и частоты подводимого напряжения. Дать понятие об электроприводах по системам «преобразователь частоты – АД» и «регулятор напряжения – АД». Сформировать понятие о каскадных схемах включения АД и схемах импульсного регулирования координат ЭП с АД. Сформировать понятие о расчёте пусковых</p>	<p>Схема включения и режимы работы АД. Электромеханические и механические характеристики АД. Пуск и торможение АД. Регулирование координат с помощью сопротивлений, изменением числа пар полюсов, изменением величины и частоты подводимого напряжения. Электропривод по системам «преобразователь частоты – АД» и «регулятор напряжения – АД». Каскадные схемы включения. Импульсное регулирование координат электропривода с асинхронным двигателем. Расчет пусковых сопротивлений для АД.</p>	<p>Описывает схемы включения АД с короткозамкнутым и фазным ротором. Описывает и объясняет статические характеристики АД. Описывает режимы работы, способы пуска и торможения АД. Описывает способы регулирования координат с помощью сопротивлений, изменением числа пар полюсов, изменением величины и частоты подводимого напряжения. Описывает электроприводы по системам «преобразователь частоты – АД» и «регулятор напряжения – АД». Описывает каскадные схемы включения АД и схемы импульсного регулирования координат ЭП с АД. Излагает методику расчёта пусковых сопротивлений для АД.</p>
--	--	--

сопротивлений для АД.		
<b>Лабораторная работа №3</b>		
Сформировать умения анализировать механические характеристики электропривода с АД.	Исследование механических характеристик электропривода с асинхронным двигателем	Анализирует механические характеристики ЭП с АД, делает заключение о свойствах ЭП по его характеристикам.
<b>Практическая работа №3</b>		
Сформировать умения выполнять расчет сопротивлений добавочных резисторов в цепях АД.	Расчёт сопротивлений добавочных резисторов в цепях асинхронного электродвигателя.	Рассчитывает сопротивления добавочных резисторов в цепях АД.
<b>Практическая работа №4</b>		
Сформировать умение рассчитывать параметры АД: номинальный, пусковой и максимальный момент, напряжение на статоре, скольжение.	Расчёт параметров асинхронного электродвигателя.	Рассчитывает параметры АД: номинальный, пусковой и максимальный моменты, напряжение на статоре, скольжение.
<b>Тема 3.2. Электропривод с синхронными двигателями (СД)</b>		

<p>Сформировать понятия о схемах включения, характеристиках и режимах работы СД, Познакомить с достоинствами и недостатками, областью применения СД. Сформировать понятие о способах регулирования скорости, пуска и торможения СД. Сформировать понятие о принципах использования СД в качестве компенсатора реактивной мощности системы электроснабжения. Сформировать понятие о свойствах и характеристиках ЭП с шаговыми и вентильными двигателями.</p>	<p>Схемы включения, характеристики и режимы работы синхронного двигателя. Достоинства и недостатки, область применения. Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности системы электроснабжения. Регулирование скорости, пуск и торможение СД. ЭП с шаговыми и вентильными двигателями.</p>	<p>Описывает схему включения, характеристики и режимы работы СД. Называет области применения, достоинства и недостатки СД. Описывает способы регулирования скорости, пуска и торможения СД. Излагает принципы использования СД в качестве компенсатора реактивной мощности системы электроснабжения. Описывает свойства и характеристики ЭП с шаговыми и вентильными двигателями.</p>
---	---	---

## РАЗДЕЛ 4. Энергетика электропривода

### Тема 4.1. Энергетические показатели работы электропривода

Сформировать понятие о потерях мощности и энергии в ЭП в установившемся режиме работы, при пуске и торможении ЭП.	Потери мощности и энергии электроприводов в установившемся режиме работы. Потери энергии при пуске и торможении электроприводов.	Раскрывает понятие потерь мощности и энергии в установившемся режиме работы ЭП, потерь энергии при пуске и торможении ЭП.
---	--	---

### Тема 4. 2. Расчет мощности, выбор и проверка электродвигателей

Сформировать представление о нагрузочных диаграммах двигателей. Сформировать понятие о расчёте мощности двигателя при различных режимах работы, выборе двигателя для ЭП, проверке двигателей по условиям пуска, нагреву и перегрузочной способности.	Нагрузочные диаграммы двигателей. Расчет мощности двигателей при различных режимах работы. Выбор двигателя для электропривода. Проверка двигателей по условиям пуска, нагреву и перегрузочной способности.	Распознаёт нагрузочные диаграммы двигателей. Излагает порядок расчета мощности двигателей при различных режимах работы, порядок выбора двигателя для электропривода, проверки двигателей по условиям пуска, нагреву и перегрузочной способности.
--	--	--

### Лабораторная работа №4

Сформировать умения анализировать нагрузочные диаграммы ЭП,	Исследование нагрузочных диаграмм электропривода.	Анализирует нагрузочные диаграммы ЭП, рассчитывает эквивалентный
---	---	--



рассчитывать эквивалентный статический момент.		статический момент.
<b>Практическая работа №5</b>		
Сформировать умения выполнять расчет энергетических показателей ЭП: циклового коэффициента мощности и циклового КПД для ЭП с различными типами двигателей.	Расчет энергетических показателей электропривода	Производит расчет циклового коэффициента мощности и циклового КПД для ЭП с различными типами двигателей.
<b>Практическая работа №6</b>		
Сформировать умения выполнять расчет мощности двигателя при различных режимах работы, производить выбор двигателя по каталогу и проверять его пригодность для ЭП.	Расчет мощности двигателя при различных режимах работы.	Рассчитывает мощность двигателя при различных режимах работы. Производит выбор по каталогу двигателя для ЭП и проверку его пригодности.
<b>РАЗДЕЛ 5. Системы автоматизированного управления электроприводами (САУ ЭП)</b>		
<b>Тема 5.1. Общие вопросы управления электроприводами</b>		

<p>Дать понятия «электропривод» и «управление». Сформировать понятие о классификации САУ ЭП и требованиях, предъявляемых к ним.</p>	<p>Понятия «электропривод» и «управление». Назначение и функции САУ ЭП. Классификация САУ ЭП. Требования, предъявляемые к САУ ЭП.</p>	<p>Раскрывает понятия «электропривод» и «управление». Объясняет классификацию САУ ЭП. Раскрывает требования, предъявляемые к САУ ЭП.</p>
---	---	--

**Тема 5.2. Разомкнутые системы автоматизированного управления электроприводами**

<p>Дать понятие об изображении и обозначении элементов схем автоматического управления. Сформировать понятие о принципах управления электроприводами, об автоматическом управлении пуском и торможением двигателей в функции времени, его достоинствах и недостатках. Сформировать знания о временных диаграммах тока и скорости, электромеханических характеристиках ДПТ при реостатном пуске. Сформировать понятие о типовых узлах и схемах пуска и торможения ДПТ и</p>	<p>Изображение и обозначение элементов схем автоматического управления. Принципы управления. Управление в функции времени, достоинства и недостатки. Временные диаграммы тока и скорости, электромеханические характеристики ДПТ при реостатном пуске. Типовые узлы и схемы пуска и торможения ДПТ. Типовые узлы и схемы пуска и торможения АД. Узлы электрической защиты двигателей и схем управления.</p>	<p>Объясняет изображение и обозначение элементов схем автоматического управления. Объясняет принципы управления, автоматическое управление пуском и торможением двигателей в функции времени, его достоинства и недостатки. Описывает временные диаграммы тока и скорости, электромеханические характеристики ДПТ при реостатном пуске. Описывает типовые узлы и схемы пуска и торможения ДПТ и АД. Описывает узлы электрической защиты двигателей и схем управления.</p>
--	---	---

АД, узлах электрической защиты двигателей и схем управления.		
<b>Лабораторная работа №5</b>		
Сформировать умение анализировать работу разомкнутой системы управления двигателем постоянного тока. Научить собирать электрическую цепь и выполнять построение механических характеристик разомкнутой системы ЭП для различных значений напряжения задания.	Исследование разомкнутой системы управления двигателем постоянного тока	Анализирует работу разомкнутой системы управления двигателем постоянного тока. Собирает электрическую цепь и выполняет построение механических характеристик разомкнутой системы ЭП для различных значений напряжения задания.
<b>Тема 5.3. Замкнутые системы автоматизированного управления электроприводами</b>		
Сформировать понятие о принципах компенсации внешних возмущений и отклонения, силовых и управляющих элементах автоматизированного ЭП,	Принцип компенсации внешних возмущений. Принцип отклонения (принцип обратной связи). Силовые и управляющие элементы	Объясняет принципы компенсации внешних возмущений и отклонения. Описывает силовые и управляющие элементы автоматизированного ЭП,

замкнутых системах ЭП постоянного и переменного тока.	автоматизированного ЭП. Замкнутые системы ЭП постоянного и переменного тока.	замкнутые системы ЭП постоянного и переменного тока.
<b>Лабораторная работа №6</b>		
Сформировать умение анализировать работу замкнутой системы управления двигателем постоянного тока. Научить собирать электрическую цепь и выполнять построение механических характеристик замкнутой системы ЭП с пропорциональным и пропорционально-интегральным регулятором скорости.	Исследование замкнутой системы управления двигателем постоянного тока	Анализирует работу замкнутой системы управления двигателем постоянного тока. Собирает электрическую цепь и выполняет построение механических характеристик замкнутой системы ЭП с пропорциональным и пропорционально-интегральным регулятором скорости.

## Примерные критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся

Отметка в баллах	Показатели оценки
1 (один)	Узнавание отдельных объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (схем включения двигателей, механических характеристик, нагрузочных диаграмм и т.д.), наличие многочисленных существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя.
2 (два)	Различение объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (понятий электрического привода и отдельных пунктов классификации электроприводов, схем включения двигателей постоянного и переменного тока, механических характеристик двигателя и исполнительного органа и т.д.); осуществление соответствующих практических действий; наличие существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя.
3 (три)	Воспроизведение части программного материала по памяти (фрагментарный пересказ и перечисление понятий электрического привода, его классификации, понятий механических характеристик двигателя и исполнительного органа, активного и реактивного моментов нагрузки, способов пуска и торможения двигателей и т.д.); осуществление умственных и практических действий по образцу (выполнение расчетов скорости идеального холостого хода, статического перепада скорости электропривода и т.д.); наличие отдельных существенных ошибок.

Отметка в баллах	Показатели оценки
4 (четыре)	<p>Воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения механических звеньев электропривода, механических характеристик, схем включения двигателей, способов регулирования скорости и т.д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (определение скорости установившегося движения, скорости идеального холостого хода, статического перепада скорости электропривода, расчет добавочных сопротивлений в цепях двигателей и т.д.); наличие единичных существенных ошибок.</p>
5 (пять)	<p>Осознанное воспроизведение большей части программного учебного материала (описание схем включения двигателей с объяснением принципов работы двигателей; способов регулирования скорости, механических характеристик электродвигателей при различных способах регулирования скорости, пусковых диаграмм, нагрузочных диаграмм, методов расчета регулировочных и пусковых сопротивлений и т.д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (производит расчет механических характеристик двигателей, сопротивлений добавочных и пусковых резисторов в цепях двигателей, определяет момент инерции электропривода, эквивалентный момент нагрузки и т.д.); наличие несущественных ошибок.</p>

Отметка в баллах	Показатели оценки
6 (шесть)	<p>Полное знание и осознанное воспроизведение всего программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (описание схем включения двигателей с объяснением принципов работы двигателей и физических процессов, происходящих в ЭП; способов регулирования скорости, механических характеристик электродвигателей при различных способах регулирования скорости, пусковых диаграмм, нагрузочных диаграмм, методов расчета регулировочных и пусковых сопротивлений и т.д.; обоснование правильности выбора способов регулирования скорости, пуска и торможения двигателей и т.д., выполнение заданий по образцу, на основе предписаний (расчет мощности двигателя, регулировочных и пусковых сопротивлений, приведенного момента инерции ЭП и т.д.); наличие несущественных ошибок.</p>

7 (семь)	<p>Полное, прочное знание и воспроизведение программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение схем включения двигателей с объяснением принципов работы двигателей; принципиальных схем тиристорных преобразователей; способов регулирования скорости, их достоинств и недостатков, механических характеристик электродвигателей при различных способах регулирования скорости, пусковых диаграмм, нагрузочных диаграмм, методов расчета регулировочных и пусковых сопротивлений и т.д.; раскрытие сущности физических</p>
Отметка в баллах	Показатели оценки
	<p>процессов, происходящих в двигателях при пуске, торможении и регулировании скорости, обоснование и доказательство правильности выбора способов регулирования скорости, пуска и торможения двигателей, формулирование выводов и т. д.; недостаточно самостоятельное выполнение заданий (расчет мощности двигателя, регулировочных и пусковых сопротивлений, приведенного момента инерции ЭП и т. д.)); наличие единичных несущественных ошибок.</p>



8 (восемь)	<p>Полное, прочное, глубокое знание и воспроизведение программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение основных способов пуска и торможения двигателей, принципов регулирования скорости двигателей, механических характеристик двигателей при различных способах регулирования скорости, принципиальных схем тиристорных преобразователей; раскрытие сущности физических процессов, происходящих в двигателях при пуске, торможении и регулировании скорости, обоснование и доказательство правильности выбора способов регулирования скорости, пуска и торможения двигателей, формулирование выводов об их достоинствах и недостатках, самостоятельное выполнение заданий (расчёт параметров электроприводов, мощности двигателей при различных режимах работы, регулировочных и пусковых сопротивлений с анализом результатов и т.д.); наличие единичных несущественных ошибок.</p>
---------------	---

Отметка в баллах	Показатели оценки
9 (девять)	Полное, прочное, глубокое, системное знание программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в частично измененной ситуации (применение учебного материала при выдвижении предположений и гипотез, поиске новых способов и рациональных путей решения учебных задач, при выполнении заданий творческого характера и т.д.)
10 (десять)	Свободное оперирование программным учебным материалом; применение знаний и умений в незнакомой ситуации (самостоятельные действия по описанию, объяснению нестандартных или новых способов решения учебных задач, выполнение творческих работ и заданий и т.д.)

## **ПЕРЕЧЕНЬ**

существенных и несущественных ошибок  
по учебной дисциплине «Основы электропривода» для специальностей  
2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»  
2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования»

### ***Существенные ошибки:***

#### **В изложении теоретического материала:**

- затруднения в изложении основных терминов, определений и понятий дисциплины;
- ошибки при воспроизведении схем включения различных электродвигателей, принципиальных электрических схем изучаемых узлов и блоков электроприводов;
- ошибки в объяснении принципов работы принципиальных электрических схем изучаемых узлов и блоков электроприводов;
- ошибки в формулах, описывающих статические характеристики различных электродвигателей;
- ошибки в изложении методик расчета элементов схем и характеристик двигателей;
- ошибки при воспроизведении способов регулирования координат электроприводов;
- ошибки при воспроизведении искусственных статических характеристик электроприводов с различными электродвигателями;
- ошибки в объяснении способов пуска и торможения электроприводов.
- нарушение логики изложения материала;

#### **При выполнении практических работ:**

- несоблюдение нормативно-методических документов при выполнении работ;
- нарушение технологии и последовательности операций при выполнении работ;
- нарушение последовательности действий при решении задач;
- ошибки при отражении в отчете статических характеристик электродвигателей и схем включения электродвигателей;
- ошибки в преобразовании формул;
- ошибки в вычислениях и расчетах;
- неумение оценивать полученный результат;

- незнание формул, неумение оперировать ими и применять к решению задач.

### ***Несущественные ошибки:***

#### **В изложении теоретического материала:**

- неточности в стандартном изложении терминов, понятий и определений дисциплины;
- неполное изложение определений;
- неуказание одного из способов регулирования скорости или пуска двигателя;
- неполная характеристика преимуществ и недостатков различных электродвигателей и способов регулирования скорости;
- нерациональный план устного или письменного ответа.

#### **При выполнении практических работ:**

- применение нерационального способа решения задач;
- наличие опечаток (менее 5);
- неумение преобразовывать единицы измерения физических величин;
- нерациональные методы (приёмы) работы со справочной литературой;
- ошибки вычислительного характера, не приводящие к абсурдным результатам;
- неумение оценивать точность расчетов;
- небрежное выполнение записей, схем, рисунков.

Преподаватель

Э.А.Петрович

Перечень существенных и несущественных ошибок рассмотрен и рекомендован для внедрения в учебный процесс на заседании цикловой комиссии электротехнических дисциплин.

Протокол № от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Председатель комиссии

Е.С.Гутько

# Перечень разделов и тем учебной программы.

## Введение

### Раздел 1. Механика электропривода

1.1. Структура механической части электропривода

1.2. Неустановившееся механическое движение электропривода

### Раздел 2. Электропривод с двигателями постоянного тока

2.1. Электропривод с двигателями постоянного тока независимого возбуждения

2.2. Электропривод с двигателями постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

### Раздел 3. Электропривод с двигателями переменного тока

3.1. Электропривод с асинхронными двигателями

3.2. Электропривод с синхронными двигателями

### Раздел 4. Энергетика электропривода

4.1. Энергетические показатели работы электропривода

4.2. Расчёт мощности, выбор и проверка электродвигателей

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### Введение

Электроприводом (ЭП) называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, передаточного, преобразовательного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и управления этим движением.

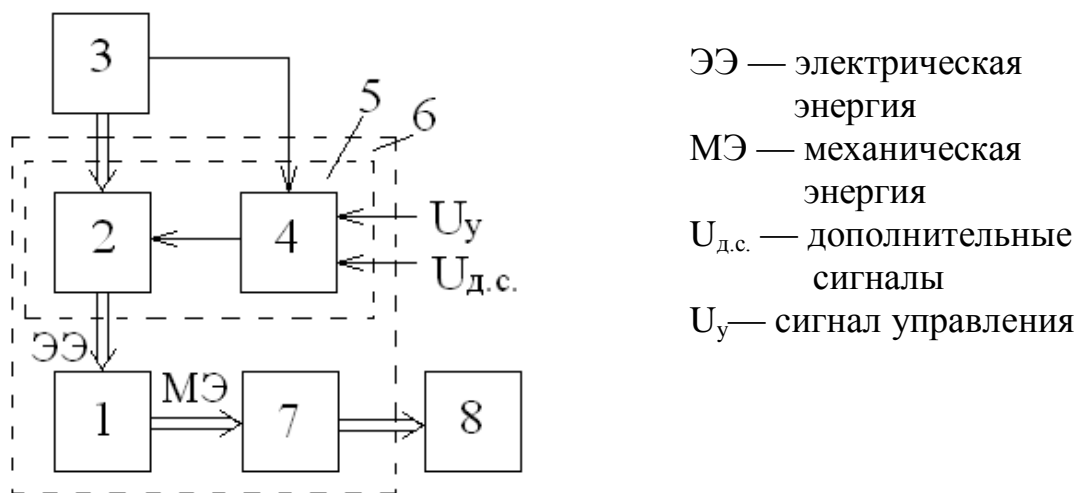


Рисунок 1 – Общая структурная схема электропривода

Основным элементом любого электропривода (6) является электродвигатель (1). От электродвигателя механическая энергия (МЭ) через передаточное устройство (7) (механическое, гидравлическое, электромагнитное) подается на исполнительный орган рабочей машины (8), за счет чего он совершает механические движения. Функция передаточного устройства заключается в согласовании движений электродвигателя и исполнительного органа. Электроэнергия (ЭЭ) потребляется двигателем от источника электрической энергии (3). Для получения электрической энергии необходимых для двигателя параметров между двигателем и источником включается силовой преобразователь (2), который вместе с маломощным блоком управления (4) образует систему управления (5).

### Классификация электроприводов

- 1) По назначению различают ЭП главного и вспомогательного движения.
- 2) По роду тока различают ЭП постоянного и переменного тока.

3) *По характеристике движения* различают ЭП вращательного и поступательного движения. При этом скорость ЭП может быть регулируемой или нерегулируемой, а само движение непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или вибрационным (возвратно-поступательным).

4) *По количеству используемых электродвигателей* ЭП бывают индивидуальные, групповые и взаимосвязанные.

5) *По виду силового преобразователя.* В качестве силового преобразователя могут использоваться управляемые и неуправляемые выпрямители, управляемые и неуправляемые инверторы, преобразователи частоты и напряжения переменного тока, импульсные преобразователи напряжения постоянного тока.

### ***Основные направления развития современного ЭП***

К основным направлениям развития современного ЭП относятся:

- разработка и выпуск комплектных регулируемых ЭП с использованием современных преобразователей и микропроцессорного управления;

- повышение эксплуатационной надежности, унификации и улучшение энергетических показателей ЭП;

- расширение области применения регулируемого асинхронного ЭП и использование ЭП с новыми типами двигателей, а именно линейными, шаговыми, вентильными, вибрационными, повышенного быстродействия, магнитогидродинамическими и др.;

- развитие научно-исследовательских работ по созданию математических моделей и алгоритмов технологических процессов, а также машинных средств проектирования ЭП;

- подготовка инженерно-технических и научных кадров, способных проектировать, создавать и эксплуатировать современный автоматизированный электропривод.

Решение этих и ряда других проблем позволит существенно улучшить технико-экономические характеристики ЭП и создать тем самым базу для дальнейшего технического прогресса во всех отраслях промышленного производства, транспорта, сельского хозяйства и в быту.

# *РАЗДЕЛ 1 Механика электропривода*

## *Тема 1.1 Структура механической части электропривода*

### *1.1.1 Уравнения, описывающие движение в механической части электропривода*

В общем случае механическая часть электропривода состоит из вращающегося ротора электродвигателя (М), передаточного устройства (ПУ) и исполнительного органа рабочей машины (ИО) (рисунок 1.1).

Ротор является источником или потребителем механической энергии. Он обладает определенным моментом инерции, может вращаться в требуемом направлении с нужной скоростью и развивать движущий или тормозящий момент.

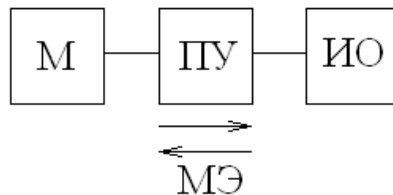


Рисунок 1.1 – Структура механической части электропривода

Передаточное устройство передает и преобразовывает движение в механической части электропривода. В качестве передаточного устройства могут использоваться редукторы, различные виды передач, барабан с тросом, кривошипно-шатунный механизм и т. д. Иногда передаточное устройство может отсутствовать.

Поступательное и вращательное движение любого элемента механической части электропривода может быть описано следующими уравнениями:

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt} - \text{поступательное движение};$$

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} - \text{вращательное движение},$$

где  $\sum F$  – совокупность сил, действующих на элемент, Н;

$\sum M$  – совокупность моментов, действующих на элемент, Н·м<sup>2</sup>.

$m$  – масса элемента, кг;

$J$  – момент инерции элемента, кг·м<sup>2</sup>;

$V$  – линейная скорость, м/с<sup>2</sup>;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с;

$t$  – время, с.



Чаще всего в процессе движения  $m$  и  $J$  остаются постоянными. Их производные при этом равны нулю и уравнения упрощаются:

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} = ma$$

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} = J \varepsilon,$$

где  $a$  - линейное ускорение;  
 $\varepsilon$  - угловое ускорение.

Если  $a > 0$  и  $\varepsilon > 0$ , то элемент будет двигаться с ускорением, а если  $a < 0$  и  $\varepsilon < 0$ , то с замедлением. Если  $a = 0$  и  $\varepsilon = 0$ , то и совокупность сил и моментов, действующих на элемент, также будут равны нулю. В этом случае элемент будет двигаться с постоянной скоростью или находиться в состоянии покоя. Такое движение элемента называется установившимся.

### 1.1.2 Расчетные схемы механической части электропривода

Для учета влияния друг на друга элементов механической части электропривода производится операция приведения сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается.

На рисунке 1.2,а приведена схема механической части ЭП подъемной лебедки. Электродвигатель вращающего движения (1) с моментом инерции  $J_d$  через одноступенчатый редуктор приводит во вращение барабан с тросом, на котором закреплен груз (4) с массой  $m$ . Допустим, что все элементы схемы являются абсолютно жесткими, и между ними нет воздушных зазоров.

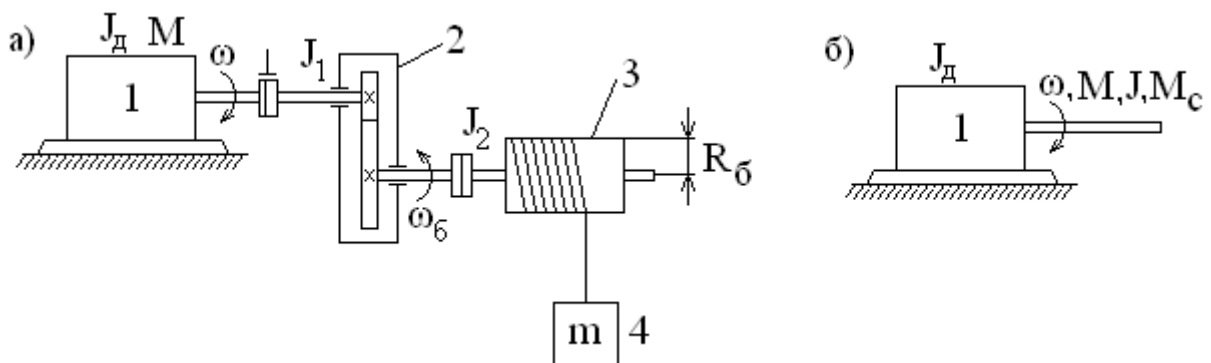


Рисунок 1.2 – а) Реальная схема механической части ЭП подъемной лебедки;  
 б) Расчетная (приведенная) схема.

Обычно в качестве элемента, относительно которого производится операция приведения, выбирают вал двигателя. Приведенная к валу двигателя схема подъемной лебедки показана на рисунке 1.2,б.

В этой схеме остальные элементы реальной схемы представлены приведенным моментом инерции ( $J$ ) и приведенным моментом нагрузки ( $M_C$ ). Эта схема получила название схемы жесткого приведенного механического звена или одномассовой системы.

**Определение приведенного момента инерции.** Для определения приведенного момента инерции  $J$  необходимо приравнять выражения кинетической энергии элементов в реальной и расчетной схемах (кинетическая энергия при всех производимых преобразованиях должна оставаться постоянной):

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_D\omega^2}{2} + \frac{J_1\omega^2}{2} + \frac{J_2\omega_B^2}{2} + \frac{mV_{ИО}^2}{2},$$

где  $J$  – приведенный момент инерции, Н·м;

$J_D$  – момент инерции двигателя, Н·м;

$J_1$  – момент инерции элементов, вращающихся со скоростью  $\omega$  (кроме двигателя).

$J_2$  – суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана  $\omega_B$ .

Выразим из этой формулы  $J$ . Для этого домножим обе части формулы на  $\frac{2}{\omega^2}$ . Получим:

$$J = J_D + J_1 + J_2 \left( \frac{\omega_B}{\omega} \right)^2 + m \left( \frac{V_{ИО}}{\omega} \right)^2.$$

Обозначим отношение  $\frac{\omega_B}{\omega} = i$ , а отношение  $\frac{V_{ИО}}{\omega} = \frac{R_B\omega_B}{\omega} = \frac{R_B}{i} = \rho$ ,

где  $i$  – передаточное отношение редуктора;

$R_B$  – радиус барабана подъемной лебедки;

$\rho$  – радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом (крюком) и валом двигателя.

С учетом этих обозначений получим окончательную формулу для определения приведенного момента инерции подъемной лебедки:

$$J = J_D + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2.$$

Полученная формула является универсальной формулой для определения приведенного момента инерции любого механизма. Она позволяет сформулировать общее правило: для определения приведенного момента инерции механизма необходимо моменты инерции вращающихся частей поделить на квадрат передаточного числа кинематической схемы между этими элементами и валом двигателя, а массы поступательно движущихся

элементов умножить на квадрат радиуса приведения и полученные результаты сложить с моментами инерции двигателя и элементов, вращающихся с его скоростью.

**Определение приведенного момента нагрузки.** При подъеме груза от электропривода к исполнительному органу должна подводиться следующая механическая мощность:

$$P_{ИО} = F_{ИО} \cdot V_{ИО} ,$$

где  $F_{ИО}$  – усилие, развиваемое исполнительным органом;  
 $V_{ИО}$  – скорость исполнительного органа.

$$F_{ИО} = mg ,$$

где  $m$  – масса поднимаемого груза;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

Для определения приведенного момента нагрузки запишем баланс мощности нагрузки в реальной и расчетной схемах, учитывая потери с помощью КПД:

$$M_C \cdot \omega = \frac{F_{ИО} \cdot V_{ИО}}{\eta} ,$$

где  $\eta = \eta_P \cdot \eta_B$  - результирующий КПД кинематической схемы, определяемый произведением КПД редуктора и КПД барабана с тросом.

Выразим из этой формулы  $M_C$ :

$$M_C = \frac{F_{ИО} \cdot V_{ИО}}{\eta \omega}$$

После преобразований получим:

$$M_C = \frac{F_{ИО} \cdot \rho}{\eta}$$

Эта формула позволяет рассчитать приведенный момент нагрузки в случае подъема груза. При спуске груза его энергия за минусом потерь передается от исполнительного органа к двигателю, поэтому формула приобретает вид:

$$M_C = F_{ИО} \cdot \rho \cdot \eta$$

В случае, когда исполнительный орган совершает вращательные движения, формулы для определения приведенного момента нагрузки будут выглядеть следующим образом:

$$M_C = \frac{M_{ИО}}{i \eta} \quad \text{– при передаче энергии от двигателя к исполнительному}$$

органу;

$$M_C = \frac{M_{ИО} \cdot \eta}{i} \quad \text{– при передаче энергии от исполнительного органа к}$$

двигателю.

### ***1.1.3 Основное уравнение движения электропривода***

В общем случае моменты двигателя  $M$  и нагрузки  $M_C$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным и наоборот. Момент нагрузки  $M_C$  также называется статическим моментом или моментом сопротивления. По характеру действия статические моменты делятся на *активные* и *реактивные*.

*Активные* - это моменты, обусловленные внешними по отношению к двигателю источниками энергии (сила тяжести, сила ветра и т. д.). Эти моменты действуют независимо от направления вращения электропривода, т. е. при одном направлении движения они могут быть движущими, при другом – тормозящими.

*Реактивные* моменты являются тормозными (обусловленными в основном силами трения). Они всегда противодействуют движению и поэтому изменяют свое направление при изменении направления движения.

Основное уравнение движения ЭП устанавливает связь между соотношением моментов двигателя и нагрузки и скоростью ЭП:

$$M_{\text{дин}} = M - M_C = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент в электроприводе.

1.  $M > M_C$ ,  $M_{\text{дин}} > 0$ ,  $\omega$  - увеличивается
2.  $M < M_C$ ,  $M_{\text{дин}} < 0$ ,  $\omega$  – уменьшается
3.  $M = M_C$ ,  $M_{\text{дин}} = 0$ ,
  - 3.1  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ,  $\omega = 0$
  - 3.2  $\omega_{\text{нач}} > 0$ ,  $\omega = \text{const}$

### ***1.1.4 Механические характеристики электродвигателя и исполнителя органа рабочей машины***

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его скорости от развиваемого момента или усилия ( $\omega(M)$  или  $V(F)$ ). На рисунке 1.3 показаны примеры механических характеристик различных электродвигателей.

Различают естественную и искусственные характеристики двигателя.

1 Естественная характеристика двигателя соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальными параметрами питающего напряжения. У каждого двигателя может быть только одна естественная

характеристика. На естественной характеристике расположена точка номинального режима двигателя.

2 Если двигатель включен не по основной схеме, или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы, или же двигатель питается напряжением с ненормальными параметрами, то он будет иметь характеристики, называемые искусственными. Таких характеристик у двигателя может быть много.

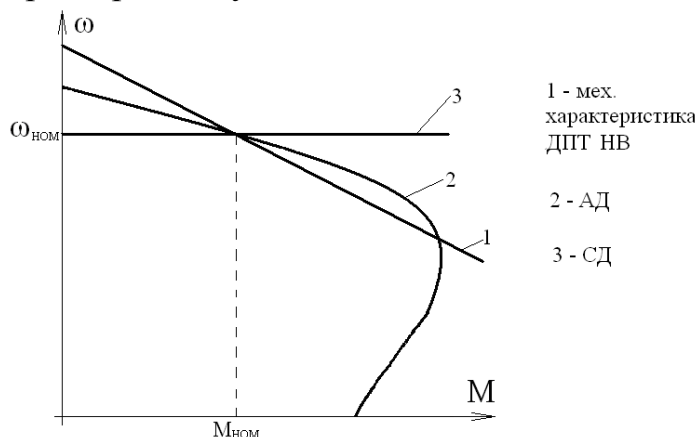


Рисунок 1.3 – Примеры механических характеристик различных электродвигателей

Механической характеристикой исполнительного органа называют зависимость его скорости от усилия или момента на нем.  $\omega_{ио}(M_{ио})$ ;  $V_{ио}(F_{ио})$ . После операции приведения эти зависимости изображаются в виде  $\omega(M_c)$ .

Количественно механические характеристики оцениваются жесткостью.

$$\beta = dM/d\omega \approx \Delta M/\Delta \omega$$

## ***Тема 1.2 Неустойчившееся механическое движение ЭП***

### ***1.2.1 Неустойчившееся движение ЭП при постоянном динамическом моменте***

Неустойчившееся движение возникает в электроприводе, когда момент двигателя не равен моменту нагрузки, т.е.  $M \neq M_c$ . В этом случае динамический момент не равен нулю, и происходит увеличение или снижение скорости движения. Примерами неустойчившегося движения в ЭП являются пуск, торможение и реверс двигателя, его переходы с одной скорости на другую в процессе её регулирования или изменения нагрузки на валу.

Целью рассмотрения неустойчившегося движения является получение зависимостей координат электропривода (момента, угловой скорости, тока) от времени ( $M(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $I(t)$ ). Эти зависимости получают решением основного уравнения движения электропривода

$$\pm M \pm M_C = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

и уравнения

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

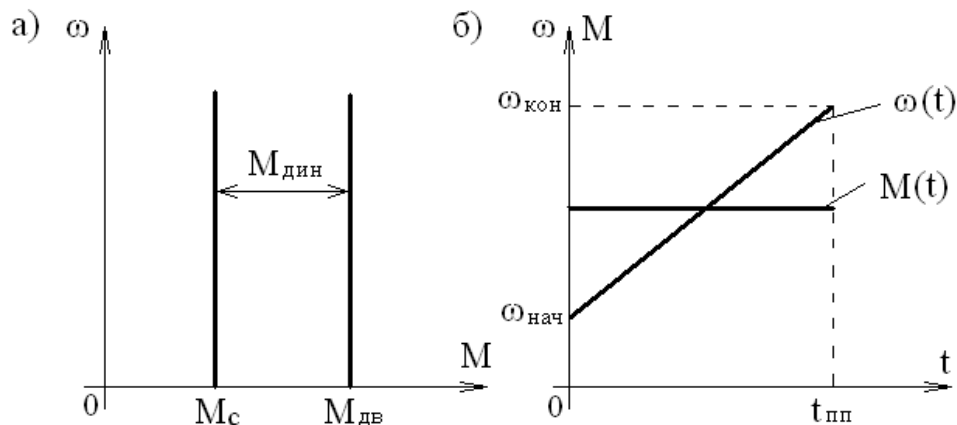


Рисунок 1.5 – а) Механические характеристики двигателя и нагрузки  
б) Графики переходных процессов ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и нагрузки

Если динамический момент является постоянным и положительным (рисунок 1.5,а), то решение уравнения (1) будет выглядеть следующим образом:

$$\omega = \frac{(M - M_C)}{J} \cdot t + \omega_{нач} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что в данном случае скорость будет линейно зависеть от времени и при  $M - M_C > 0$ ,  $\omega$  возрастает, а при  $M - M_C < 0$ ,  $\omega$  уменьшается.

На рисунке 1.5,б показаны зависимости скорости и момента двигателя от времени при постоянном и положительном динамическом моменте.

Время переходного процесса  $t_{ПП}$  определим из формулы (3) при подстановке:  $t = t_{ПП}$ ,  $\omega = \omega_{кон}$ .

$$t_{ПП} = J \frac{\omega_{кон} - \omega_{нач}}{M - M_C}$$

### **1.2.2 Неустановившееся движение электропривода при линейных механических характеристиках электродвигателя и исполнительного органа**

В этом случае динамический момент так же будет линейно зависеть от времени. Такие переходные процессы характерны для двигателей,

характеристики которых можно аппроксимировать (приблизённо заменить) прямыми линиями( рисунок 1.6).

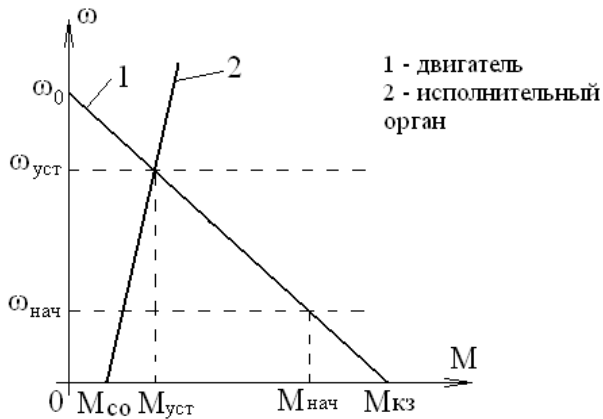


Рисунок 1.6 – Линейные механические характеристики

Эти характеристики будут описываться следующими уравнениями:

$$M = M_{кз} - \beta \omega$$

$$M_C = M_{C0} + \beta_C \omega,$$

где  $M_{кз}$  и  $M_{C0}$  – моменты двигателя и нагрузки при нулевой скорости.

$\beta$  и  $\beta_C$  – жесткость механических характеристик двигателя и нагрузки.

Подставив эти выражения в основное уравнение движения ЭП, получим

$$M_{дин.} = M - M_C = M_{кз} - \beta \omega - M_{C0} - \beta_C \omega = J d\omega/dt$$

Решая это уравнение, получаем следующие зависимости момента и скорости от времени:

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

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

где  $T_M = J/(\beta + \beta_C)$  – электромеханическая постоянная времени системы.

Как видно из полученных формул, момент и скорость в этом случае будут изменяться по закону экспоненты, что показано на рисунке 1.7.

В технических расчетах используется понятие практического времени переходного процесса  $t_{п.п.}$ . Это интервал времени, за который скорость электропривода успевает достигнуть 95% от установившегося значения.

Электромеханическая постоянная времени системы  $T_M$  имеет свой геометрический и физический смысл.

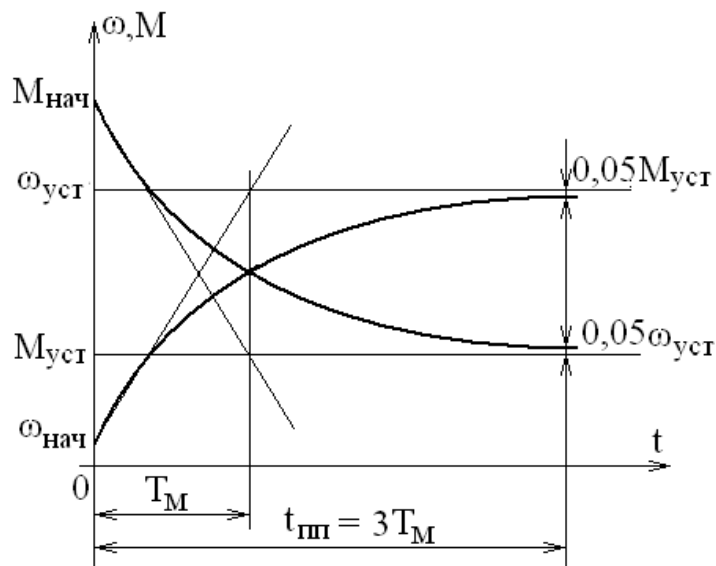


Рисунок 1.7 – Графики переходного процесса разгона ЭП

Геометрический смысл  $T_M$ :  $T_M$  – это отрезок, отсекаемый касательными к графикам  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при  $t = 0$  на уровнях установившихся значений скорости и момента.

Физический смысл  $T_M$ :  $T_M$  численно равна времени разгона двигателя без нагрузки до скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ .



## Раздел 2 Электроприводы с двигателями постоянного тока

### Тема 2.1 Электропривод с двигателями постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

#### 2.1.1 Схема включения и статические характеристики ДПТ НВ

На рисунке 2.1.а приведена схема включения ДПТ независимого возбуждения.

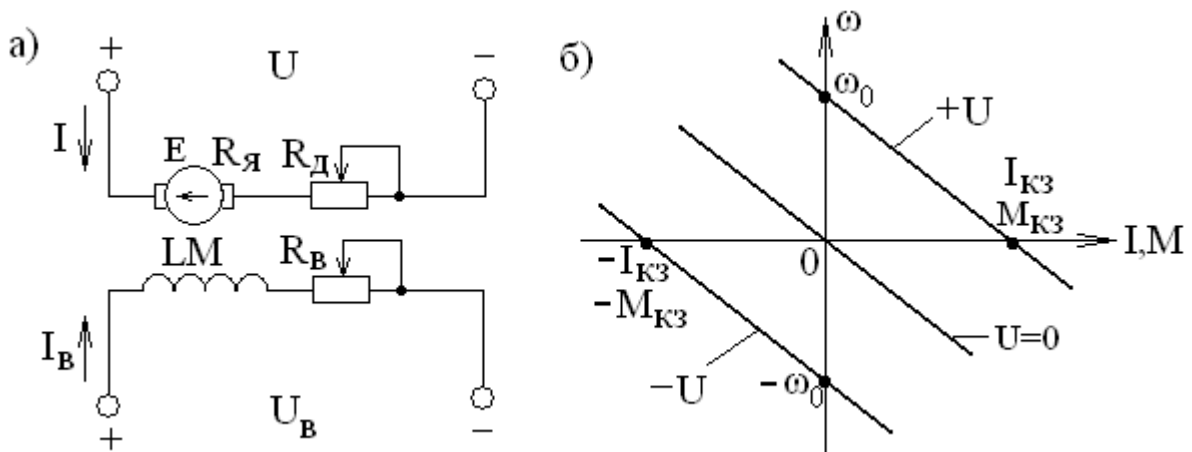


Рисунок 2.1 – Схема включения(а) и статические характеристики(б) ДПТ НВ

На схеме приняты следующие обозначения:  $U$  – напряжение на якоре, В;  $U_в$  – напряжение на обмотке возбуждения, В;  $I$  – ток якоря, А;  $I_в$  – ток возбуждения, А;  $R_д$  – добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом;  $R_в$  – добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения, Ом;  $R_я$  – сопротивление якоря, Ом.

$$R_я = 1,25(r_{оя} + r_{дп}) + r_{ко} + r_{щ}.$$

$r_{оя}$  – сопротивление обмотки якоря.

$r_{дп}$  – сопротивление добавочных полюсов.

$r_{ко}$  – сопротивление компенсационной обмотки.

$r_{щ}$  – сопротивление щётчного контакта.

Коэффициент 1,25 перед скобкой в данной формуле учитывает увеличение сопротивления обмоток ДПТ при нагревании.

В установившемся режиме работы по второму закону Кирхгофа для якорной цепи двигателя можно записать следующее выражение:

$$U=IR + E, \quad (1)$$

где  $E=k\Phi\omega$  — ЭДС вращения (противоЭДС), (2)

$k$  – конструктивный коэффициент двигателя,

$\Phi$  – основной магнитный поток,

$\omega$  – угловая скорость вращения якоря.

Направление токов и ЭДС, указанное на схеме, соответствует двигательному режиму работы.

$R=R_{я} + R_{д}$  — общее сопротивление якорной цепи.

Подставляя (2) в (1), получаем:  $U=IR + k\Phi\omega$ , откуда

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} \quad (3)$$

Такая зависимость  $\omega = f(I)$  называется электромеханической или скоростной характеристикой ДПТ НВ.

Ток и момент двигателя связаны следующей зависимостью  $M = k\Phi I$ , откуда получаем

$$I = \frac{M}{k\Phi} \quad (4)$$

Для получения выражения механической характеристики ДПТ НВ подставим (4) в (3):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (5)$$

Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости от тока и момента, вид которых для разных полярностей питающего напряжения якоря приведён на рисунке 2.1.б. Эти характеристики совмещены, что справедливо в случае  $k\Phi = \text{const}$ .

Из формул (3) и (5) видно, что при  $I = 0$  и  $M = 0$  характеристика проходит через точку  $\omega_0$ . Скорость  $\omega_0$  называется скоростью идеального холостого хода и определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \quad (6)$$

При скорости идеального холостого хода, когда момент на валу двигателя равен нулю, ток в цепи якоря не протекает, т.к. ЭДС якоря становится равной по величине приложенному напряжению, но действует навстречу ему.

Если двигатель до приложения нагрузки работал со скоростью  $\omega_0$ , то после приложения нагрузки  $M_c$  его скорость уменьшится до некоторого

значения  $\omega$ . Разность значений установившихся скоростей электропривода до и после приложения нагрузки называется статическим перепадом скорости ЭП и обозначается  $\Delta\omega$  (рисунок 2.2).

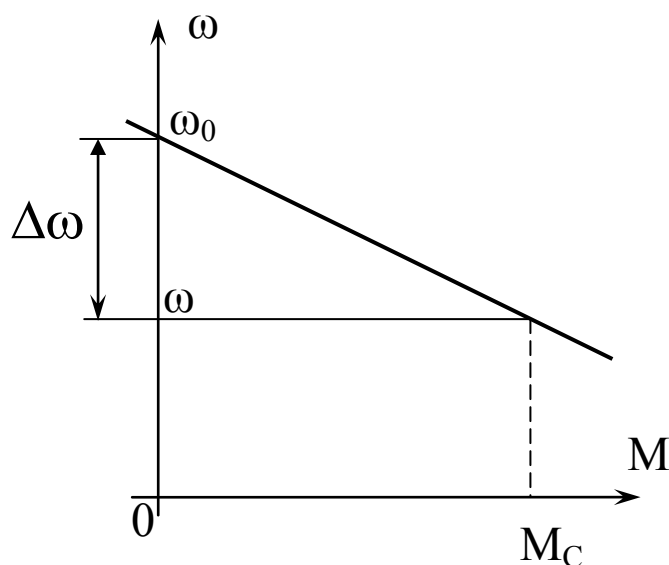


Рисунок 2.2 – Статический перепад скорости ЭП  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (7)$$

Таким образом, формулы (3) и (5) можно записать в обобщенном виде:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \quad (8)$$

Формулы (3) и (5) позволяют назвать основные способы получения искусственных (регулируемых) характеристик ДПТ НВ, используемых для регулирования его координат ( $I, M, \omega$ ):

- 1 введение в цепь якоря добавочного сопротивления;
- 2 изменение магнитного потока;
- 3 изменение подводимого к якорю напряжения.

Входящие также в эти выражения  $I$  и  $M$  определяются только механической нагрузкой ЭП и их значения не могут быть установлены произвольно.

### ***2.1.2 Энергетические режимы работы ДПТ НВ***

Энергетический режим работы электрической машины определяется направлением двух пар переменных: электрических ( $I, E$ ) и механических ( $M, \omega$ ).

При одинаковых направлениях  $\omega$  и  $M$  и разных направлениях тока и ЭДС электрическая машина работает в двигательном режиме. Если направление  $\omega$  и  $M$  не совпадают, а  $I$  и  $E$  совпадают, то имеет место генераторный режим работы.

Граничными между двигательным и генераторными режимами являются режимы холостого хода и короткого замыкания, в которых одна из электрических и механических переменных равна нулю.

Генераторные режимы работы важны в электроприводе с точки зрения осуществления его торможения, так как в генераторном режиме от исполнительного органа потребляется механическая энергия, что приводит к уменьшению скорости движения электропривода.

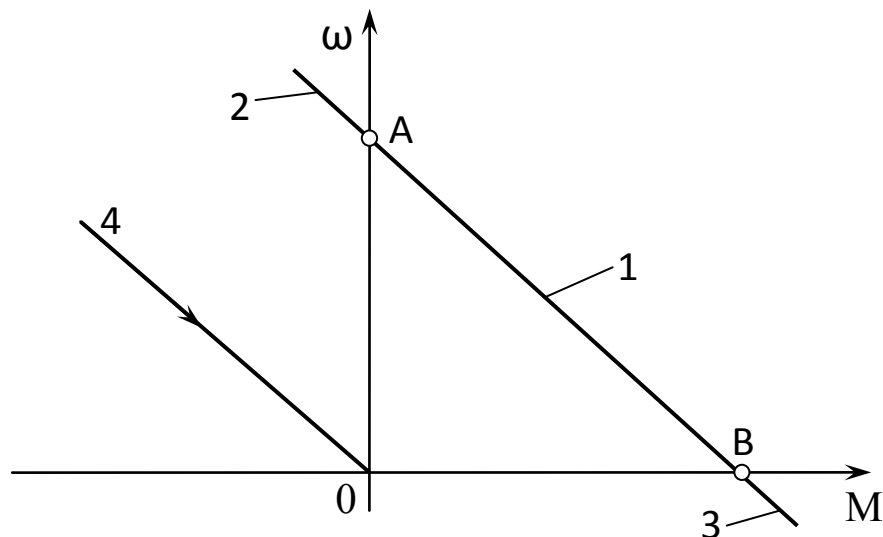


Рисунок 2.3 – Энергетические режимы работы ДПТ НВ на статических характеристиках

**1)Режим идеального холостого хода(рисунок 2.4,а):**

На характеристике (рисунок 2.3) ему соответствует точка А

$$I = 0, |U| = |E| = k\Phi \omega_0$$

$$M = 0, \omega = \omega_0$$

В режиме идеального холостого хода двигатель не получает энергию ни из электрической сети, ни от исполнительного органа.

**2)Двигательный режим(рисунок 2.4,б):**

На характеристике (рисунок 2.3) ему соответствует участок 1.

$$I = \frac{U - E}{R}, |E| < |U|, 0 < \omega < \omega_0$$

Электроэнергия потребляется двигателем из сети, преобразовывается в механическую энергию и отдаётся в рабочую машину.

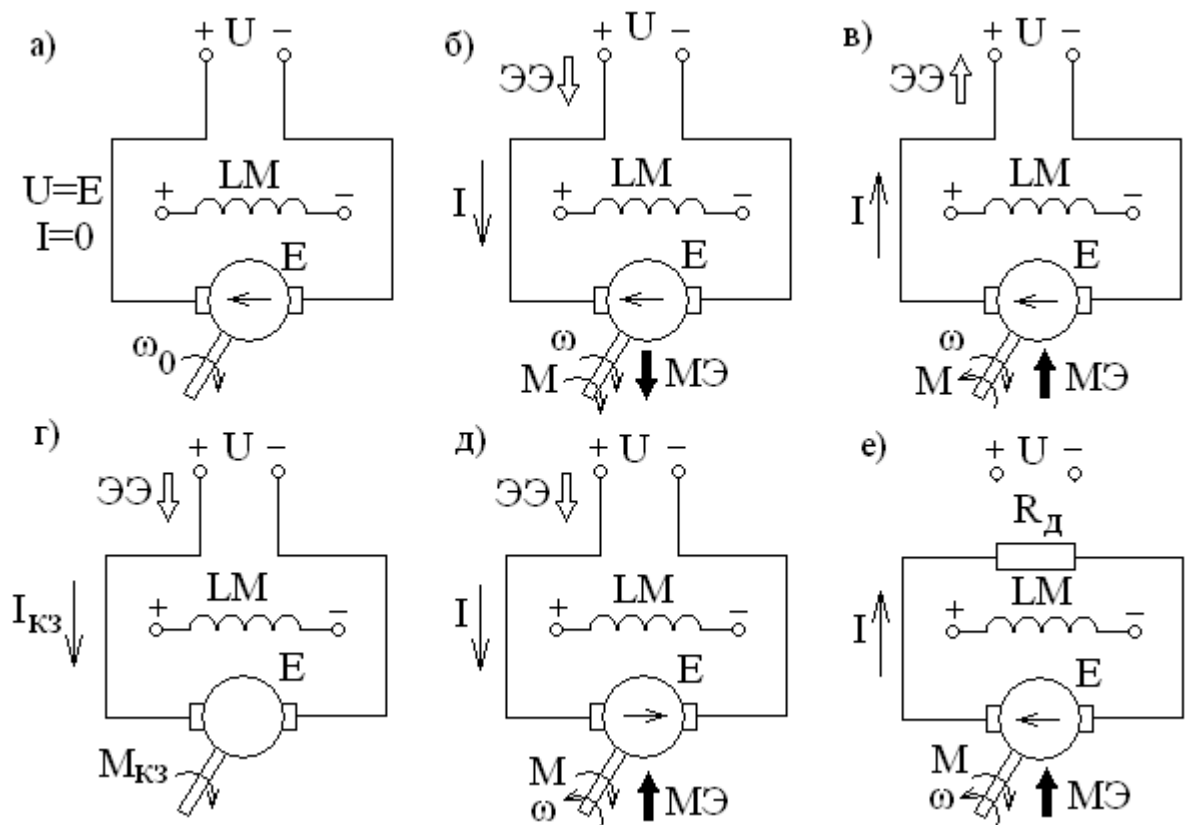


Рисунок 2.4 – Энергетические режимы работы ДПТ НВ

**3) Рекуперативное торможение (генераторный режим работы при параллельном соединении с сетью) (рисунок 2.4,в):**

На характеристике (рисунок 2.3) – участок 2. В этом режиме двигатель потребляет механическую энергию от исполнительного органа и в виде ЭЭ отдает ее(рекуперирует) в сеть.

$$\omega > \omega_0, |E| > |U|$$

**4) Режим короткого замыкания(рисунок 2.4,г):**

На характеристике (рисунок 2.3) – точка В. Возникает в двигателе в момент пуска или при принудительной остановке якоря.

$$\omega = 0, E = k\Phi\omega = 0, I_{кз} = \frac{U}{R}$$

В этом режиме потребляемая из сети электроэнергия рассеивается в виде тепла на сопротивлениях якорной цепи.

**5)Торможение противовключением (генераторный режим работы последовательно с сетью) (рисунок 2.4,д):**

На характеристике (рисунок 2.3) – участок 3. Этот режим осуществляется изменением полярности напряжения якоря при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения. Электроэнергия потребляется из сети, а также вырабатывается самим двигателем за счет

поступающей с вала МЭ и рассеивается в виде тепла на сопротивлениях якорной цепи.

**б)Режим динамического торможения (режим автономного генератора) (рисунок 2.4,е):**

На характеристике (рисунок 2.3) – участок 4. Для осуществления этого режима обмотку якоря замыкают на добавочное сопротивление, а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику питания. Ток в якоре протекает под действием противоЭДС и взаимодействует с магнитным потоком двигателя, за счет чего достигается эффект торможения.

Таким образом, торможение ЭП можно осуществить в трёх генераторных (тормозных) режимах работы.

**2.1.3 Регулирование координат ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря**

Данный способ регулирования координат ДПТ НВ применяется при невысоких требованиях к показателям качества регулирования, но отличается универсальностью и простотой реализации. На рисунке 2.5 приведена схема включения ДПТ НВ при регулировании координат с помощью резисторов в цепи якоря.

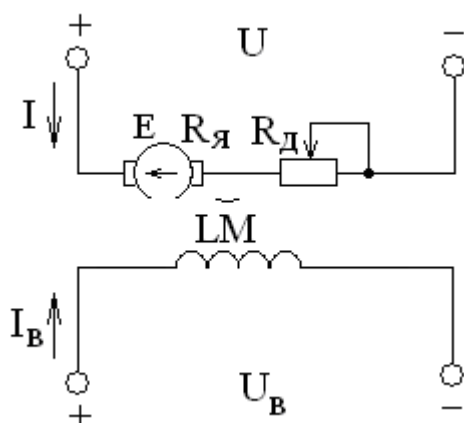


Рисунок 2.5 – Схема включения ДПТ НВ при регулировании координат с помощью резисторов в цепи якоря

Из формулы (7) видно, что скорость идеального холостого хода не зависит от добавочного сопротивления \$R\_{д}\$ в цепи якоря двигателя (рисунок 2.6), а наклон характеристик тем больше, чем больше \$R\_{д}\$, поэтому семейство механических (электромеханических) характеристик ДПТ НВ изображается в виде совокупности линий различного наклона (жёсткости), проходящих через одну и ту же точку на оси скорости с координатой \$\omega\_0\$ (рисунок 2.6).

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \tag{7}$$

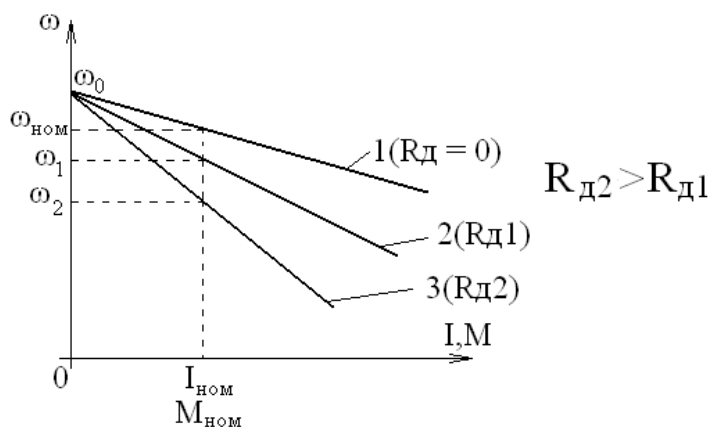


Рисунок 2.6 – Статические характеристики ДПТ НВ при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря

Оценим данный способ по основным показателям регулирования:

1 Диапазон регулирования скорости  $D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = 2 \div 3$ .

2 Направление регулирования скорости – вниз от номинальной.

3 Плавность регулирования скорости – определяется перепадом скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую при одинаковой нагрузке. Зависит от характера изменения  $R_d$ .

4 Стабильность скорости – характеризуется изменением скорости при возможных колебаниях момента нагрузки на валу двигателя и определяемая жёсткостью его характеристик. Стабильность скорости снижается по мере увеличения диапазона регулирования, т.к. уменьшается жёсткость регулировочных характеристик.

5 Экономичность способа регулирования скорости – определяется первоначальными денежными затратами на реализацию способа, стоимостью затрат на его обслуживание в процессе эксплуатации, а также стоимостью потерь энергии в регулировочном устройстве. Способ является недорогим с точки зрения затрат на его осуществление и обслуживание, но оказывается очень неэкономичным с точки зрения потерь энергии в регулировочном резисторе.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = UI - M\omega = k\Phi\omega_0 I - k\Phi I\omega = k\Phi I\omega_0 \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = UI \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = P_1 \delta$$

где  $\delta$  – относительный перепад скорости.

Из приведенной формулы видно, что чем больше  $\delta$ , т.е. чем больше скорость будет отличаться от скорости идеального холостого хода, тем большая часть потребляемой из сети мощности  $P_1$  будет расходоваться на потери. Т.е. при диапазоне  $D = 2$ , КПД двигателя будет меньше 50%.

### 2.1.4 Регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске, торможении и реверсе

В простейшем случае регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске, торможении и реверсе осуществляется введением в цепь якоря нерегулируемого резистора (рисунок 2.7).

Пуск двигателя происходит по искусственной характеристике 1. При включении ток и момент двигателя ограничиваются до допустимого уровня введением в цепь якоря резистора  $R_{д1}$ .

$$R_{д1} = \frac{U}{I_{доп}} - R_{я}$$

По мере увеличения скорости и роста ЭДС якоря ток в якоря уменьшается, и при некоторой скорости  $\omega_1$  резистор может быть выведен из цепи якоря. Двигатель переходит на естественную характеристику 2, по которой продолжает свой разгон до установившейся скорости, определяемой пересечением характеристик двигателя 2 и исполнительного органа 3.

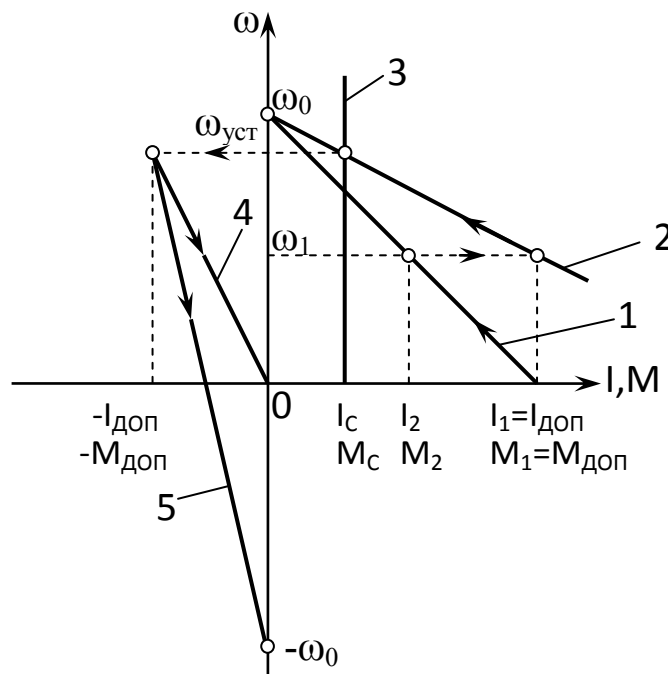


Рисунок 2.7 – Регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске, торможении и реверсе

Торможение противовключением происходит по характеристике 5 при изменении полярности напряжения на обмотке якоря или обмотке возбуждения с ограничением тока якоря резистором  $R_{д2}$ .

$$R_{д2} = \frac{U + E}{I_{доп}} - R_{я} \approx \frac{2U}{I_{доп}} - R_{я}$$



Динамическое торможение происходит по характеристике 4 при замыкании якоря на резистор  $R_{дз}$ .

$$R_{дз} = \frac{E}{I_{доп}} - R_{я} \approx \frac{U}{I_{доп}} - R_{я}$$

### 2.1.5 Пуск ДПТ

В установившемся режиме работы ток якоря ДПТ НВ определяется по формуле:

$$I = \frac{U - E}{R_{я}}$$

При пуске, когда скорость вращения якоря  $\omega$  равна нулю, ЭДС якоря также равна нулю, что вызывает увеличение тока якоря при пуске:

$$E = k\Phi\omega = 0$$

Пусковой ток при этом определяется выражением:

$$I_{п} = \frac{U}{R_{я}}$$

Так как сопротивление якоря ДПТ обычно имеет величину от долей Ома до нескольких Ом, то кратность пускового тока составляет  $I_{п} = (3 - 20)I_{ном}$ . Первая цифра в скобках соответствует двигателям малой мощности, вторая – двигателям большой мощности.

Увеличение пускового тока в двигателях малой мощности не вызывает опасных последствий, так как кратность тока невелика, а продолжительность процесса пуска небольшая. Поэтому двигатели малой мощности (до 1 кВт) пускают в ход непосредственным включением в сеть. У двигателей мощностью более 1 кВт кратность пускового тока гораздо выше, а время разгона якоря продолжительней. Большая кратность пускового тока вызывает сильное искрение на коллекторе, и может привести к резкому падению напряжения питающей сети, что может плохо отразиться на работе других потребителей энергии, включенных в ту же сеть. Поэтому для пуска двигателей мощностью более 1 кВт принимают специальные меры для ограничения пускового тока. Обычно это пусковые реостаты, включенные последовательно в цепь якоря.

Для пуска двигателя большой мощности использование пусковых реостатов нецелесообразно из-за больших размеров реостатов и больших потерь в них. Поэтому такие двигатели запускаются методом понижения напряжения.

### 2.1.6 Пусковая диаграмма ДПТ НВ

Пусковой диаграммой называется совокупность двух и более искусственных характеристик, используемых при пуске двигателя (рисунок 2.8).

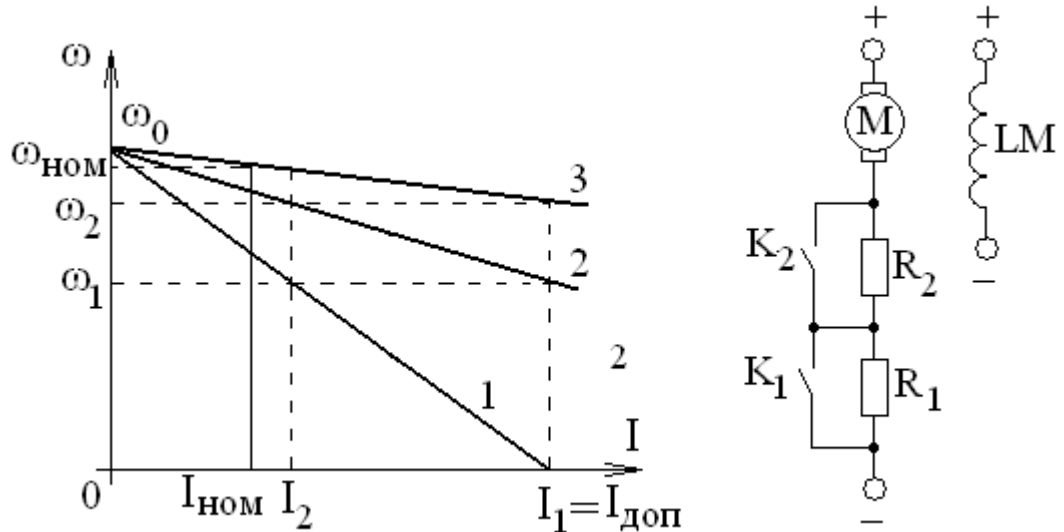


Рисунок 2.8 – Пусковая диаграмма и схема пуска ДПТ НВ

Двигатель запускается по искусственной характеристике 1. При включении ток и момент двигателя ограничиваются до допустимого уровня суммарным сопротивлением ступеней  $R_1$  и  $R_2$ . При скорости  $\omega_1$ , когда ток в цепи якоря уменьшается до значения  $I_2$  ключом  $K_1$  закорачивается ступень  $R_1$ , и двигатель переходит на искусственную характеристику 2, соответствующую включению в цепь якоря ступени  $R_2$ . При скорости  $\omega_2$  ключом  $K_2$  закорачивается ступень  $R_2$ , и двигатель выходит на естественную характеристику 3, по которой продолжает разгон до номинальной скорости.

### 2.1.7 Регулирование координат ДПТ НВ изменением магнитного потока

При использовании этого способа магнитный поток обычно уменьшается по сравнению с номинальным, так как магнитная система ДПТ в номинальном режиме находится в насыщении, и увеличение тока возбуждения не приводит к заметному росту магнитного потока, а вызывает лишь дополнительный нагрев обмотки возбуждения, что видно из характеристики намагничивания ДПТ НВ (рисунок 2.9).

Для регулирования тока возбуждения обычно используется включение в цепь обмотки возбуждения добавочного резистора или питание обмотки

возбуждения от управляемого выпрямителя (изменение напряжения на обмотке возбуждения). Схемы питания обмотки возбуждения в этих случаях показаны на рисунке 2.10.

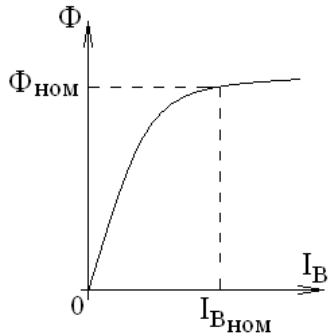


Рисунок 2.9 – Кривая намагничивания ДПТ НВ

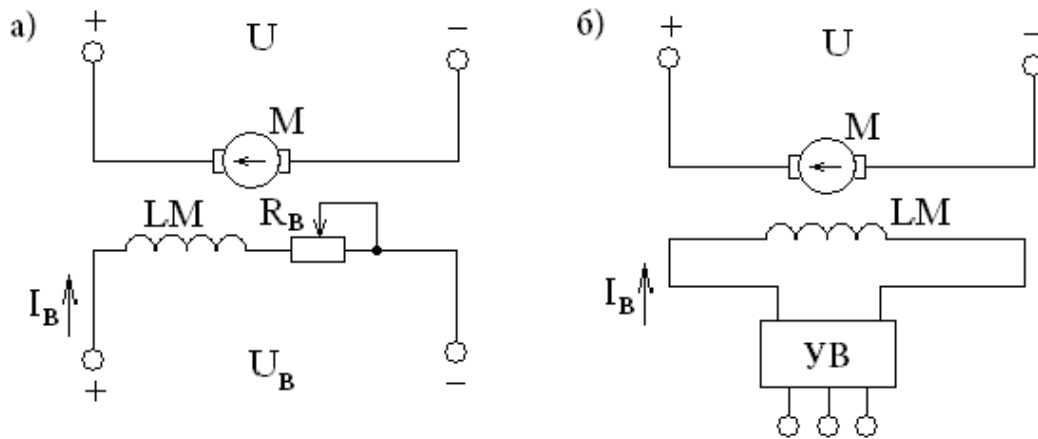


Рисунок 2.10 – Регулирование тока возбуждения ДПТ НВ

На рисунке 2.11 показаны статические характеристики ДПТ НВ при уменьшении магнитного потока, а приведенные ниже формулы поясняют положение искусственных характеристик 2 и 3 по отношению к естественной характеристике 1.

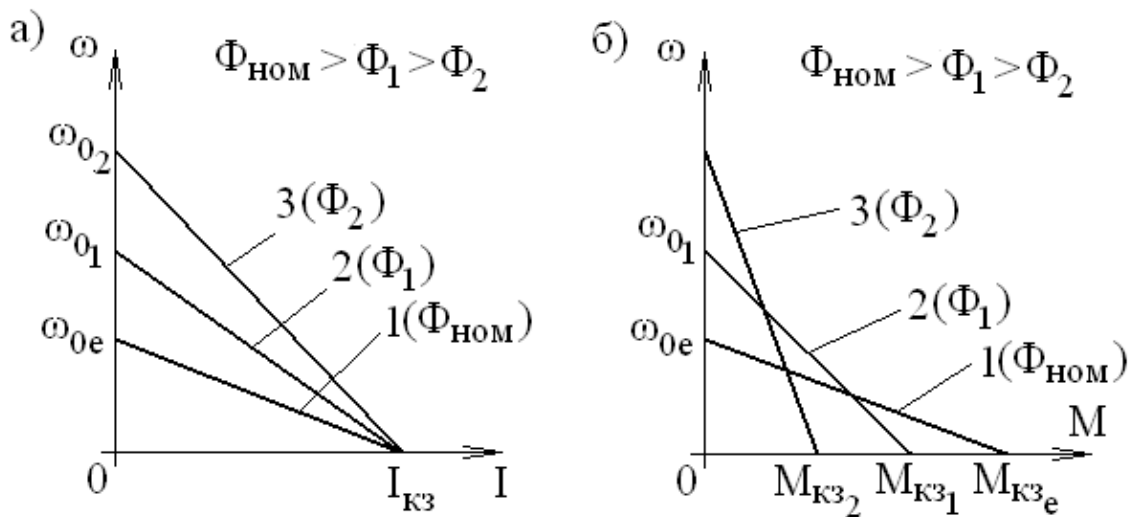


Рисунок 2.11 – Статические характеристики ДПТ НВ при уменьшении магнитного потока

$$\uparrow \omega_0 = \frac{U}{k\Phi \downarrow}, \quad I_{K3} = \frac{U}{R} = \text{const}, \quad \downarrow M_{K3} = k\Phi \downarrow I_{K3}$$

- 1 Диапазон регулирования скорости при данном способе равен 3÷4.
- 2 Направление регулирования скорости – вверх от номинальной.
- 3 Плавность регулирования скорости определяется плавностью регулирования тока возбуждения.
- 4 Стабильность скорости достаточно высокая, хотя она и снижается при уменьшении магнитного потока.
- 5 Способ экономичен, т.к. не сопровождается значительными потерями мощности, а реализация его не требует больших капитальных затрат.

### **2.1.8 Регулирование координат ЭП с ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения**

Данный способ является в настоящее время наиболее эффективным и широко используемым. Обеспечивая большой диапазон регулирования скорости, этот способ является одновременно очень экономичным. По этой причине, этот способ является основным при создании автоматизированных ЭП постоянного тока.

Реализация этого способа предусматривает питание якоря ДПТ НВ от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется по величине и может изменяться при необходимости по полярности. Поскольку основным источником питания ЭП служит сеть переменного тока, то таким преобразователем является управляемый выпрямитель (УВ). Схема ЭП при питании якоря двигателя от управляемого выпрямителя показана на рисунке 2.12,а.

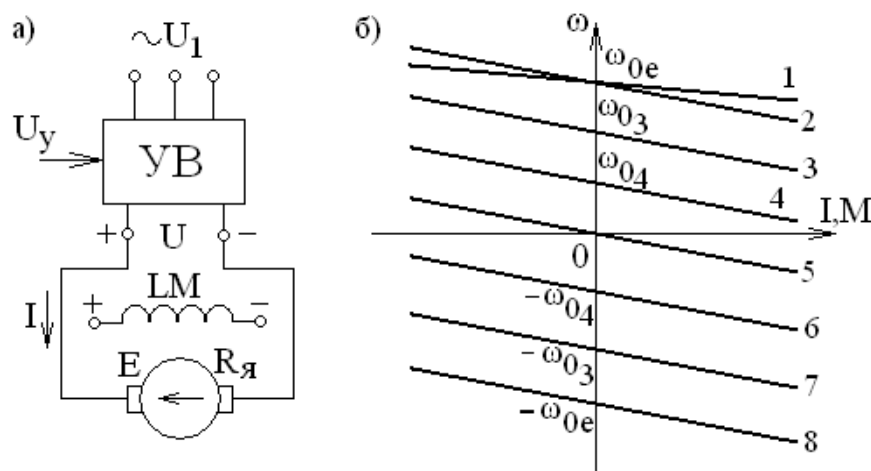


Рисунок 2.12 – Регулирование скорости ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения

- а) Схема питания якоря ДПТ от управляемого выпрямителя
- б) Статические характеристики

Управляемый выпрямитель УВ характеризуется величиной ЭДС  $E_{\Pi}$ , а также внутренним сопротивлением  $R_{\Pi}$ .

Напряжение на выходе управляемого выпрямителя определяется выражением:

$$U = E_{\Pi} - IR_{\Pi} \quad (1)$$

Выражения электромеханической (2) и механической (3) характеристик ДПТ НВ при регулировании напряжения на якоре с помощью УВ получаем из математического выражения электромеханической и механической характеристик ДПТ НВ, путём подстановки в них формулы (1).

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{k\Phi_H} - \frac{I(R_{\text{я}} + R_{\Pi})}{k\Phi_H} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{k\Phi_H} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\Pi})}{(k\Phi_H)^2} \quad (3)$$

Статические характеристики системы «управляемый выпрямитель – двигатель» приведены на рисунке 2.12,б. Характеристика 1 является естественной, а остальные – искусственные. Естественная характеристика построена при питании якоря ДПТ НВ от источника с нулевым внутренним сопротивлением, поэтому она имеет меньший наклон по сравнению с искусственными характеристиками. При изменении  $E_{\Pi}$  пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ . Характеристики располагаются во всех четырёх квадрантах параллельно друг другу. При  $E_{\Pi} = 0$  (характеристика 5) ДПТ работает в режиме динамического торможения.

Характеристики 2-8 построены соответственно при следующих значениях ЭДС управляемого выпрямителя.

$$E_{\Pi 2} > E_{\Pi 3} > E_{\Pi 4}; \quad E_{\Pi 5} = 0; \quad E_{\Pi 6} = -E_{\Pi 4}; \quad E_{\Pi 7} = -E_{\Pi 3}; \quad E_{\Pi 8} = -E_{\Pi 2}.$$

Управляемый выпрямитель обычно выполняется в виде электромашинной системы «генератор–двигатель» или системы «тиристорный преобразователь–двигатель».

### **2.1.9 Система «генератор – двигатель»**

В этой системе якорь 4 двигателя непосредственно присоединен к якору 3 генератора, который вместе с приводным двигателем 1 образует электромашинный выпрямитель 2 трехфазного переменного тока в постоянный (рисунок 2.13).

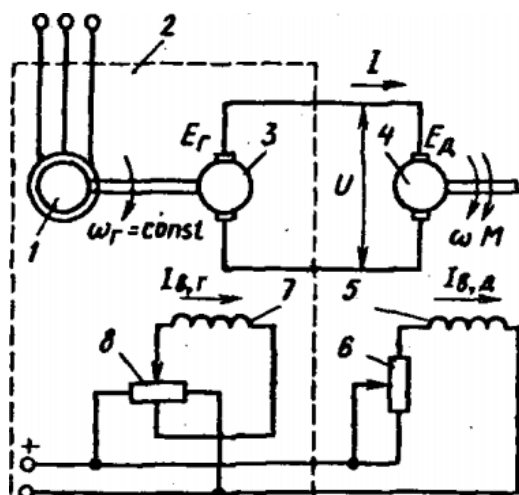


Рисунок 2.13 – Система «генератор – двигатель»

Регулирование напряжения на якоре ДПТ происходит за счет изменения тока возбуждения генератора  $I_{вг}$ , при регулировании которого с помощью потенциометра 8 изменяется ЭДС генератора  $E_g$  и соответственно напряжение на якоре двигателя  $U$ . Регулирование напряжения в этой системе может сочетаться с воздействием на магнитный поток двигателя, что обеспечивает двухзонное регулирование скорости. Регулирование магнитного потока двигателя осуществляется за счет включения в цепь обмотки 5 возбуждения двигателя резистора 6. В замкнутых ЭП питание обмотки 7 возбуждения генератора происходит от регулируемого источника постоянного тока, например, полупроводникового УВ. Характеристики системы «генератор – двигатель» соответствуют рис. 2.12, б.

Достоинства системы:

- 1 Плавность и большой диапазон регулирования скорости.
- 2 Высокая жесткость и линейность характеристик.
- 3 Возможность получения всех энергетических режимов работы ДПТ.

Недостатки:

- 1 Низкий КПД.
- 2 Инерционность процесса регулирования.
- 3 Необходимость в обслуживании.
- 4 Повышенный шум при работе.

### 2.1.10 Система «тиристорный преобразователь – ДПТ»

Принцип действия, свойства и характеристики системы рассмотрим на примере схемы трехфазного нереверсивного мостового управляемого выпрямителя, схема которого приведена на рисунке 2.14.

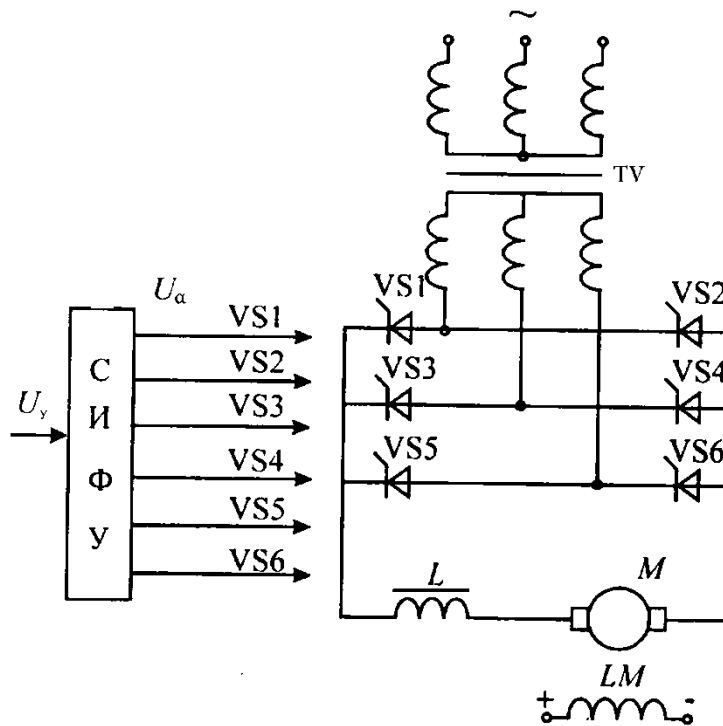


Рисунок 2.14 – Система «тиристорный преобразователь – ДПТ»

Система состоит из согласующего трансформатора TV, шести тиристоров VS1 – VS6, сглаживающего дросселя L и системы импульсно-фазового управления тиристорами СИФУ.

Регулирование напряжения на якоре двигателя происходит путем изменения среднего значения ЭДС преобразователя  $E_n$ . Это достигается регулированием с помощью СИФУ по сигналу управления  $U_y$  угла  $\alpha$  управления тиристорами.  $\alpha$  – это угол задержки открытия тиристоров относительно момента, когда напряжение на их анодах становится положительным.

$$E_n = E_{\max} m \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{\pi}\right) = E_{cp0} \cdot \cos \alpha$$

где  $m$  – число фаз;

$E_{\max}$  – амплитудное значение ЭДС преобразователя;

$E_{cp0}$  – ЭДС преобразователя при  $\alpha = 0$ .

Статические характеристики системы «тиристорный преобразователь – ДПТ» показаны на рисунке 2.15. Особенностью характеристик является наличие области прерывистого тока с малой жесткостью характеристик (заштрихованная область).

Достоинства системы:

- 1 плавность и широкий диапазон регулирования скорости;
- 2 высокая жесткость характеристик;
- 3 высокий КПД электропривода;

4 бесшумность в работе (по сравнению с электромашинными выпрямителями);

5 не требует обслуживания в процессе эксплуатации.

Недостатки системы:

1 напряжение на якоре и ток имеют пульсирующий характер;

2 необходимость использования сглаживающего дросселя;

3 наличие области прерывистого тока на характеристиках;

4 невысокая помехозащищенность и малая перегрузочная способность по току и напряжению тиристорных преобразователей.

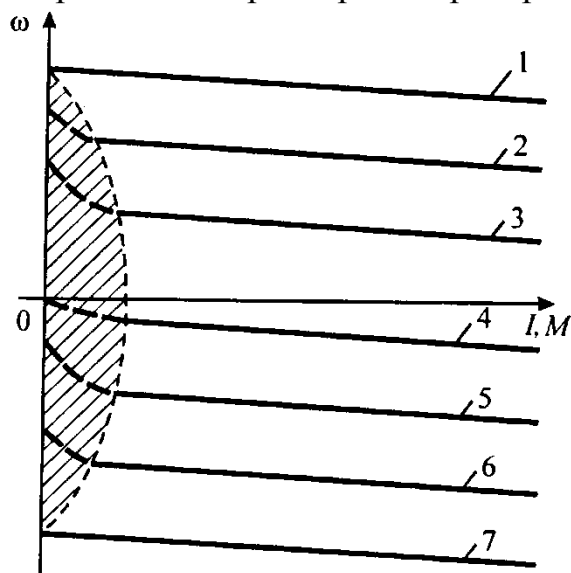


Рисунок 2.15 – Статические характеристики системы «тиристорный преобразователь – ДПТ»

### **2.1.11 Регулирование координат ЭП с ДПТ НВ в системе «источник тока – двигатель»**

Преобразователи со свойствами источника тока характеризуются тем, что выдают в нагрузку мало изменяющийся по величине ток. Двигатель, питаемый от такого преобразователя приобретает специфические свойства и возможности по регулированию координат, в первую очередь момента. Функциональная схема системы «источник тока – двигатель» приведена на рисунке 2.16.

По обмотке якоря протекает постоянный по величине и направлению ток. Величина и направление тока в обмотке возбуждения регулируется по величине положением потенциометра R, а по величине и направлению – с помощью ключей K1 и K2.



Электромеханическая характеристика такой системы имеет вид прямой вертикальной линии (рисунок 2.17,а). Ток якоря и момент двигателя связаны между собой линейной зависимостью:

$$M = k\Phi I$$

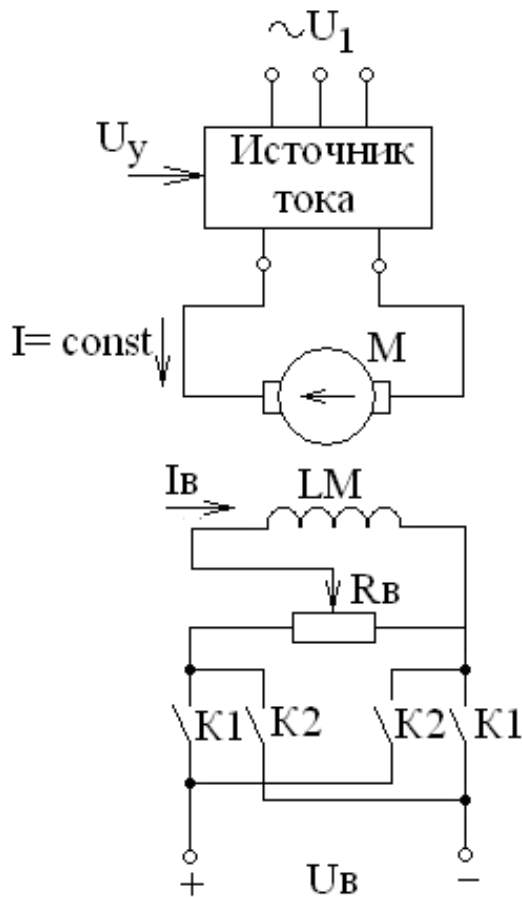


Рисунок 2.16 – Система «источник тока – двигатель»

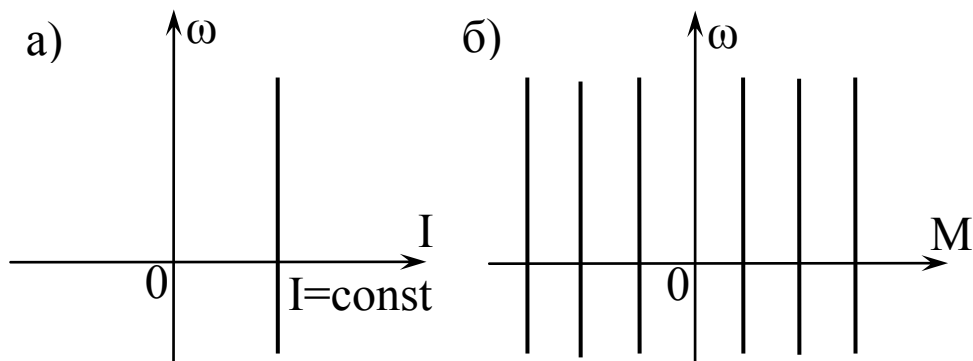


Рисунок 2.17 – Статические характеристики системы «источник тока – двигатель»

Таким образом, при постоянном токе якоря на величину и направление момента двигателя влияет только величина и направление магнитного потока, определяемые величиной и направлением тока в обмотке возбуждения. Следовательно, механические характеристики системы будут иметь вид прямых вертикальных линий, положение которых справа или слева от оси скорости определяется направлением магнитного потока, а ближе или дальше от оси – его величиной (рисунок 2.17,б).

Таким образом, двигатель при питании якоря от источника тока приобретает свойства источника момента, управляемого по цепи возбуждения.

### ***2.1.12 Импульсное регулирование координат ЭП с ДПТ НВ***

Применение импульсного способа регулирования скорости ЭП позволяет в ряде случаев упростить его силовую схему и повысить надёжность его работы. Этот способ является практически единственным при питании двигателя от нерегулируемого источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, неуправляемого выпрямителя и т.д.).

Регулирование скорости в этом случае осуществляется импульсным (периодическим) изменением напряжения, магнитного потока или добавочного сопротивления в якорной цепи. Импульсное регулирование указанных параметров осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых ключей. Основным показателем работы ключа является заполнение (скважность его работы), определяемая отношением времени замкнутого состояния ключа ( $t_3$ ) к периоду его коммутации ( $T_k$ )

$$\gamma = \frac{t_3}{T_k} = \frac{t_3}{t_3 + t_0},$$

где  $t_0$  – время разомкнутого состояния ключа.

Существует два способа управления ключом – широтно-импульсный и частотно-импульсный. При широтно-импульсном способе  $T_k = \text{const}$ ,  $t_3 = \text{var}$  (изменяется). При частотно-импульсном способе  $T_k = \text{var}$ ,  $t_3 = \text{const}$ .

#### ***Импульсное регулирование сопротивления в цепи якоря.***

Осуществляется путём периодической коммутации по определенному закону ключа К, включённого параллельно резистору с сопротивлением  $R_d$  (рисунок 2.18,а).

Семейство механических характеристик ДПТНВ при импульсном регулировании получим, проанализировав граничные режимы работы ключа К: его постоянно разомкнутое и постоянно замкнутое состояния. При  $\gamma = 1$  резистор выведен из цепи якоря и двигатель работает на естественной механической характеристике 1. Если  $\gamma = 0$ , резистор 2 введен в цепь якоря и двигатель работает по искусственной характеристике 4. При  $0 < \gamma < 1$

механические характеристики 2 и 3 располагаются между двумя граничными характеристиками (рисунок 2.18,б).

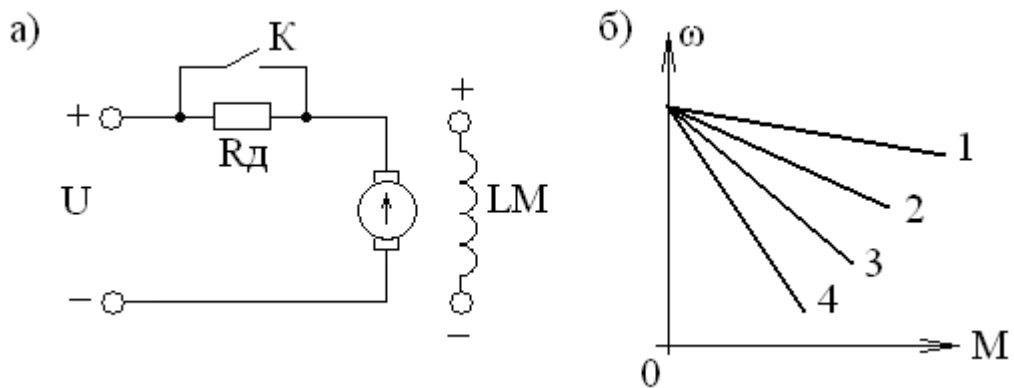


Рисунок 2.18 – Импульсное регулирование добавочного сопротивления в цепи якоря

Математическое выражение для семейства характеристик, показанных на рис. 2.18,б, будет выглядеть следующим образом:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{я} + R_{д}(1 - \gamma))}{(k\Phi)^2}$$

**Импульсное регулирование магнитного потока двигателя.** Схема для данного способа представлена на рисунке 2.19,а. В цепь обмотки возбуждения ДПТ НВ включен резистор  $R_B$ , шунтированный управляемым ключом К. При  $\gamma = 1$  ключ замкнут, по обмотке возбуждения протекает номинальный ток, и двигатель работает на естественной характеристике 1. При  $\gamma = 0$  ключ разомкнут, ток возбуждения и магнитный поток уменьшены, чему соответствует искусственная характеристика 4. При  $0 < \gamma < 1$  механические характеристики 2 и 3 располагаются между двумя граничными характеристиками (рисунок 2.19,б).

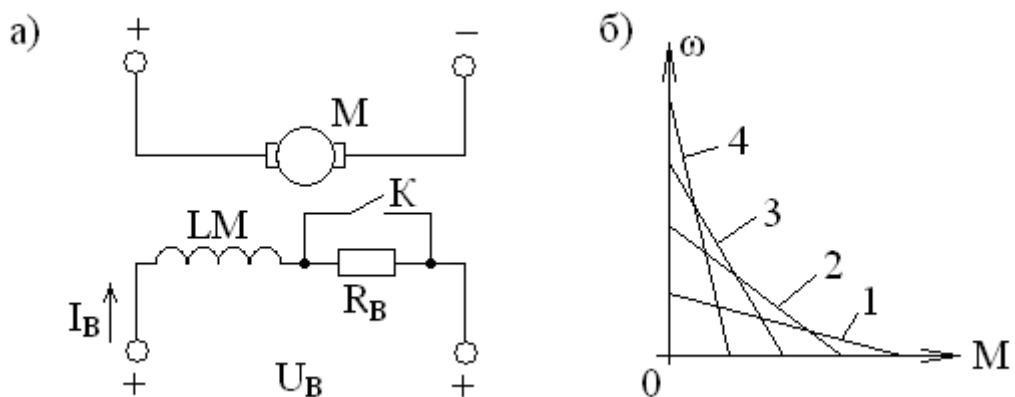


Рисунок 2.19 – Импульсное регулирование магнитного потока

**Импульсное регулирование напряжения на якоре ДПТ НВ.** Ключом К якорь периодически подключается к источнику питания U (рисунок 2.20,а). При

замкнутым ключом К ток в якоре протекает под действием напряжения источника U, а при разомкнутом – под действием ЭДС якоря через диод.

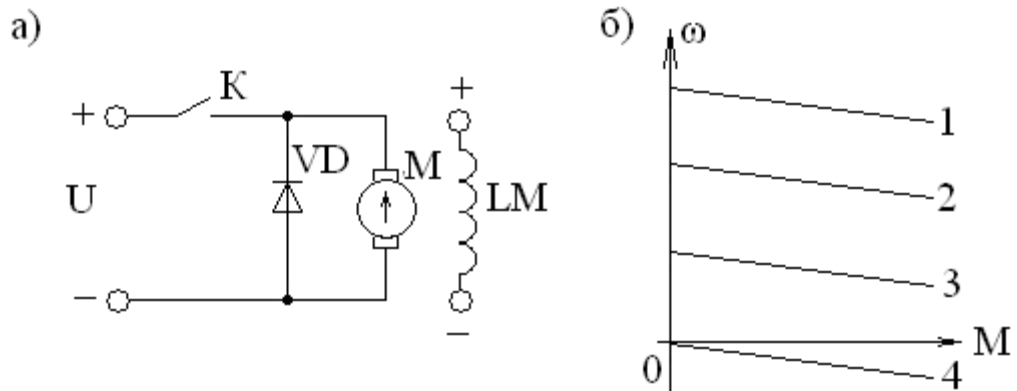


Рисунок 2.20 – Импульсное регулирование напряжения на якоре

При  $\gamma = 1$  на якорь подается полное напряжение источника, чему соответствует работа двигателя на естественной характеристике 1. При  $\gamma = 0$  ключ разомкнут, напряжение на якорь не подается, и двигатель работает на характеристике 4 в режиме динамического торможения. При  $0 < \gamma < 1$  механические характеристики 2 и 3 располагаются между двумя граничными характеристиками (рисунок 2.20,б) и описываются следующим выражением:

$$\omega = \frac{\gamma U}{k\Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{(k\Phi)^2}.$$

### 2.1.13 Расчет регулировочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ

Если известны естественная характеристика двигателя и его паспортные данные, и требуется рассчитать сопротивление резистора, при включении которого в цепь якоря требуемая искусственная характеристика пройдет через точку с заданными координатами  $A(\omega_{\text{и}}, M_{\text{и}})$ , то поставленная задача легче всего может быть решена методом пропорций или методом отрезков.

**Метод пропорций.** Основан на формуле для статического перепада скорости электропривода:

$$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (1)$$

Запишем отношение перепадов скоростей электропривода при токе  $I_{\text{и}}$  или моменте  $M_{\text{и}}$  на естественной и требуемой искусственных характеристиках:

$$\frac{\Delta\omega_{\text{Е}}}{\Delta\omega_{\text{И}}} = \frac{\frac{I_{\text{и}} R_{\text{я}}}{k\Phi}}{\frac{I_{\text{и}} (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}} = \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \quad (2)$$

Из этой формулы выразим искомое  $R_D$ :

$$R_D = R_{\text{я}} \left( \frac{\Delta\omega_{\text{И}}}{\Delta\omega_{\text{Е}}} - 1 \right) \quad (3)$$

Перепады скорости на естественной и требуемой искусственной характеристиках показаны на рисунке 2.21,а.

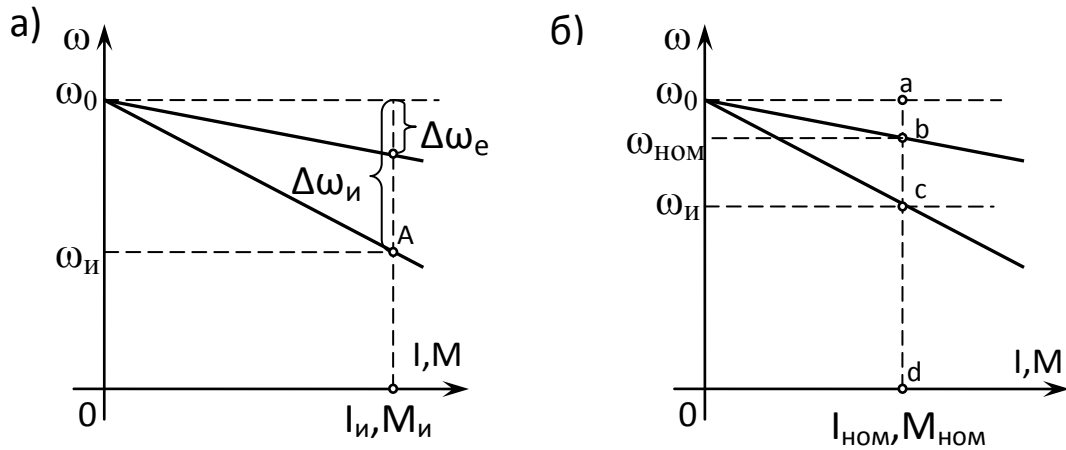


Рисунок 2.21 – Расчёт регулировочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ

**Метод отрезков.** Этот метод в отличие от метода пропорций не требует данных о сопротивлении якоря двигателя, а позволяет при необходимости рассчитать его по известной естественной характеристике. Скорость на требуемой искусственной характеристике при номинальных значениях тока, момента, напряжения на якоре и магнитного потока определяется по формуле:

$$\omega_{\text{И}} = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi_{\text{H}}} - \frac{I_{\text{H}}R}{(k\Phi_{\text{H}})^2} \quad (4)$$

где  $R = R_{\text{я}} + R_D$  - общее сопротивление якорной цепи.

$$\omega_{\text{И}} = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi_{\text{H}}} \left( 1 - \frac{I_{\text{H}}R}{U_{\text{H}}} \right) \quad (5)$$

Учитывая, что  $\frac{U_{\text{H}}}{k\Phi_{\text{H}}} = \omega_0$  и обозначив  $\frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}} = R_{\text{H}}$ , получим

$$\omega_{\text{И}} = \omega_0 \left( 1 - \frac{R}{R_{\text{H}}} \right) \quad (6)$$

Откуда

$$R = R_{\text{H}} \frac{\omega_0 - \omega_{\text{И}}}{\omega_0} = R_{\text{H}} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (7)$$

$$\frac{R}{R_{\text{H}}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \delta \quad (8)$$

Формула (8) отражает важное свойство ДПТ НВ: *относительный перерпад скорости равен относительному активному сопротивлению цепи якоря.*

Пропорцию (8) удобно решать с помощью характеристик, для чего обратимся к рисунку 2.21,б. Обозначим на характеристике точки a,b,c,d и отметим, что  $\omega_0 - \omega_H = \Delta\omega = ac$ ,  $\omega_0 = ad$ . Тогда

$$R = R_H \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = R_H \frac{ac}{ad} \quad (9)$$

$$R_D = R_H \frac{bc}{ad} \quad (10)$$

$$R_Y = R_H \frac{ab}{ad} \quad (11)$$

Таким образом, для определения  $R_D$  необходимо по характеристикам определить длины отрезков bc и ad при номинальном токе или моменте, рассчитать номинальное сопротивление и по формуле (10) найти  $R_D$ .

## **2.2 Электроприводы с двигателями постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения**

### **2.2.1 Схема включения, статические характеристики и режимы работы ДПТ последовательного возбуждения**

В электроприводах электрического транспорта и ряда подъемных механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Основной особенностью данного двигателя является включение обмотки якоря последовательно с обмоткой возбуждения (рисунок 2.22,а), вследствие чего ток якоря является одновременно и током возбуждения, что существенно сказывается на свойствах и характеристиках двигателя.

Формулы электромеханической и механической характеристик двигателя имеют следующий вид:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (2)$$

где  $R$  – общее сопротивление якорной цепи, Ом.

$$R = R_Y + R_{OB} + R_D.$$

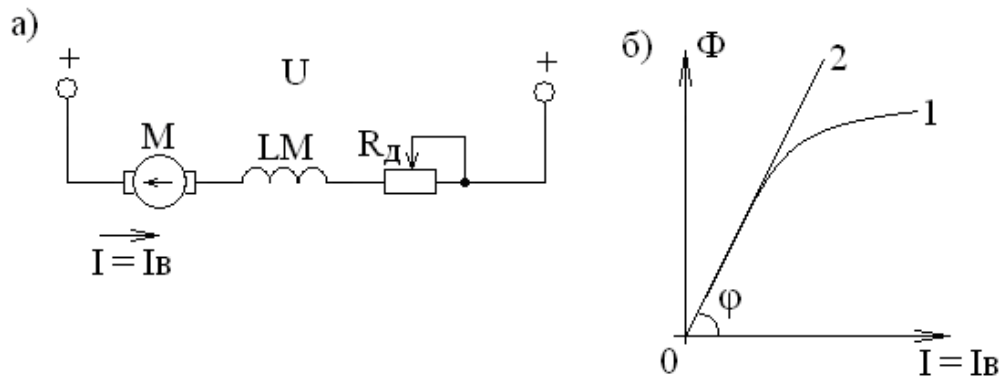


Рисунок 2.22 – Схема включения (а) и характеристики намагничивания (б) ДПТ последовательного возбуждения

Магнитный поток и ток связаны между собой кривой намагничивания 1 (рисунок 2.22,б), которую в простейшем случае можно аппроксимировать (приблизительно заменить) прямой линией 2, что позволит описать ее следующим выражением:

$$\Phi = \alpha I \quad (3)$$

где  $\alpha = \operatorname{tg} \varphi$ .

Подставив (3) в (1), получим формулу, описывающую электромеханическую характеристику ДПТ последовательного возбуждения:

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha} \quad (4)$$

Момент и ток в ДПТ связаны следующей зависимостью:

$$M = k\Phi I \quad (5)$$

Подставив (3) в (5) и выразив ток, получаем:

$$I = \sqrt{\frac{M}{k\alpha}} \quad (6)$$

Подставляем это выражение в (4) и получаем формулу механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha} \quad (7)$$

Для изображения статических характеристик проведем краткий анализ формул (4) и (7). При  $I \rightarrow 0$  и  $M \rightarrow 0$  как видно из этих формул, скорость будет стремиться к бесконечности. А при  $I \rightarrow \infty$  и  $M \rightarrow \infty$  значение скорости будет стремиться к некоторому значению  $\omega \rightarrow -\frac{R}{k\alpha}$ .

Общий вид статических характеристик ДПТ последовательного возбуждения показан на рисунке 2.23.

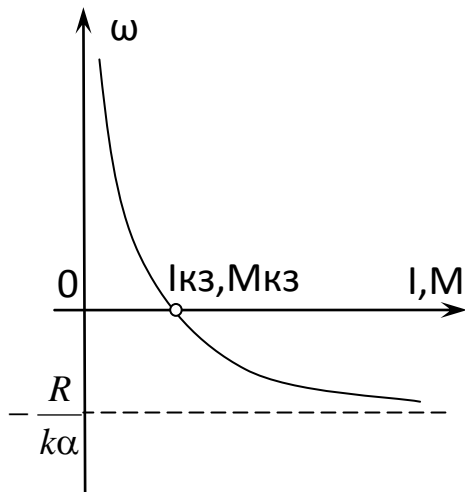


Рисунок 2.23 – Статические характеристики ДПТ последовательного возбуждения

Из характеристик видно, что в основной схеме включения у ДПТ последовательного возбуждения не существует режимов идеального холостого хода и рекуперативного торможения, так как отсутствуют участки характеристик во втором квадранте. Остальные режимы работы аналогичны режимам работы ДПТ НВ.

Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения может осуществляться с помощью добавочных резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока двигателя и подводимого к нему напряжения.

### ***2.2.2 Торможение ЭП с ДПТ последовательного возбуждения***

Для осуществления принудительного электрического торможения электропривода двигатель должен быть переведен в генераторный режим работы. В ДПТ последовательного возбуждения может быть реализовано динамическое торможение и торможение противовключением.

**Динамическое торможение.** Этот режим может быть реализован по двум схемам – с независимым возбуждением (по схеме динамического торможения ДПТ НВ) и с самовозбуждением. Схемы и характеристики для этих режимов показаны на рисунке 2.24 и 2.25. Характеристика 1 на рисунке 2.24 соответствует динамическому торможению с независимым возбуждением, характеристика 2 – динамическому торможению при самовозбуждении.



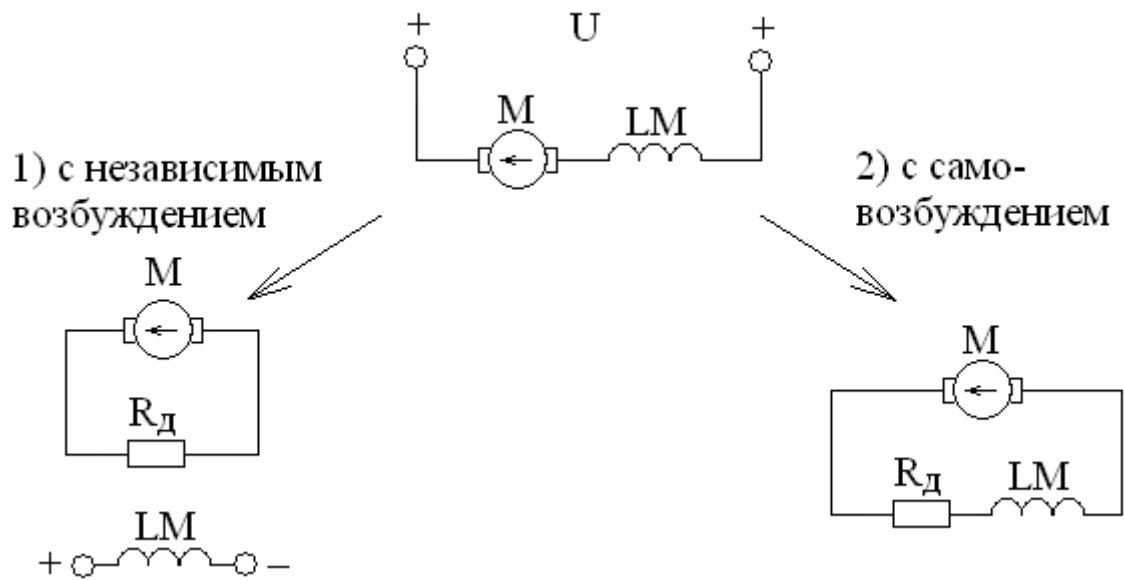


Рисунок 2.24 – Схемы динамического торможения ДПТ последовательного возбуждения

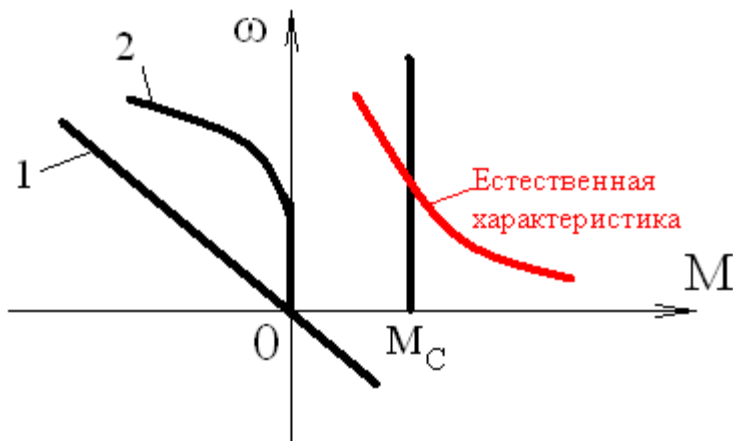


Рисунок 2.25 – Механические характеристики при динамическом торможении ДПТ последовательного возбуждения

**Торможение противовключением.** Этот режим осуществляется изменением полярности напряжения на обмотке якоря при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения (или наоборот). Схема включения двигателя при этом показана на рисунке 2.26.

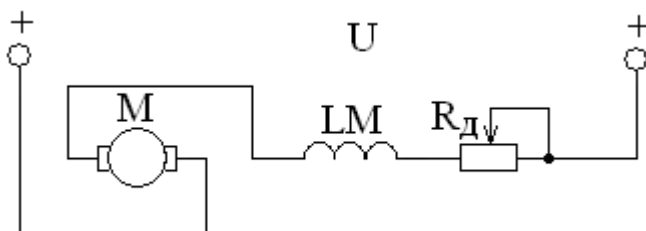


Рисунок 2.26 – Схема торможения противовключением ДПТ последовательного возбуждения

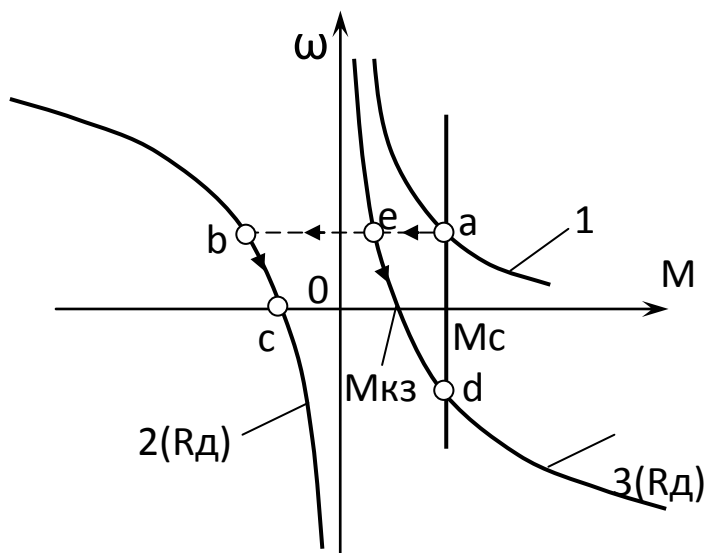


Рисунок 2.27 – Механические характеристики при торможении противовключением ДПТ последовательного возбуждения

Процесс торможения двигателя показан на рисунке 2.27. Пусть до торможения двигатель работал на характеристике 1 в точке а с моментом нагрузки  $M_c$ . Поле переключения полярности напряжения и ввода в цепь якоря токоограничивающего резистора  $R_d$ , двигатель перейдет на характеристику 2 в точку b. Участок bc будет соответствовать режиму торможения противовключением. В точке c двигатель останавливается и схема управления отключает его от сети.

Торможение противовключением может быть также реализовано в электроприводе при активном характере момента нагрузки  $M_c$ , который должен быть больше момента короткого замыкания двигателя. Допустим, что до торможения двигатель работал на характеристике 1 в точке а с активным моментом нагрузки  $M_c$ . Если теперь, не изменяя полярность напряжения, ввести в цепь якоря добавочное сопротивление  $R_d$ , то двигатель будет иметь характеристику вида 3 и перейдет в точку e этой характеристики. Так как момент двигателя при этом становится меньше момента нагрузки, то в соответствии с основным уравнением движения электропривода двигатель начнет сначала тормозиться, а затем под действием активной нагрузки разгонится в противоположном направлении до точки d, в которой момент двигателя сравняется с моментом нагрузки. Двигатель при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

## Раздел 3 Электроприводы с двигателями переменного тока

### 3.1 Электроприводы с асинхронными двигателями

#### 3.1.1 Схемы включения АД

Схемы включения АД с фазным и короткозамкнутым ротором представлены на рисунке 3.1.

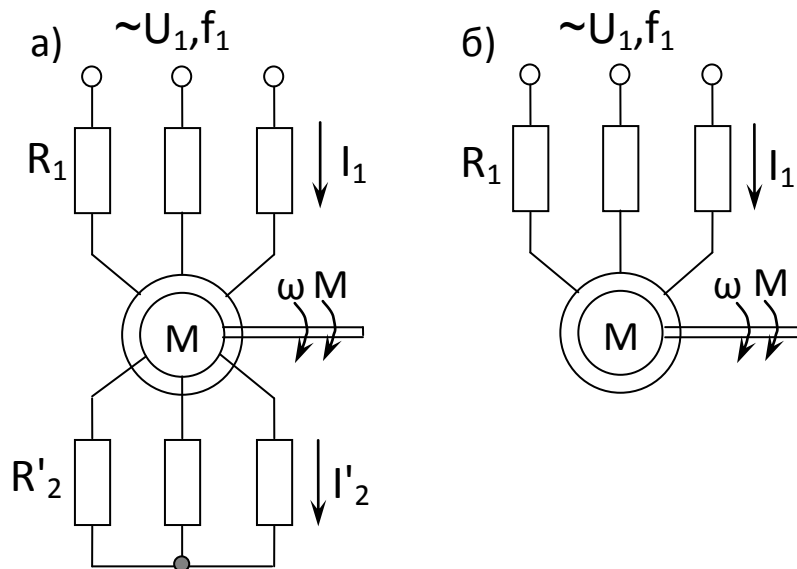


Рисунок 3.1 – Схемы включения АД

Трехфазный АД имеет трехфазную обмотку статора, которая подключается к сети переменного тока и создаёт в двигателе вращающееся магнитное поле, и обмотку ротора, которая может быть выполнена по двум вариантам. Первый вариант – это фазный ротор, его обмотка выполнена из медного провода и имеет выводы на три контактных кольца, с помощью которых осуществляется контакт с внешними цепями. Двигатель с таким ротором имеет дополнительные возможности по регулированию координат, в первую очередь момента, схема его включения приведена на рисунке 3.1,а.

Второй вариант – АД с короткозамкнутым ротором. Его обмотка выполняется заливкой алюминия в пазы сердечника ротора и представляет собой конструкцию типа “белчье колесо”. Двигатель с короткозамкнутым ротором является более простым, дешевым и надежным. Схема его включения приведена на рисунке 3.1,б.

### 3.1.2 Схема замещения АД

Для получения выражений электромеханической и механической характеристик АД используется его схема замещения, в которой ток, ЭДС и параметры цепи ротора приведены к цепи статора, что позволяет изобразить эти две цепи на схеме электрически связанными, хотя в действительности связь между ними осуществляется через электромагнитное поле. Приведение параметров производится с помощью коэффициента трансформации АД по ЭДС.

На рисунке 3.2 представлена П-образная схема замещения АД.

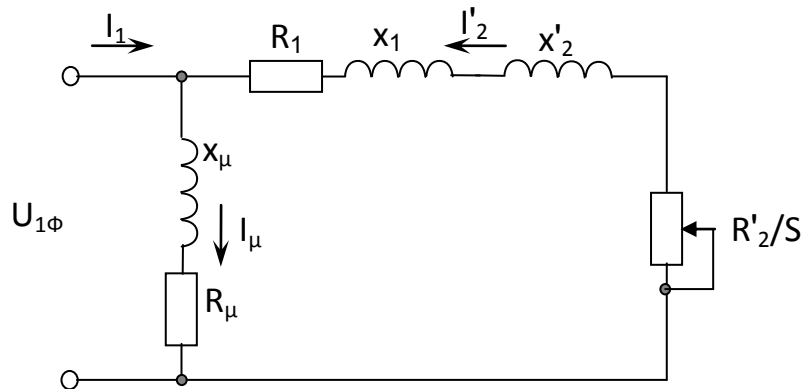


Рисунок 3.2 – П-образная схема замещения АД

В дальнейшем эта схема используется для вывода формул статических характеристик АД. На схеме приняты следующие обозначения:  $U_{1\phi}$  - действующее значение фазного напряжения сети;  $I_1$ ,  $I_\mu$ ,  $I'_2$  - фазные токи статора, намагничивания и приведенный ток ротора;  $R_1$  - суммарное активное сопротивление фазы статора;  $R'_2$  - приведенное суммарное активное сопротивление фазы ротора;  $x_1$  и  $x'_2$  - индуктивные сопротивления фазы статора и приведенное фазы ротора;  $R_\mu$  и  $x_\mu$  - параметры цепи намагничивания;  $S$  - скольжение АД.

Скольжение – это величина, характеризующая разность скоростей (частот) вращения магнитного поля статора АД и ротора.

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100\%,$$

где  $\omega_0$  – скорость вращения магнитного поля статора, рад/с;

$\omega$  – скорость вращения ротора, рад/с;

$n_0$  – частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

$n$  - частота вращения ротора, об/мин.

Скорость и частота вращения магнитного поля статора определяются по формулам

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p},$$

где  $f_1$  – частота подводимого к статору напряжения;  
 $p$  – число пар полюсов АД.

### 3.1.3 Электромеханическая характеристика АД

Эта характеристика описывается выражением, полученным непосредственно из схемы замещения АД:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + x_K^2}}$$

где  $x_K = x_1 + x'_2$  – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

В отличие от ДПТ электромеханическая характеристика АД представляется в виде зависимости приведенного тока ротора от скольжения,  $I'_2 = f(S)$ , а переход к виду  $\omega = f(I'_2)$  осуществляется с помощью формулы  $\omega = \omega_0(1 - S)$ . На рисунке 3.3 представлен общий вид электромеханической характеристики АД.

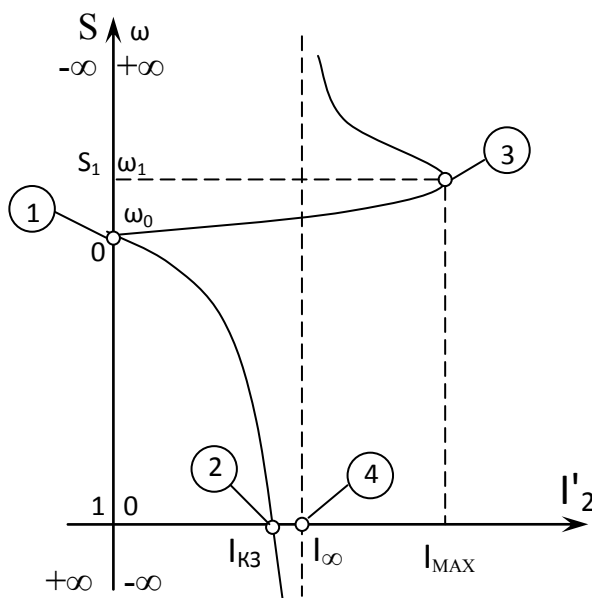


Рисунок 3.3 – Электромеханическая характеристика АД

Рассмотрим ее характерные точки:

1  $S = 0, \omega = \omega_0, I'_2 = 0$  — точка идеального холостого хода;

2  $S=1, \omega=0, I_2' = I_{K3}$  — точка короткого замыкания;

3  $S_1 = -\frac{R_2'}{R_1}, \omega = \omega_0(1-S), I_2' = I_{MAX}$  — точка максимального значения

тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений.

4  $S \rightarrow \pm\infty; \omega \rightarrow \mp\infty; I_2' \rightarrow I_\infty$  - асимптотическое значение тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

### 3.1.4 Механическая характеристика АД

Механическая характеристика АД описывается следующим выражением:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{w_0 S \left( \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + x_K^2 \right)}$$

Исследование данного выражения на экстремум, которое осуществляется приравниванием производной  $dM/dS$  к нулю, дает наличие этой характеристики двух экстремальных значений момента и скольжения:

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2w_0 \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right)}$$

$$S_K = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}}$$

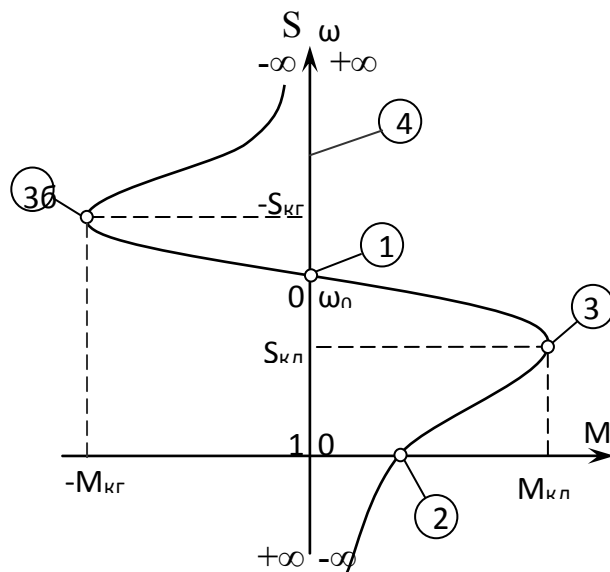


Рисунок 3.4 – Механическая характеристика АД

На рисунке 3.4 представлен общий вид механической характеристики АД.

Рассмотрим ее характерные точки:

1  $S = 0, \omega = \omega_0, M = 0$  – точка идеального холостого хода;

2  $S = 1, \omega = 0, M = M_{КЗ}$  – точка короткого замыкания;

3 а)  $S = S_{КД}, M = M_{КД}$

б)  $S = -S_{КГ}, M = -M_{КГ}$  – точки экстремумов

4  $S \rightarrow \infty, \omega \rightarrow \infty, M \rightarrow 0$  – асимптота механической характеристики.

Часто для расчета рабочего участка механической характеристики используется упрощенная формула Клосса:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}},$$

где  $M_K$  - критический момент АД,

$S_K$  - критическое скольжение.

Критическое скольжение также можно рассчитать через номинальное скольжение и перегрузочную способность АД:

$$S_K = S_H (\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1}),$$

где  $\lambda_m$  - коэффициент, характеризующий перегрузочную способность АД.

$$\lambda_m = \frac{M_K}{M_H}$$

### 3.1.5 Энергетические режимы работы АД

АД может работать во всех энергетических режимах работы, которые определяются величиной и знаком скольжения (рисунок 3.5):

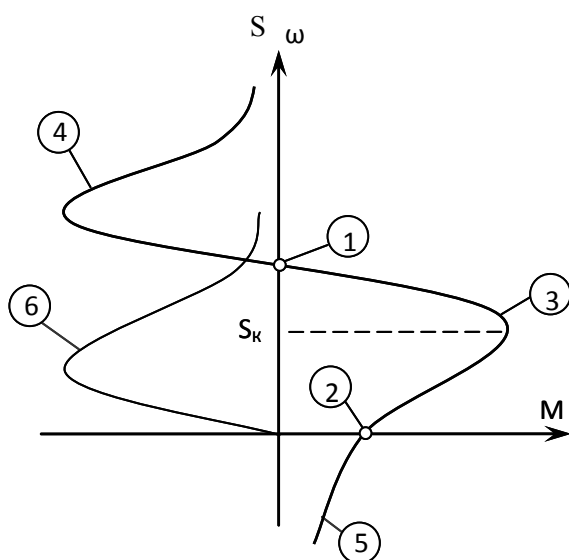


Рисунок 3.5 – Энергетические режимы работы АД

1 Точка 1:  $S = 0, \omega = \omega_0$  – режим идеального холостого хода  
 2 Точка 2:  $S = 1, \omega = 0$  – режим короткого замыкания  
 3 Участок 3:  $0 < S < 1, 0 < \omega < \omega_0$  – двигательный режим работы  
 4 Участок 4:  $S < 0, \omega > \omega_0$  – рекуперативное торможение  
 5 Участок 5:  $S > 1, \omega < 0$  – торможение противовключением  
 6 Участок 6: Динамическое торможение осуществляется отключением обмотки статора от сети переменного тока и подключением ее к источнику постоянного тока. При этом цепь ротора замыкается накоротко или на добавочные сопротивления.

### 3.1.6 Способы регулирования координат АД

- 1 Регулирование токов в роторе и статоре может быть обеспечено:
  - 1.1 Изменением подводимого к статору напряжения;
  - 1.2 С помощью добавочных активных и реактивных сопротивлений в цепях статора и ротора.
- 2 Регулирование скорости и момента АД осуществляется с помощью:
  - 2.1 Изменения величины подводимого к статору напряжения;
  - 2.2 Изменения частоты подводимого напряжения;
  - 2.3 С помощью добавочных активных и реактивных сопротивлений в цепях статора и ротора;
  - 2.4 Изменением числа пар полюсов АД.

### 3.1.7 Регулирование координат АД с помощью резисторов

*Включение резисторов в цепь статора.*

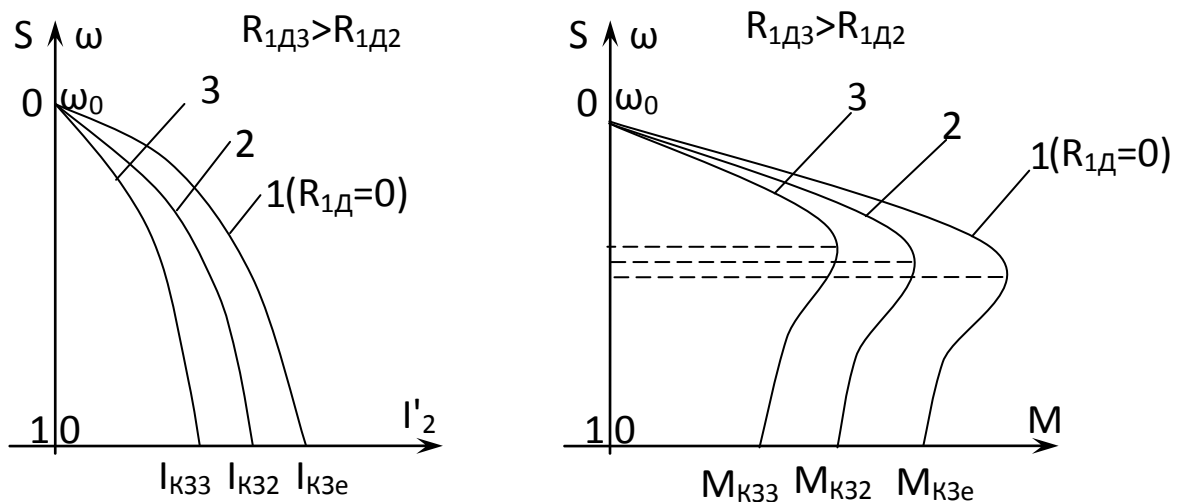


Рисунок 3.6 – Электромеханические и механические характеристики АД при включении резисторов в цепь статора



Применяется чаще всего для ограничения в переходных процессах тока и момента АД с короткозамкнутым ротором. На рисунке 3.6 представлены электромеханические и механические характеристики АД при включении добавочных резисторов в цепь статора.

Характеристика 1 является естественной, остальные – искусственные. Как видно из характеристик скорость идеального холостого хода для всех характеристик остается постоянной.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = const$$

Ток и момент короткого замыкания уменьшаются с увеличением сопротивления в цепи статора.

$$I_{K3} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + x_K^2}}$$

**При включении резисторов в цепь ротора АД** искусственные электромеханические характеристики имеют тот же вид, что и при включении резисторов в цепь статора и могут использоваться для ограничения пускового тока АД (рисунок 3.7).

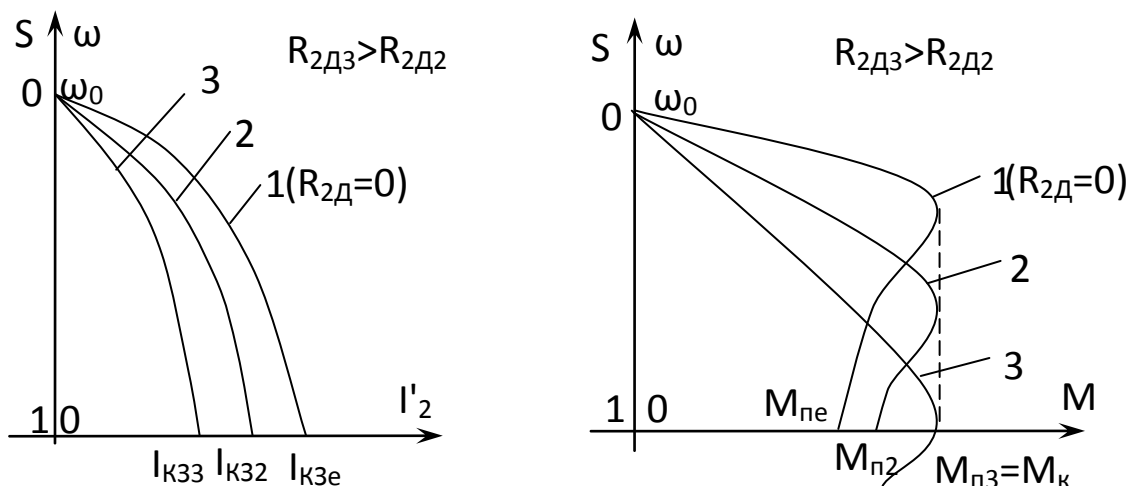


Рисунок 3.7 – Электромеханические и механические характеристики АД при включении резисторов в цепь ротора

За счет изменения  $R_{2д}$  имеется возможность повышать пусковой момент АД вплоть до критического момента без снижения перегрузочной способности двигателя, что важно при регулировании его скорости

$$M_K = const, \lambda_m = \frac{M_K}{M_H} = const$$

### 3.1.8 Регулирование скорости АД изменением подводимого к статору напряжения

Этот способ регулирования скорости является в настоящее время наиболее эффективным и широко используемым. На рисунке 3.8 представлены схема питания АД от регулятора напряжения и механические характеристики АД.

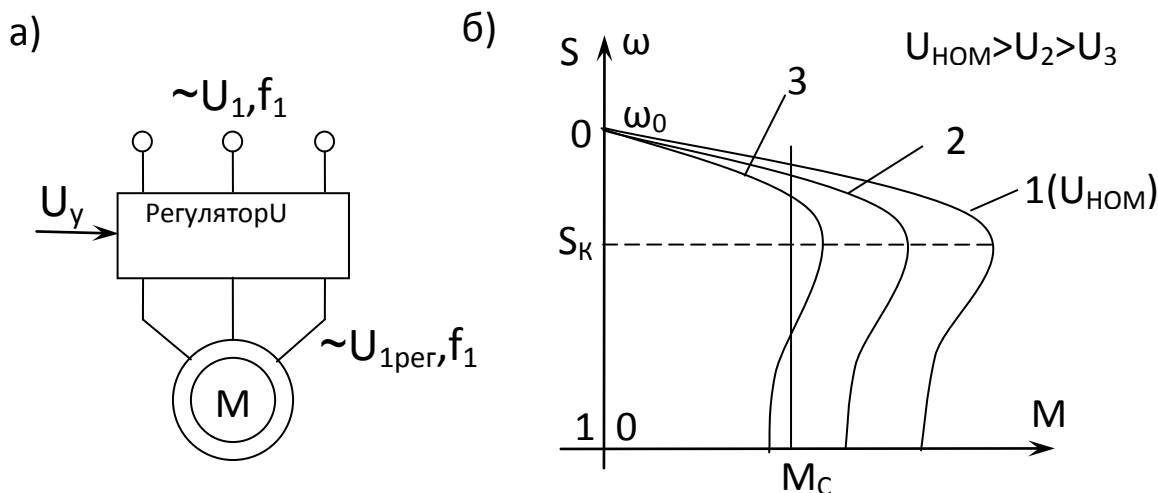


Рисунок 3.8 – Схема регулирования координат АД изменением напряжения на статоре и механические характеристики

Изменяя величину напряжения управления, можно регулировать напряжение на статоре АД в пределах от 0 до номинального значения. При этом частота напряжения остается постоянной. Критическое скольжение для всех характеристик также остается постоянным, а критический момент резко уменьшается (пропорционально квадрату снижения напряжения).

Характеристика 1 является естественной, а остальные искусственными.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = const$$

$$S_K = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}} = const$$

Такие искусственные характеристики могут использоваться для воздействия в переходных процессах на момент АД, в том числе и пусковой. Для регулирования напряжения на статоре чаще всего используются автотрансформаторы, магнитные усилители, а также тиристорные регуляторы напряжения.

Тиристорные регуляторы отличаются высоким КПД, высокой надежностью, простотой в обслуживании и позволяют легко автоматизировать работу ЭП. Схема регулирования напряжения на однофазной нагрузке с

помощью тиристоров и диаграммы, поясняющие принцип работы схемы, показаны на рисунке 3.9.

Кроме регулирования координат тиристорные регуляторы напряжения позволяют осуществить пуск АД, его торможение, а также формирование требуемых динамических характеристик в переходных процессах.

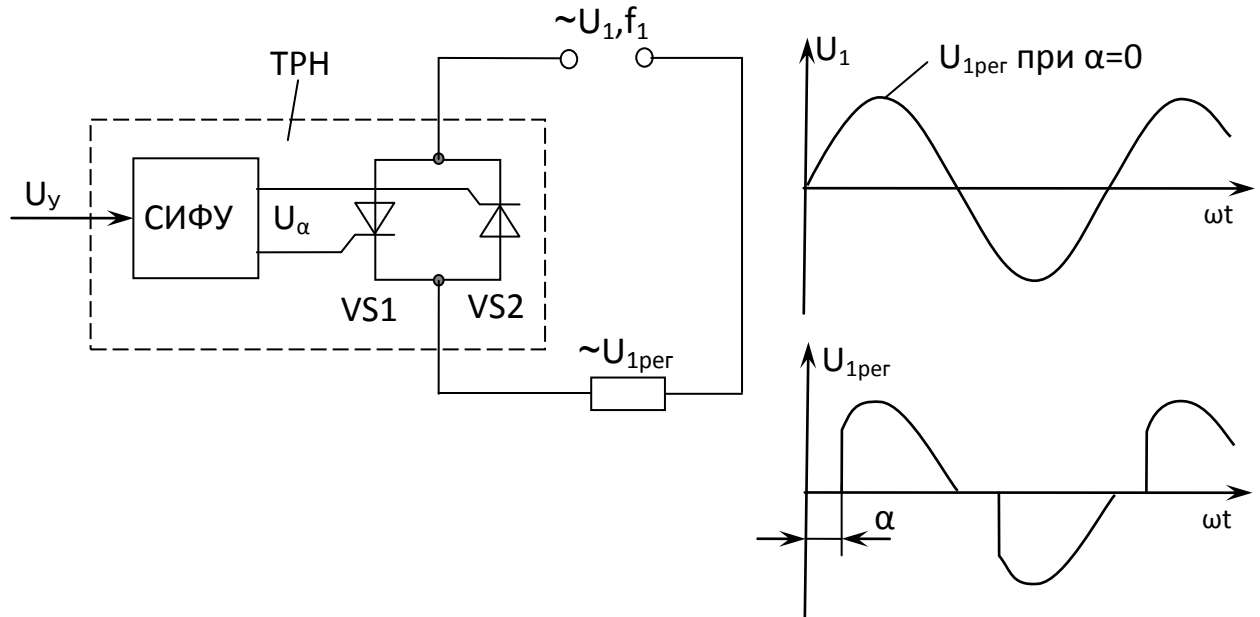


Рисунок 3.9 – Схема регулирования напряжения на однофазной нагрузке

### 3.1.9 Регулирование координат АД изменением частоты подводимого напряжения

Принцип частотного метода основан на том, что изменяя частоту  $f_1$  питающего двигатель напряжения, можно соответственно с формулой

$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$  изменять скорость вращения магнитного поля статора, получая при

этом различные искусственные характеристики.

#### Достоинства способа:

- 1 Широкий диапазон регулирования скорости;
- 2 Плавность регулирования
- 3 Высокая жесткость получаемых характеристик
- 4 Невысокие потери скольжения  $\Delta P_2 = M\omega_0 S$

Для лучшего использования АД и получения высоких энергетических показателей его работы одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое напряжение, закон изменения которого зависит от характера изменения нагрузки.

Преобразователь частоты и напряжения 1 по сигналу управления преобразует входное напряжение стандартных параметров в напряжение с регулируемой частотой и амплитудой (рисунок 3.10,а).

Характеристика 1 (рисунок 3.10,б) является естественной. Она соответствует номинальной частоте питающего напряжения.

Искусственные механические характеристики по своим особенностям делятся на два семейства. Первое – характеристики соответствующие частотам ниже номинальной, для которых критический момент остается постоянным (характеристики 2 и 3). Второе семейство – это характеристики, соответствующие частотам выше номинальной, где критический момент уменьшается с увеличением частоты (характеристики 4 и 5).

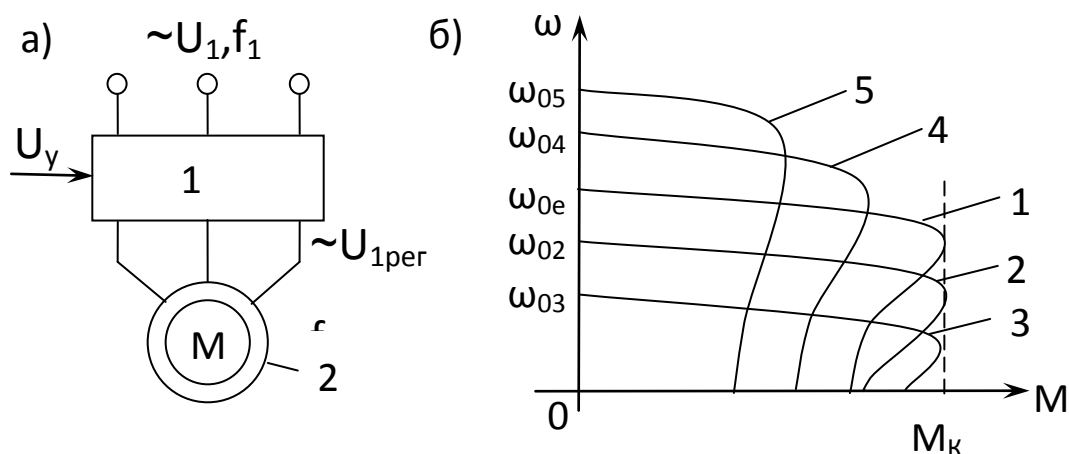


Рисунок 3.10 – Схема и механические характеристики АД при частотном способе регулирования координат

### 3.1.10 Принцип действия преобразователей частоты

Преобразователи частоты (ПЧ) по используемой для их построения элементной базе делятся на электромашинные вращающиеся и статические.

**Электромашинные вращающиеся ПЧ** строятся на базе электрических машин. Рассмотрим схему ПЧ с синхронным генератором (рисунок 3.11).

Преобразователь состоит из двух частей: агрегата постоянной скорости, состоящего из АД 1 и приводимого им генератора постоянного тока 2 и агрегата переменной скорости, состоящего из регулируемого ДПТ 3, приводящего во вращение синхронный генератор переменной частоты 4. Изменением магнитного потока генератора 2 изменяется напряжение на якоре ДПТ 3, а следовательно, и скорость вращения ДПТ и синхронного генератора 4. При этом меняется и частота напряжения на выводах генератора.

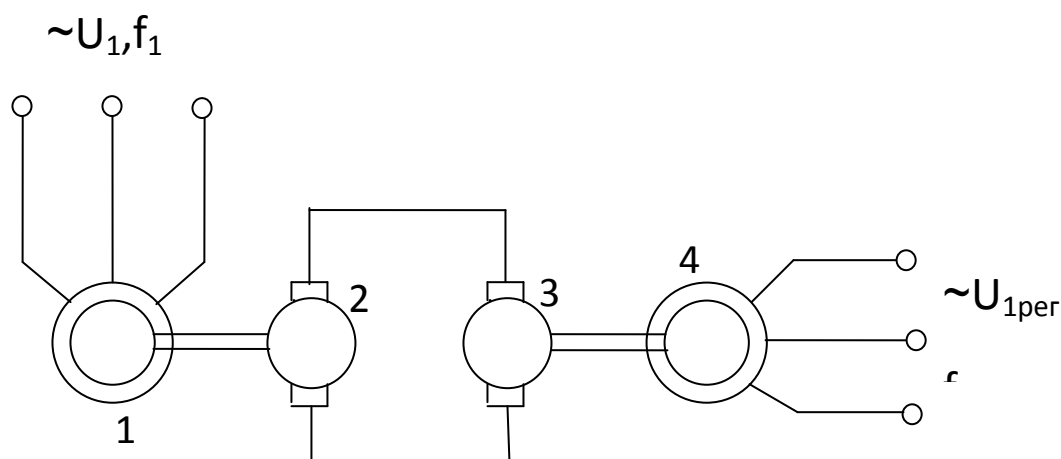


Рисунок 3.11 – Схема ПЧ с синхронным генератором

Достоинства системы:

- 1 Плавность регулирования скорости;
- 2 Широкий диапазон регулирования скорости.

Недостатки:

- 1 Высокие потери и низкий КПД
- 2 Высокая стоимость;
- 3 Громоздкость;
- 4 Необходимость в обслуживании;
- 5 Повышенный шум.

Статические ПЧ строятся на базе элементов и устройств, не имеющих движущихся частей (полупроводниковых приборов, конденсаторов и т.д.) Статические ПЧ делятся на преобразователи без звена постоянного тока и преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока.

Рассмотрим упрощенную функциональную схему преобразователя без звена постоянного тока (рисунок 3.12,а).

Преобразователь состоит из двух частей: силовой части 3, с которой связан АД 4, и блока управления 2. С их помощью осуществляется преобразование электроэнергии переменного тока стандартных параметров в электроэнергию переменного тока с регулируемой частотой и величиной.

Функциональная схема преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока приведена на рисунке 3.12,б. Схема состоит из двух основных блоков: управляемого выпрямителя 2 и управляемого инвертора 3 с блоками управления 1 и 5. Напряжение сети с помощью управляемого выпрямителя 2 сначала преобразовывается в постоянное напряжение  $U_0$ , которое может регулироваться по величине в зависимости от сигнала управления. Далее это регулируемое напряжения поступает на вход управляемого инвертора 3, который преобразовывает его в трехфазное переменное напряжение с регулируемой частотой и величиной. За счет двойного преобразования эта

схема обеспечивает больший диапазон регулирования по сравнению с предыдущей схемой.

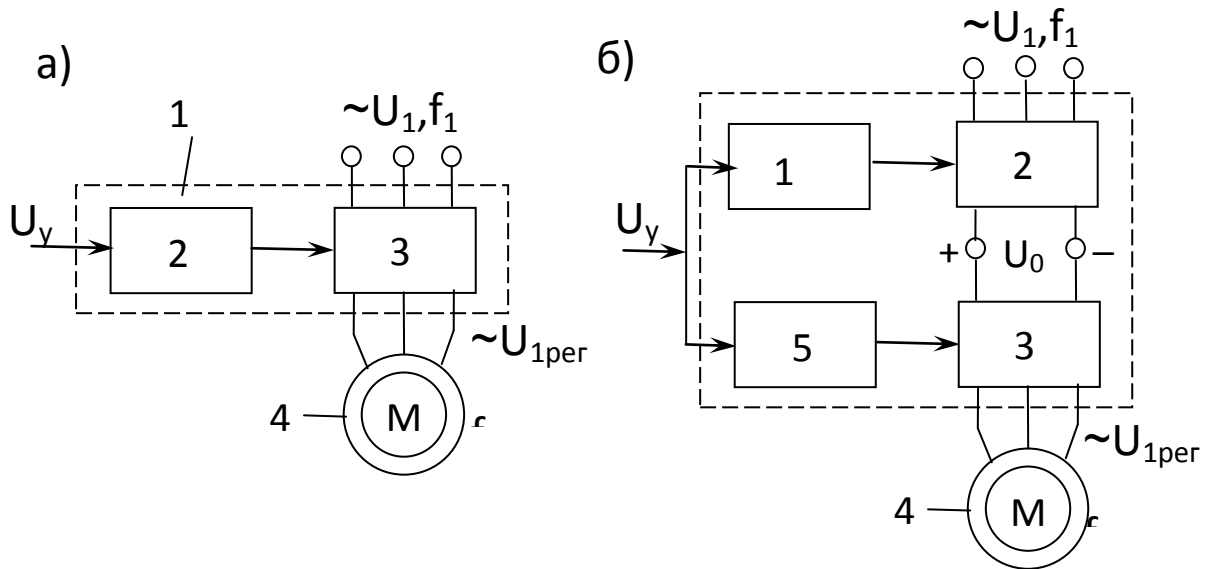


Рисунок 3.12 – Статические преобразователи частоты

### 3.1.11 Регулирование скорости АД изменением числа пар полюсов

Данный способ регулирования скорости может быть реализован только при использовании специальных многоскоростных АД, у которых каждая статорная обмотка состоит из нескольких одинаковых секций, путем разных схем соединения которых может быть изменено число пар полюсов АД.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

В следующей таблице приводятся возможные частоты вращения магнитного поля статора АД в зависимости от числа пар полюсов:

p	1	2	3	4	5	6
n <sub>1</sub> , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Рассмотрим простейший случай переключения секций, когда каждая статорная обмотка состоит из двух одинаковых секций.

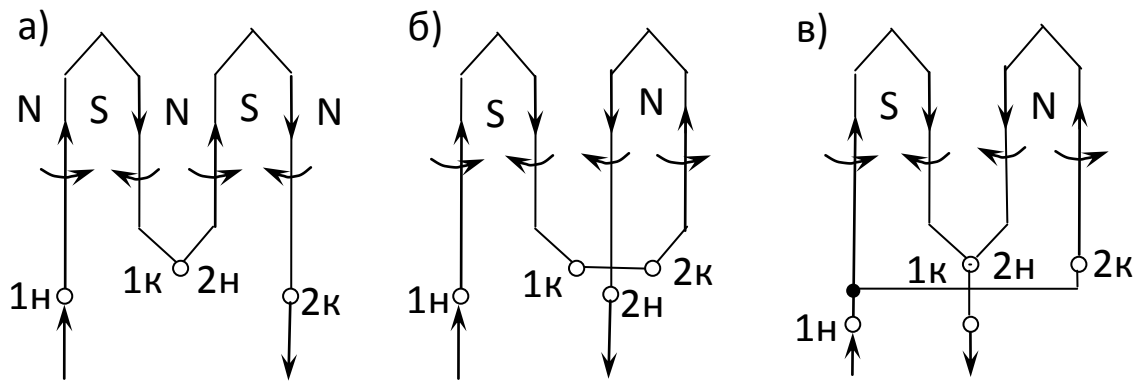


Рисунок 3.13 – Схемы соединения секций статорных обмоток многоскоростных АД при изменении числа пар полюсов

Для определения числа пар полюсов задаемся мгновенным направлением тока в секциях, по правилу буравчика определяем направление магнитных силовых линий и расставляем полюса.

На рисунке 3.13,а секции статорной обмотки соединены последовательно и согласно и число пар полюсов  $p=2$ .

На рисунке 3.13,б секции статорной обмотки соединены последовательно и встречно и  $p=1$ .

На рисунке 3.13,в секции соединены параллельно и  $p=1$ .

На практике наиболее часто используются две схемы переключения секций статорных обмоток многоскоростных АД. Первая – со звезды на двойную звезду (рисунок 3.14,а). Вторая – с треугольника на двойную звезду (рисунок 3.14,б).

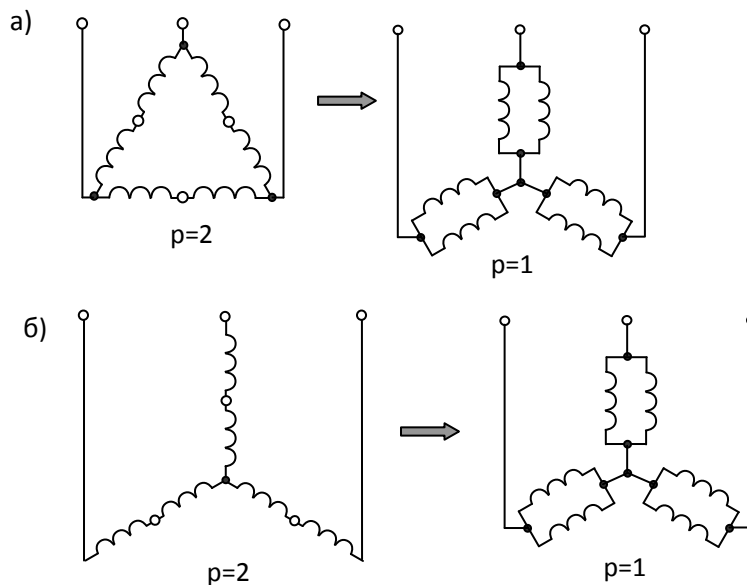


Рисунок 3.14 – Схемы переключения многоскоростных АД

В схемах треугольника и звезды секции соединены последовательно и согласно, а в схеме двойной звезды – параллельно, что вызывает уменьшение числа пар полюсов.

Механические характеристики при таких переключениях представлены на рисунке 3.15.

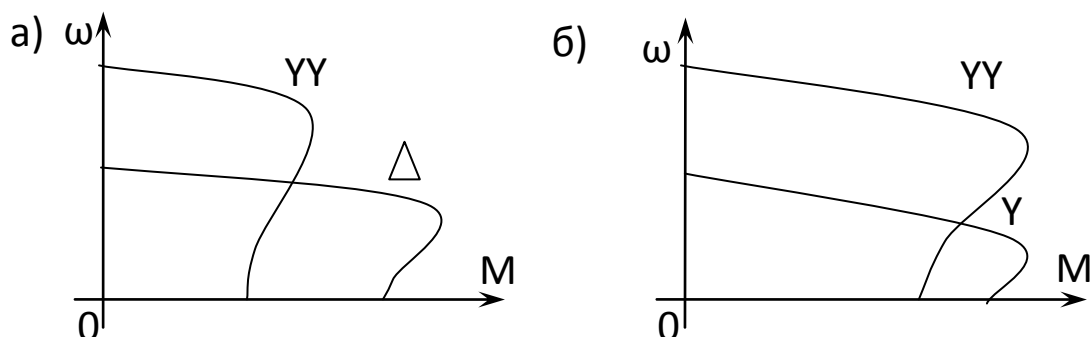


Рисунок 3.15 – Механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов

Достоинства способа:

- 1) Экономичность, так как нет дополнительных потерь энергии.
- 2) Высокая жесткость характеристик.
- 3) Высокая перегрузочная способность.

Недостатки:

- 1) Ступенчатое изменение скорости.
- 2) Небольшой диапазон регулирования скорости.

### ***3.1.12 Регулирование скорости АД в каскадных схемах его включения***

Каскадными называются такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование его скорости, позволяют одновременно полезно использовать энергию потерь скольжения. По способу использования этой энергии различают схемы электромеханического машинно-вентильного каскада и электрического машинно-вентильного каскада.

Рассмотрим схему электромеханического машинно-вентильного каскада (рисунок 3.16).



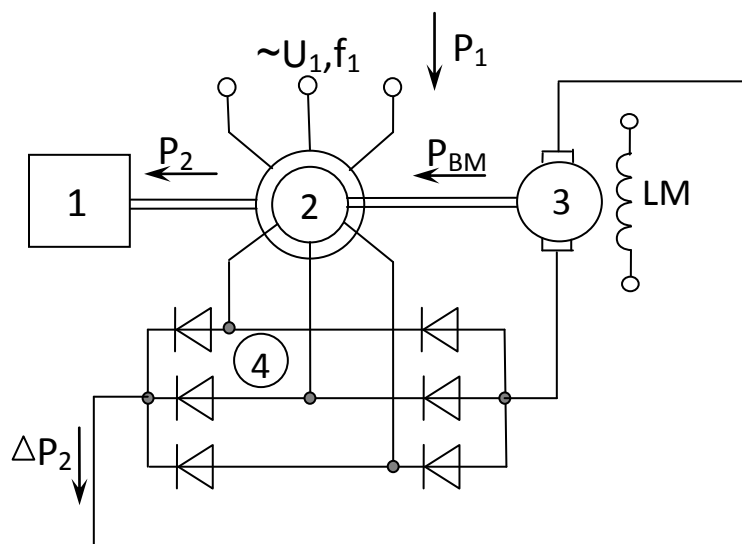


Рисунок 3.16 – Электромеханический машинно-вентильный каскад

Обмотка ротора АД 2, приводящего в движение рабочую машину 1, подключается к трехфазному выпрямителю 4, к выводам которого присоединен якорь вспомогательной машины постоянного тока 3.

В этой схеме поступающая из сети мощность  $P_1$  за вычетом потерь в статоре передается на ротор. Большая часть этой электромагнитной мощности  $M\omega_0$  в виде полезной механической мощности  $M\omega$  отдается в рабочую машину. Разность между этими мощностями и составляют потери скольжения.

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = \frac{M\omega_0(\omega_0 - \omega)}{\omega_0} = M\omega_0 S$$

Потери скольжения выделяются в цепи ротора, с помощью выпрямителя 4 преобразовываются в постоянное напряжение и подаются на якорь вспомогательной машины 3, с помощью которой преобразовываются в механическую энергию и возвращаются на вал рабочей машины 1.

Регулирование скорости в данной схеме осуществляется изменением ЭДС вспомогательной машины 3 путем воздействия на ее ток возбуждения.

В схеме электрического машинно-вентильного каскада (рисунок 3.17) потери скольжения с помощью синхронного генератора 5 преобразовываются в электроэнергию и отдаются в питающую сеть.

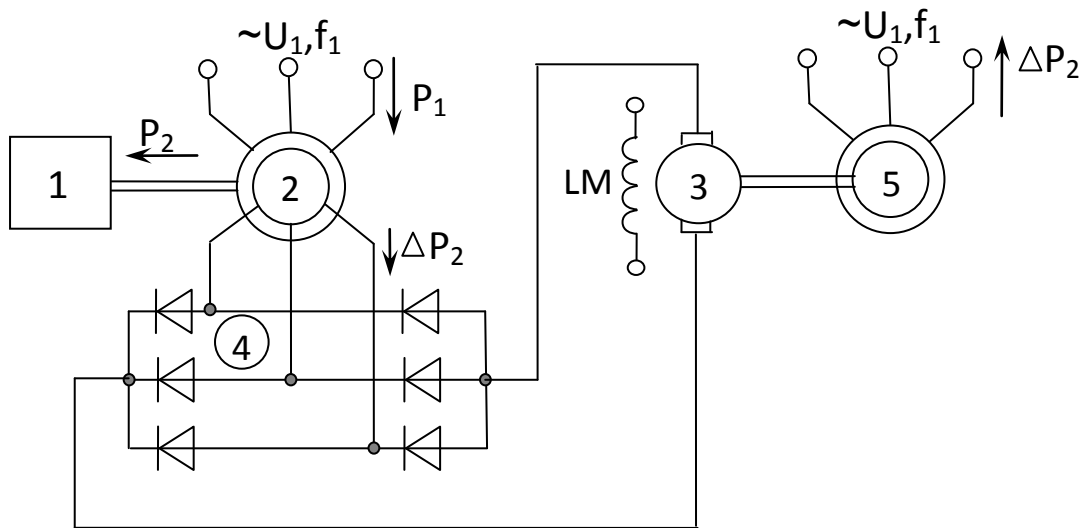


Рисунок 3.17 – Электрический машинно-вентильный каскад

Механические характеристики электромеханического машинно-вентильного каскада представлены на рисунке 3.18,а. Характеристика 1 является естественной. Для искусственных характеристик 2-4 характерно возрастание критического момента при снижении скорости. Механическая мощность на всех характеристиках остается примерно постоянной, поэтому электромеханический машинно-вентильный каскад также называется каскадом постоянной мощности.

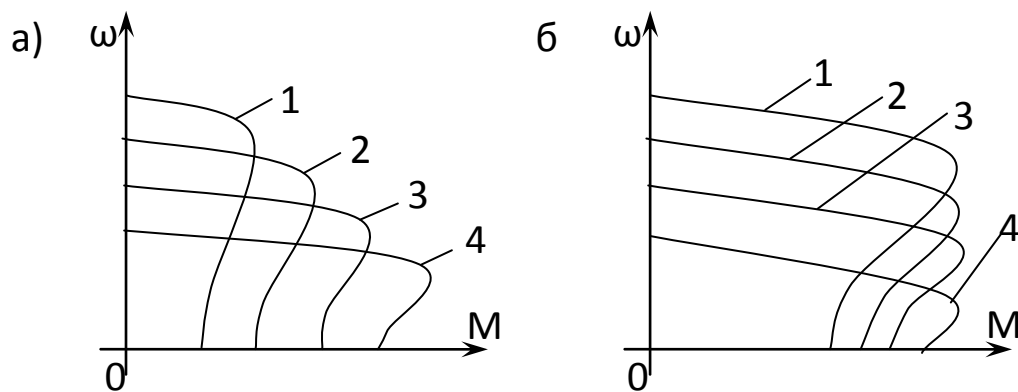


Рисунок 3.18 – Механические характеристики каскадных схем

Для всех характеристик электромеханического машинно-вентильного каскада (рисунок 3.18,б) характерно постоянство критического момента АД, поэтому электрический машинно-вентильный каскад часто называется каскадом постоянного момента.

### 3.1.13 Торможение АД

Торможение АД можно осуществить как при его питании от сети переменного тока, так и путем подключения статора к источнику постоянного тока (динамическое торможение), а также при его самовозбуждении. При питании АД по основной схеме может быть реализовано торможение противовключением и рекуперативное торможение.

**Торможение противовключением.** Осуществляется изменением порядка чередования фаз питающего АД напряжения. Допустим, что до торможения АД работал на характеристике 1 в точке а при чередовании фаз сети ABC (рисунок 3.19). Тогда при смене фаз на ВАС он перейдет на характеристику 3 в точку b. Участок bd будет соответствовать режиму торможения противовключением.

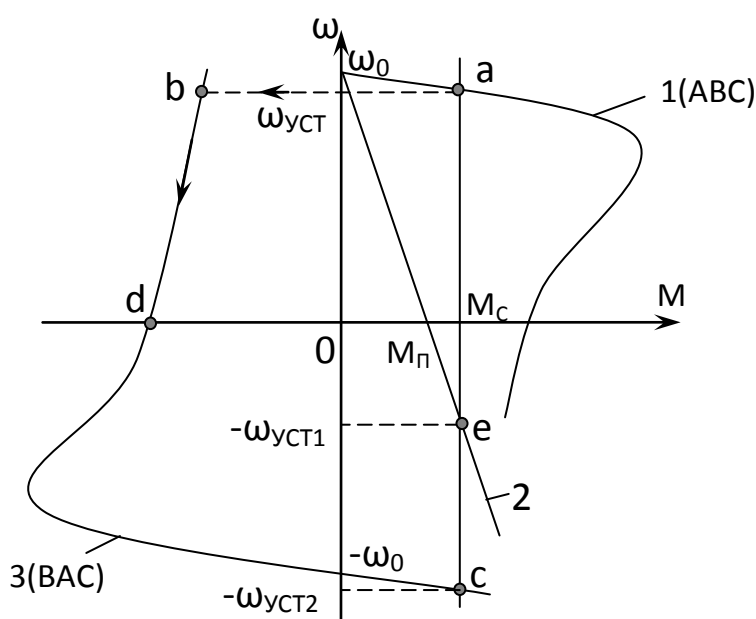


Рисунок 3.19 – Механические характеристики при торможении противовключением и рекуперативном торможении

Второй способ торможения противовключением может быть реализован только при активной нагрузке электропривода. Допустим, что до торможения АД подъемного механизма работал на характеристике 1 в точке а, и требуется осуществить спуск груза, обеспечивая его торможение с помощью АД. Для этого двигатель включается в направлении подъема с большим добавочным резистором в цепи ротора ( характеристика 2). Двигатель переходит на характеристику 2 и после окончания переходных процессов будет работать в точке е. При этом в электроприводе будет происходить спуск груза, торможение которого будет осуществляться магнитным полем статора, вращающимся в направлении подъема.

**Рекуперативное торможение.** Является наиболее экономичным видом торможения АД. Оно возникает в двигателе, когда скорость вращения его

ротора превышает скорость вращения магнитного поля статора. Такой режим возможен, например, при переходе многоскоростного АД с высокой скорости на низкую. Допустим, что до торможения АД работал на характеристике 1 в точке а (рисунок 3.20). Тогда при увеличении числа пар полюсов он должен перейти в точку d на характеристике 2. Но из-за инерционности ротора двигатель не может скачком перейти в эту точку. Поэтому он перейдет на характеристику 2 в точку b. При торможении на участке bc будет происходить рекуперация энергии в сеть. Дальнейшее торможение двигателя на участке cd отдачей энергии сопровождаться не будет.

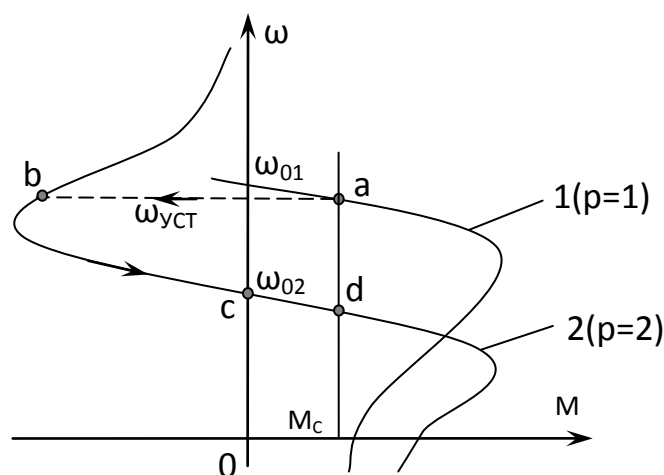


Рисунок 3.20 – Механические характеристики АД при рекуперативном торможении

Рекуперативное торможение может быть также реализовано в электроприводе подъемной лебедки при спуске груза. Для этого АД включается в направлении спуска груза (характеристика 3, рисунок 3.19). После окончания разгона он будет работать в точке с. При этом скорость вращения его ротора –  $\omega_{уст2}$  будет больше скорости вращения магнитного поля статора. Механическая энергия спускаемого груза будет преобразовываться двигателем в электроэнергию и отдаваться в питающую сеть.

**Динамическое торможение.** Для осуществления этого режима обмотка статора АД отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока (рисунок 3.21).

Постоянный ток, протекая по обмоткам статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в нем наводится ЭДС, под действием которой в обмотке ротора протекает ток, создающий магнитный поток, также неподвижный в пространстве. Взаимодействие тока ротора с результирующим магнитным полем АД создает на валу двигателя тормозной момент. При этом механическая энергия ротора и связанного с ним производственного механизма будет преобразовываться двигателем в электроэнергию и рассеиваться в виде тепла в цепи ротора.

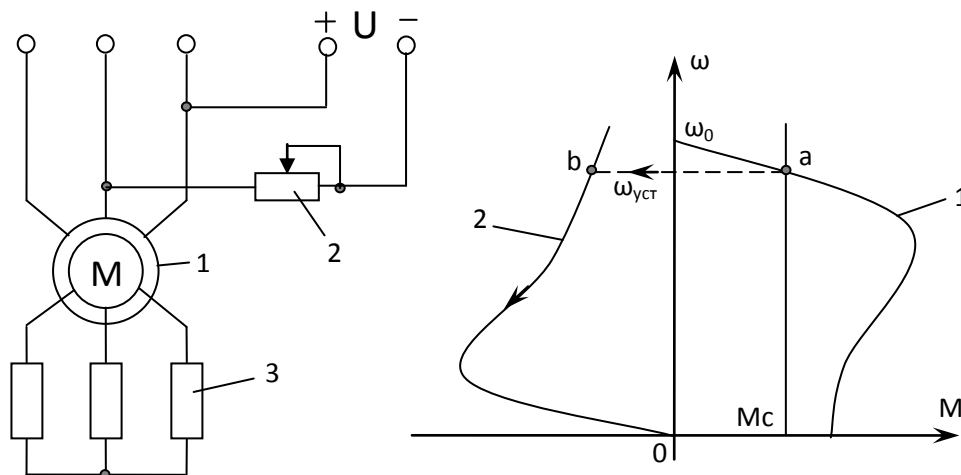


Рисунок 3.21 – Динамическое торможение АД

**Торможение АД при самовозбуждении.** Основано на том, что после отключения АД от сети его магнитное поле затухает не мгновенно, а в течение некоторого интервала времени. За счет энергии этого поля и использования специальных схем включения АД можно осуществить его возбуждение и реализовать тормозной режим. На практике нашли применение два вида торможения АД при самовозбуждении – конденсаторное и магнитное.

При конденсаторном торможении возбуждение АД осуществляется за счет конденсаторов, подключаемых к статору наглухо (постоянно) или с помощью дополнительных контакторов (рисунок 3.22).

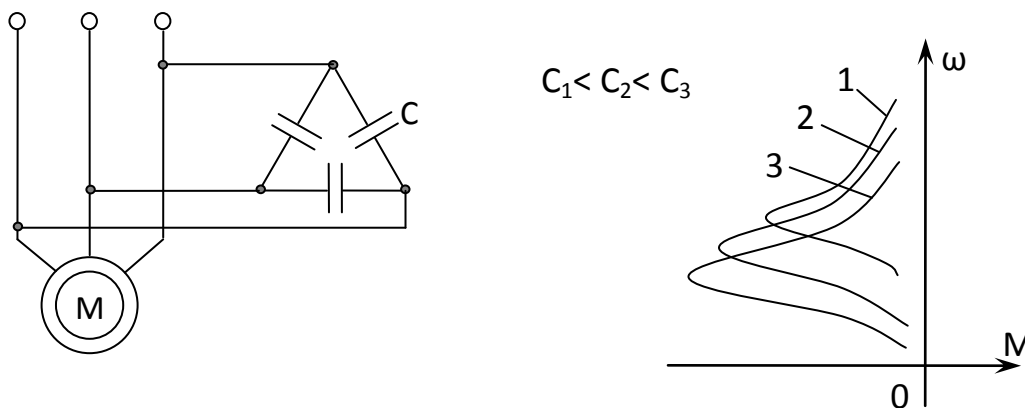


Рисунок 3.22 – Схема (а) и характеристики (б) при конденсаторном торможении АД

Магнитное торможение может быть реализовано после отключения контактором КМ1 статора АД от сети путем замыкания его выводов накоротко с помощью контакторов КМ2 и КМ3 (рисунок 3.23).

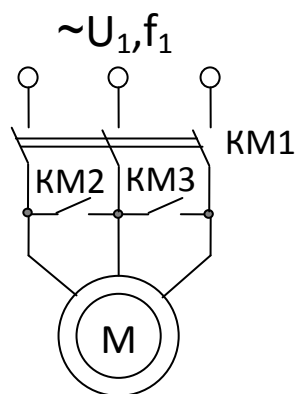


Рисунок 3.23 – Магнитное торможение АД

За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии осуществляется возбуждение двигателя и на его валу создается тормозной момент. Особенностью данного вида торможения является его быстротечность, определяемая небольшим временем затухания магнитного поля двигателя. Несмотря на это, возникающие тормозные моменты достаточно велики и обеспечивают интенсивное торможение АД.

**Комбинированный способ торможения АД.** Расширение возможностей торможения ЭП связано с использованием тиристорных пускорегулирующих устройств, которые обеспечивают как пуск двигателя, так и его торможение. Для обеспечения интенсивного торможения двигателя часто используется комбинированный способ торможения, например магнитное торможение в сочетании с динамическим. Этот способ может быть реализован пусковым тиристорным устройством (рисунок 3.24), состоящим из 2 пар встречно-параллельно включенных тиристоров VS1 — VS4 для подключения или отключения двигателя от источника питания и дополнительного тиристора VSS для реализации торможения коротким замыканием обмоток статора (магнитного торможения).

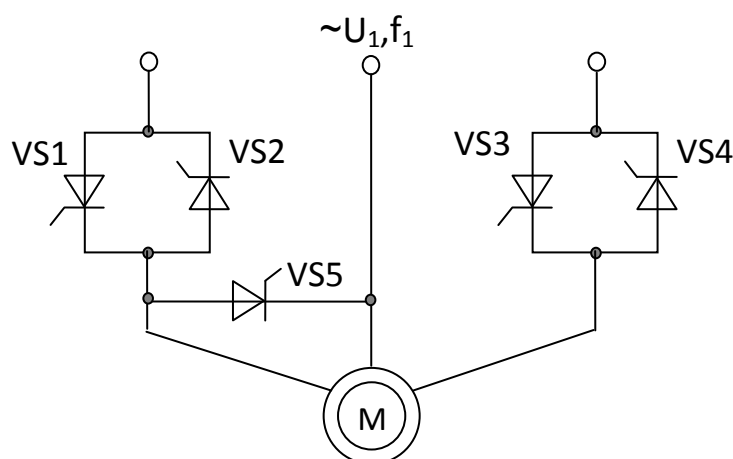


Рисунок 3.24 – Схема пускового тиристорного устройства

Торможение осуществляется в два этапа. На первом после закрытия тиристоров VS1 — VS4 и отключения двигателя от сети подается сигнал управления на тиристор VS5, который замыкает накоротко две фазы статора. Когда интенсивность торможения коротким замыканием обмоток статора уменьшится, подается сигнал управления на тиристор VS1, с помощью которого в цепь статора подается выпрямленный ток и тем самым обеспечивается режим динамического торможения.

## ***Тема 3.2. Электропривод с синхронными двигателями***

### ***3.2.1 Схема включения, статические характеристики и режимы работы СД***

Статор СД выполняется аналогично статору АД с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор СД имеет две обмотки: пусковую короткозамкнутую и обмотку возбуждения (предназначена для создания магнитного поля ротора, которое взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора и приводит двигатель во вращение). В качестве источника питания обмотки возбуждения СД чаще всего используют генератор постоянного тока небольшой мощности (до 3% мощности СД), называемый возбудителем, который устанавливается на одном валу с СД (рисунок 3.25).

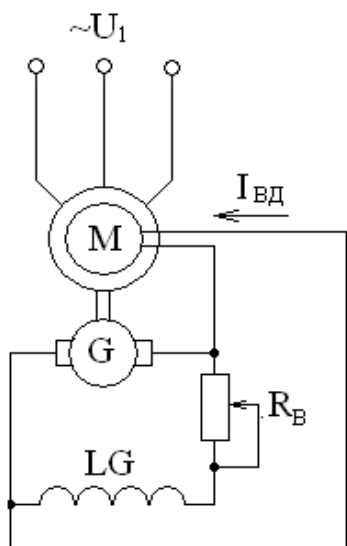


Рисунок 3.25 – Схема включения синхронного двигателя

Регулирование тока возбуждения двигателя  $I_{ВД}$  осуществляется изменением с помощью резистора  $R_B$  тока возбуждения возбудителя.

Механическая характеристика СД (рисунок 3.26) является абсолютно жесткой и сохраняется такой до некоторого значения нагрузки  $M_{MAX}$ , превышение которого приводит к выпадению двигателя из синхронизма с сетью.



Рисунок 3.26 – Механическая характеристика синхронного двигателя

Для определения максимального момента служит угловая характеристика СД (рисунок 3.27). Она отражает зависимость момента от угла сдвига фаз между векторами ЭДС статора и фазного напряжения сети.

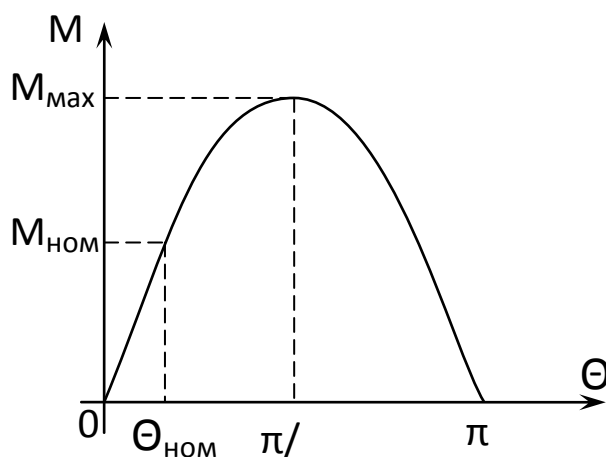


Рисунок 3.27 – Угловая характеристика синхронного двигателя

Эта характеристика описывается следующим выражением:

$$M = \frac{3U_{\phi} E \sin \theta}{\omega_0 x_1} = M_{MAX} \sin \theta$$

Максимального значения момента СД достигает при  $\theta = \frac{\pi}{2}$ . Эта величина характеризует собой перегрузочную способность СД. При больших значениях угла двигатель выпадает из синхронизма. При меньших – его работа устойчива.  $\theta_{НОМ}$  обычно составляет 25-30 градусов. При таком значении угла кратность максимального момента составляет



$$\lambda_m = \frac{M_{MAX}}{M_{НОМ}} = 2...2,5$$

СД может работать во всех основных энергетических режимах.

Преимущества СД (недостатки АД):

- 1) Критический момент СД пропорционален напряжению сети  $U_1$  в первой степени  $M_{K_{сд}} \approx U_1^1$ , а критический момент АД пропорционален квадрату напряжения  $M_{K_{ад}} \approx U_1^2$ . Из этого следует, что при понижении напряжения сети СД будет работать более устойчиво, чем АД.
- 2) У СД частота вращения не зависит от нагрузки на валу – это свойство является преимуществом для некоторых механизмов, которые требуют постоянства частоты вращения.
- 3) КПД СД больше КПД АД на 2-3 %.
- 4) Имеется возможность использования СД в качестве компенсатора реактивной мощности и работы двигателя при  $\cos \varphi = 1$ .

Недостатки СД:

- 1) СД конструктивно сложнее и требует для питания обмотки возбуждения использование постоянного тока, по этому он дороже, чем АД.
- 2) СД требует специальных способов пуска.
- 3) У СД худшие регулировочные свойства частоты вращения, чем у АД.

$n_{АД} = \frac{f}{p}(1 - S)$  - может регулироваться тремя способами (изменением  $f, p, S$ )

$n_{СД} = \frac{f}{p}$  - может регулироваться теоретически изменением  $f$  и  $p$ , но практически только  $f$ .

### 3.2.2 Регулирование скорости и торможение СД

До недавнего времени основной областью применения СД были нерегулируемые ЭП большой мощности. Появление статических тиристорных преобразователей частоты (ПЧ) определило возможности создания регулируемых синхронных электроприводов большой мощности по схеме ПЧ – СД, основные принципы построения и свойства которой аналогичны системе ПЧ – АД.

Торможение СД осуществляется переводом его в генераторный режим. Наиболее часто при этом используется схема (рисунок 3.28) динамического торможения (генераторный режим СД при его работе независимо от сети переменного тока).

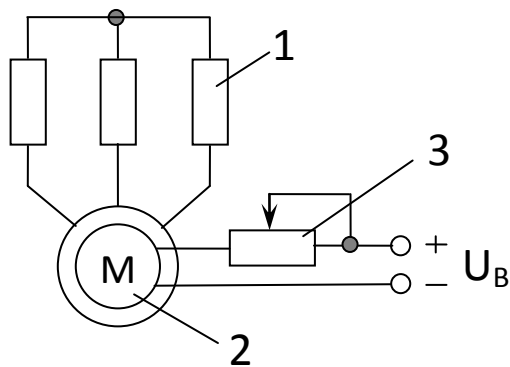


Рисунок 3.28 – Схема динамического торможения СД

В этой схеме обмотки статора СД 2 отключаются от сети переменного тока и замыкаются на добавочные резисторы 1 (или накоротко), а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику возбуждения  $U_B$  через резистор 3.

Торможение противовключением СД используется редко, так как перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления.

### 3.2.3 Пуск СД

В связи с трудностями разгона СД до синхронной скорости  $\omega_0$  используются специальные меры по его запуску. Существует два способа пуска СД:

1. С помощью вспомогательного двигателя ротор ненагруженного СД разгоняется до синхронной скорости, после чего осуществляется его синхронизация с сетью.

2. Асинхронный пуск с помощью пусковой обмотки. При подсинхронной скорости СД, отличающейся от синхронной на несколько процентов, подается ток в обмотку возбуждения синхронного двигателя и он втягивается в синхронизм с сетью.

При пуске СД используются две основные схемы его возбуждения.

- 1 Первая схема возбуждения - это основная схема включения СД (рисунок 3.25), называемая также схемой с постоянно подключенным возбудителем. Она является более простой и применяется при относительно легких условиях пуска, когда момент нагрузки на валу двигателя не превышает половины от номинального, а инерционные массы ЭП невелики.

- 2 Вторая схема (рисунок 3.29).

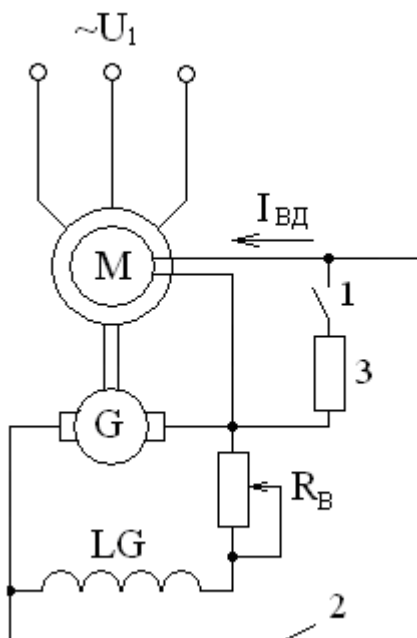


Рисунок 3.29 – Схема пуска СД

Сначала при пуске контакт 2 разомкнут, а 1 замкнут. Обмотка возбуждения СД замкнута на резистор 3 и проходит асинхронный пуск с помощью пусковой короткозамкнутой обмотки. В конце пуска на подсинхронной скорости контакт 1 размыкается, а 2 замыкается. В результате в обмотку возбуждения СД подается ток возбуждения  $I_{ВД}$  и двигатель втягивается в синхронизм с сетью.

### ***3.2.4 СД как компенсатор реактивной мощности системы электроснабжения.***

При переменном токе в электросетях наряду с активной мощностью существует и реактивная, которая обусловлена наличием реактивных сопротивлений. Реактивная мощность необходима для создания магнитных полей и потребляется там, где есть индуктивности. Основными потребителями реактивной мощности являются АД (60-65 %) и трансформаторы (20-25 %). В отличие от активной мощности, реактивная не выполняет полезной работы и влияет на потери активной мощности, по этому её надо уменьшать. Для компенсации реактивной мощности применяются высоковольтные СД с номинальной мощностью более 2500 кВт.

Компенсация осуществляется за счёт регулирования тока возбуждения СД. На рисунке показана U-образная характеристика СД, где  $I_{в}$  - ток возбуждения СД,  $I_1$  – ток статора СД.

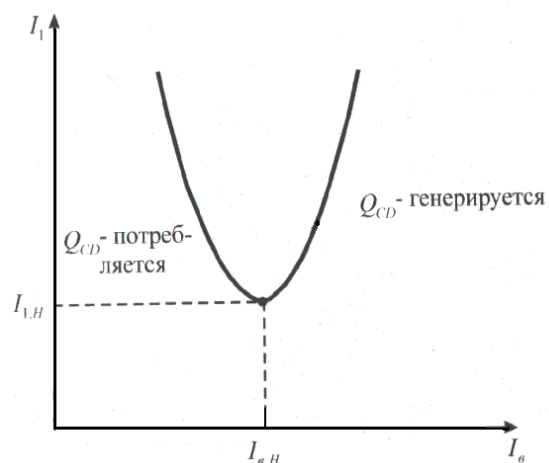


Рисунок 3.30 - V-образная характеристика СД

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Основной режим работы СД – перевозбуждение ( рис.40 ), но иногда его можно использовать в режиме недовозбуждения (потребление реактивной мощности ), например, при резком спаде нагрузки ночью.

## Раздел 4 Энергетика электропривода

### Тема 4.1 Энергетические показатели работы электропривода

#### 4.1.1 Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода

В общем случае потери мощности и энергии в электроприводе складываются из потерь в электродвигателе, механической передаче, силовом преобразователе и устройстве управления.

**Потери мощности в ЭД.** Потери мощности в ЭД составляют основную долю потерь в ЭП и представляются суммой постоянных  $C$ , Вт, и переменных  $V$ , Вт, потерь, т.е.

$$\Delta P = C + V$$

Под *постоянными* потерями подразумеваются потери мощности, не зависящие от токов двигателя (нагрузки). К ним относятся потери в стали магнитопровода, потери в обмотках возбуждения, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери.

Под *переменными* потерями подразумеваются потери, выделяемые в обмотках двигателя при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой ЭП.

Для двигателей постоянного тока (ДПТ) переменные потери мощности равны

$$V = I^2 R = I_{НОМ}^2 R \left( \frac{I}{I_{НОМ}} \right)^2 = V_{НОМ} \chi^2 \quad (1)$$

где  $I$  – соответственно ток, протекающий в цепи якоря двигателя, А;

$R$  – сопротивление цепи якоря двигателя, Ом;

$I_{НОМ}$  – номинальный ток якоря, А;

$\chi$  – кратность тока;

$V_{НОМ} = I_{НОМ}^2 R$  – номинальные переменные потери, Вт.

$$\chi = \frac{I}{I_{НОМ}}$$

В трехфазных асинхронных двигателях (АД) переменные потери мощности определяются по формуле

$$V = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2' = 3I_1^2 (R_1 + R_2') = V_{НОМ} \chi^2 \quad (2)$$

где  $V_1, V_2$  – переменные потери мощности соответственно в цепях статора и ротора; Вт;

$I_1$  – ток статора, А;

$I_2'$  – приведенный ток ротора, А;

$R_1$  и  $R_2'$  – активные фазные сопротивления соответственно обмотки статора и приведенные обмотки ротора, Ом.

В синхронных двигателях переменные потери равны

$$V = 3I_1'^2 R_1 = V_{НОМ} \chi^2 \quad (3)$$

Таким образом, из формул (1) – (3) следует, что независимо от типа электродвигателя переменные потери в нем определяются номинальными переменными потерями кратностью тока.

Полные потери мощности в двигателе:

$$\Delta P = C + V_{НОМ} \chi^2 = V_{НОМ} (\alpha + \chi^2) \quad (4)$$

где  $\alpha = \frac{C}{V_{НОМ}}$  – коэффициент потерь.

Для всех видов двигателей коэффициент потерь принимается равным от 0,5 до 2.

В номинальном режиме (при  $\chi = 1$ ) потери в двигателе можно рассчитать по паспортным данным с помощью номинального КПД  $\eta_{НОМ}$  и номинальной мощности  $P_{НОМ}$ :

$$\Delta P_{НОМ} = \frac{P_{НОМ} (1 - \eta_{НОМ})}{\eta_{НОМ}} \quad (5)$$

Тогда постоянные потери мощности определим по формуле

$$C = \Delta P_{НОМ} - V_{НОМ} \quad (6)$$

**Потери мощности в преобразователе.** Являются электрическими и определяются по формулам. При использовании полупроводниковых преобразователей потери в них складываются из потерь в вентилях, трансформаторах, реакторах, фильтрах и элементах устройств искусственной коммутации.

**Потери мощности в системах управления.** Обычно они не превышают нескольких десятков ватт и принимаются во внимание только при выполнении точных энергетических расчётов.

**Потери мощности в механической передаче.** Определяются главным образом трением в движущихся частях и существенно зависят от передаваемого момента. Потери обычно оцениваются с помощью КПД, значения которого приводятся в справочной литературе.

**Потери энергии.** За время работы  $t_p$ , с, двигателя с постоянной нагрузкой, полные потери энергии обусловленные  $\Delta P$  определяются по формуле

$$\Delta A = \Delta P \cdot t_p$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой, полные потери энергии за весь цикл равны

$$\Delta A = \int_0^{t_y} \Delta P(t) \cdot dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i$$

где  $\Delta P_i, t_i$  – соответственно полные потери мощности на  $i$ -том участке цикла, Вт;

$t_i$  – время работы на  $i$ -том участке цикла, с;

$n$  – число отдельных участков цикла.

$t_{ц} = \sum_{i=1}^n t_i$  - время цикла.

### **4.1.2 Потери энергии при пуске и торможении электроприводов**

Возникающие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости и изменении нагрузки токи, как правило, превышают номинальный уровень. По этой причине выделяющиеся в двигателе и в других элементах ЭП потери могут быть весьма значительными и существенно влиять на энергетические показатели его работы. Повышенные потери в двигателе вызывают его дополнительный нагрев, что подчёркивает важность правильной их оценки.

Особенно большое значение определение потерь электрической энергии в переходных процессах имеет место для ЭП, у которых динамический режим является основным (электропривод прокатных станков, подъёмных кранов, лифтов и др.)

В общем случае потери энергии за время переходного процесса  $t_{пн}$  могут быть определены с помощью выражения

$$\Delta A = \int_0^{t_{пн}} \Delta P \cdot dt = \int_0^{t_{пн}} C \cdot dt + \int_0^{t_{пн}} V \cdot dt = \Delta A_C + \Delta A_V$$

где  $\Delta A_C, \Delta A_V$  - потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

$$\Delta A_C = C \cdot t_{пн}$$

$$\Delta A_V = \int_0^{t_{пн}} i^2(t) \cdot R \cdot dt$$

Для определения переменных потерь энергии необходимо знать закон изменения тока двигателя в переходном процессе  $i(t)$ , а также располагать данными об изменении сопротивления  $R$ . Поэтому более удобно переменные потери энергии в переходных процессах определять через механические переменные и параметры двигателя.

### 4.1.3 КПД электроприводов

В общем случае, когда ЭП работает в некотором цикле с различными скоростями и нагрузками на валу, как в установившемся, так и в переходном режимах его КПД определяется как цикловой (или средневзвешенный) по формуле:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{потр}}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{пол}} + \Delta A} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{пол}i} t_i}{\sum_{i=1}^n P_{\text{пол}i} t_i + \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}$$

где  $A_{\text{пол}}$  и  $A_{\text{потр}}$  – соответственно полезная механическая и потреблённая электрическая энергия, Дж;

$\Delta A$  – потери энергии, Дж;

$P_{\text{пол}i}$  – полезная механическая мощность на  $i$ -том участке цикла, Вт;

$\Delta P_i$  – потери мощности на  $i$ -том участке цикла, Вт;

$n$  – число участков цикла работы ЭП.

Если ЭП работает в установившемся режиме, то эта формула упрощается и принимает вид:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}$$

КПД ЭП как электромеханической системы определяется произведением КПД электродвигателя, преобразовательного устройства, управляющего устройства и механической передачи:

$$\eta = \eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{пу}} \cdot \eta_{\text{уу}} \cdot \eta_{\text{мп}}$$

Способы повышения КПД двигателя могут быть следующими:

1 Ограничение времени работы двигателя на холостом ходу.

2 Обеспечение нагрузки, близкой к номинальной (в том числе путем замены малозагруженного двигателя на двигатель меньшей мощности, что необходимо обосновать экономически, т.е. капитальные затраты на замену должны окупиться за счет сокращения эксплуатационных расходов).

3 Применение регуляторов экономичности.

### 4.1.4 Коэффициент мощности ЭП

Электроприводы, подключаемые к сети переменного тока, потребляют из сети активную и реактивную мощности. Активная мощность расходуется на совершение электроприводом полезной работы и покрытие потерь в нем, а реактивная мощность обеспечивает создание электромагнитных полей



двигателя и других его элементов и непосредственно полезной работы не совершает. Работа ЭП, как и любого другого потребителя активной  $P_a$  и реактивной  $Q$  энергии характеризуется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}}$$

где  $S$  – полная мощность.

ЭП, потребляя реактивную мощность, нагружает систему электроснабжения, вызывая дополнительные потери напряжения и энергии в ее элементах. По этой причине всегда следует стремиться к обеспечению максимально возможного  $\cos \varphi$  ЭП как одного из основных энергетических показателей его работы. Если ЭП работает в каком-то цикле при различных нагрузках или скоростях в установившемся или переходном режимах, то он, как потребитель реактивной энергии, характеризуется средневзвешенным или цикловым коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл  $A_a$  к полной или кажущейся энергии  $A_n$  в соответствии с формулой:

$$\cos \varphi_{св} = \frac{A_a}{A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{P_{ai}^2 + Q_i^2} \cdot t_i}$$

Способы повышения коэффициента мощности:

- 1 Замена малозагруженных АД двигателями меньшей мощности с обязательным экономическим обоснованием.
- 2 Ограничение времени работы АД на холостом ходу.
- 3 Понижение напряжения питания АД, работающих с малой или переменной нагрузкой.
- 4 Замена АД на СД.

## ***4.2 Расчет мощности, выбор и проверка электродвигателей***

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который будет обеспечивать заданный технологический цикл рабочей машины, иметь конструкцию, соответствующую условиям окружающей среды и компоновки с рабочей машиной, а его нагрев при этом не должен превышать допустимый уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины. Происходящие при этом его повышенный нагрев и ускоренное старение изоляции, определяют

преждевременный выход самого двигателя из строя, остановку рабочей машины и соответствующие экономические потери.

Недопустимым является также использование двигателей завышенной мощности, т.к. при этом, имея повышенную первоначальную стоимость, ЭП работает с низким КПД и коэффициентом мощности.

### ***4.2.1 Нагрузочные диаграммы двигателей. Расчет мощности двигателей при различных режимах работы***

Выбор двигателя для электропривода обычно производится в следующей последовательности:

- 1 этап – предварительный расчет мощности двигателя;
- 2 этап – выбор двигателя по каталогу;
- 3 этап – проверка выбранного двигателя по условиям пуска, перегрузке и нагреву.

Основой для расчета мощности и выбора двигателя для электропривода является нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости (тахограмма) исполнительного органа рабочей машины.

Нагрузочная диаграмма исполнительного органа рабочей машины (механизма), рисунок 4.1,а представляет собой график изменения во времени приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки, т.е.  $M_c(t)$  или статической мощности  $P_c(t)$ , статического усилия  $F_c(t)$ . Она рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи.

Статические нагрузки (статическая мощность, момент, усилие) рассчитываются для конкретного механизма по определенным формулам, приводимых в справочниках.

Скоростная диаграмма механизма (рисунок 4.1,б) представляет собой зависимость скорости движения механизма в статическом режиме работы от времени. Статические нагрузки при переменной нагрузке рассчитываются для каждого участка циклограммы работы механизма. Например, для механизма главного движения подъемного крана можно выделить следующие участки циклограммы (рисунок 4.1,а):

- 1 Спуск пустого крюка;
- 2 Подъем груза;
- 3 Спуск груза;
- 4 Подъем пустого крюка.

Из диаграммы видно, что периоды работы электродвигателя чередуются с паузами.

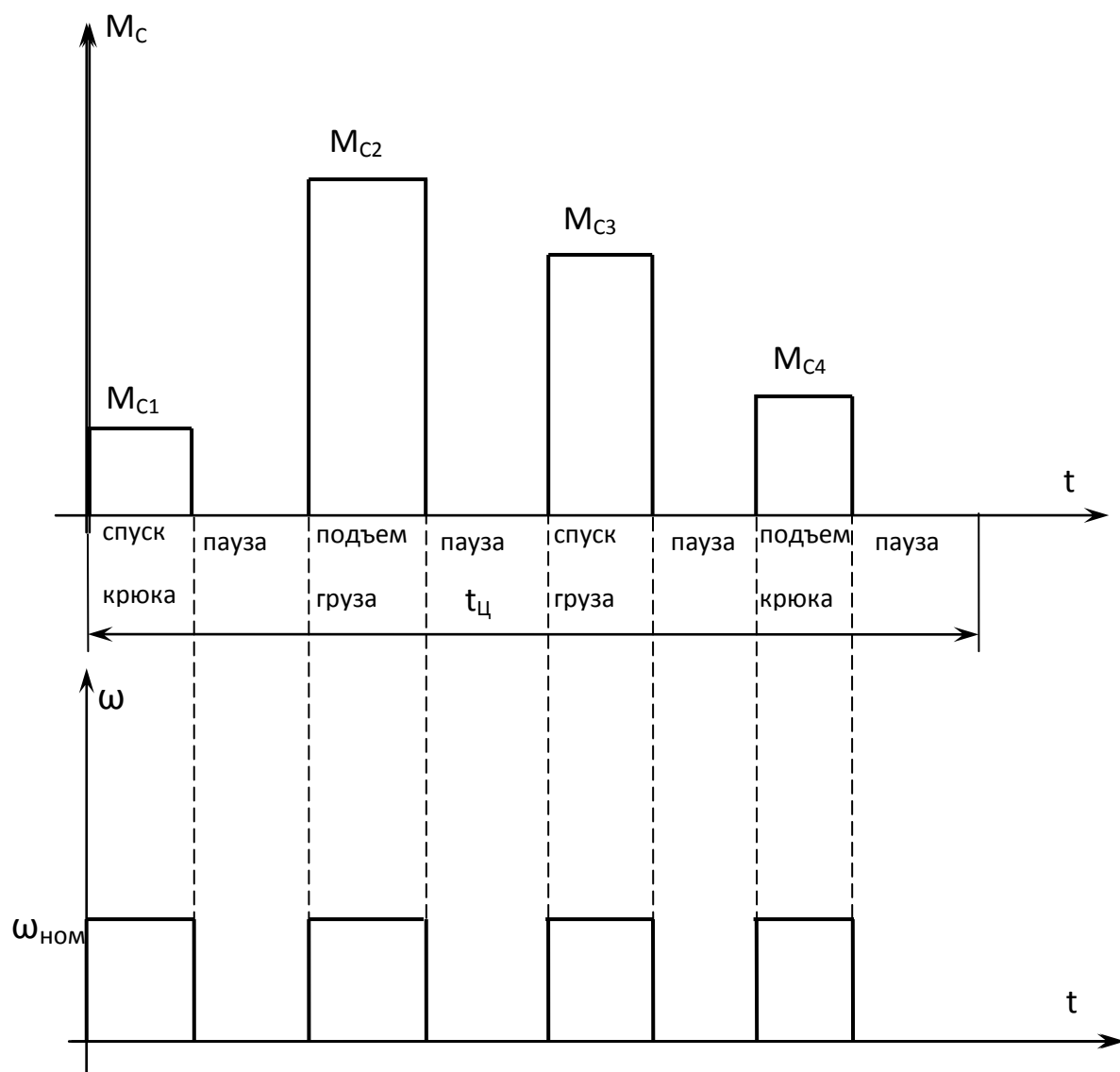


Рисунок 4.1 – Нагрузочная (а) и скоростная (б) диаграммы механизма

Мощность электродвигателя предварительно рассчитывается исходя из статической нагрузки механизма и режима работы электродвигателя в электроприводе.

На основании анализа режимов работы выделены наиболее характерные, т.е. номинальные режимы работы, для которых проектируются и изготавливаются электродвигатели.

Номинальные режимы работы имеют обозначения S1...S8.

Режимы S1, S2, S3 являются в настоящее время основными.

Номинальные данные двигателей в этих режимах включаются в паспорт и каталоги.

Режимы S4...S8 уточняют основные и помогают упростить нагрузочные диаграммы произвольных режимов.

Продолжительный номинальный режим работы (S1) двигателя характеризуется нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Работа двигателя в режиме S1 может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой. В таком режиме работают электродвигатели насосов, вентиляторов, эскалаторов, транспортеров.

Кратковременный номинальный режим работы (S2) двигателя – это режим, при котором периоды работы двигателя с неизменной нагрузкой чередуются с периодами его отключения (остановки); при этом периоды работы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя могли достигнуть установившегося значения, а периоды остановки настолько длительны, что все его части охлаждаются до температуры окружающей среды. В таком режиме работают электродвигатели зажимных устройств металлорежущих станков, открытия затворов шлюза, разводных мостов.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы (S3) двигателя – это режим, при котором кратковременные периоды с неизменной нагрузкой чередуются с периодами отключения (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя могли достигнуть установившихся значений. В таком режиме работают электродвигатели кранов, лифтов, экскаваторов, подъемно-транспортных механизмов.

На рисунке 4.2 представлены примерные графики зависимости температуры двигателя от времени в основных номинальных режимах работы.

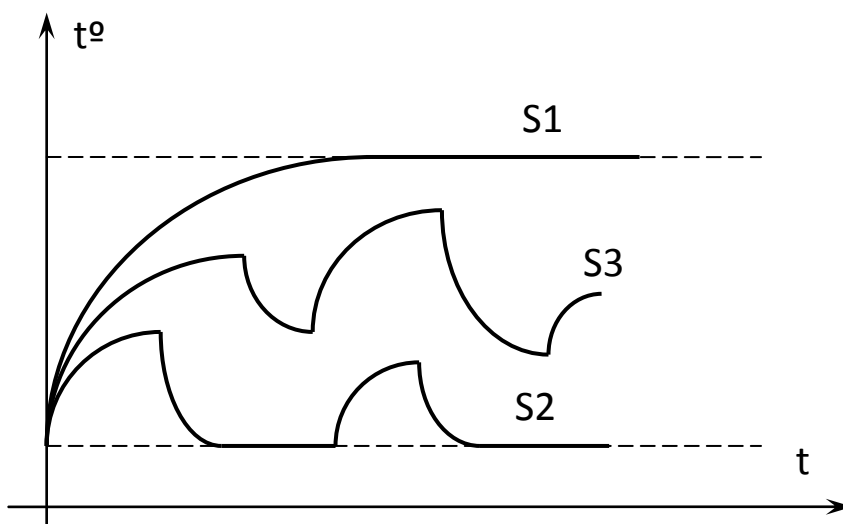


Рисунок 4.2 – Кривые нагрева двигателя в различных режимах работы

Для ЭП, работающих в продолжительном режиме (S1) с неизменной нагрузкой, мощность двигателя принимается равной

$$P_H = \frac{\kappa P_c}{\eta_n}$$

где  $P_c$  - статическая мощность механизма.

$\kappa$  – коэффициент запаса по мощности, который принимается равным 1,08...1,36.

$\eta_n$  - КПД механической передачи.

Мощность двигателя, работающего в продолжительном режиме (S1) с переменной нагрузкой, можно рассчитать по среднеквадратичному (эквивалентному) статическому моменту  $M_{cэ}$

$$P_H = \kappa M_{cэ} \omega_n$$

$$M_{cэ} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^n M_{ci}^2 \cdot t_i}$$

где  $M_{ci}$  - статический момент на  $i$ -том интервале нагрузочной диаграммы механизма,

$t_i$  – продолжительность  $i$ -того интервала,

$t_{ц}$  – время цикла,

$n$  – число интервалов нагрузочной диаграммы механизма,

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость двигателя.

При кратковременном режиме работы двигателей, отвечающих режиму S2, необходимо чтобы действительное время кратковременной работы  $t_p$  было равно одному из стандартных значений времени  $t_{p.cm} = 10, 30, 60, 90$  мин, для которого спроектирован и изготовлен двигатель. В этом случае двигатель выбирается из условия

$$M_{э.СТ} = \sqrt{\frac{1}{t_{p.cm}} \cdot M_C^2 \cdot t_p}$$

Если  $t_p \neq t_{p.cm}$ , то предварительно выбирается двигатель, имеющий по каталогу значения  $t_{p.cm}$  и  $P_H$ , ближайšie к заданным значениям  $t_p$  и  $M_{э.СТ}$ .

При повторно-кратковременном режиме работы (S3) эквивалентный статический момент рассчитывается только за рабочее время, т.е. без учёта пауз, когда двигатель отключается от источника питания.

$$M_{cэ}(ПВ) = \sqrt{\frac{1}{t_p} \sum_{i=1}^n M_{ci}^2 \cdot t_i}$$

$t_p$  - продолжительность работы двигателя за время цикла.

Продолжительность включения двигателя определяется:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_y} \cdot 100\%$$

Рассчитанный эквивалентный статический момент при реальной ПВ, следует привести к эквивалентному статическому моменту при стандартной  $PВ_{ст} = 15, 25, 40, 60 \%$  по формуле

$$M_{cэ}(PВ_{ст}) = M_{cэ}(PВ) \sqrt{\frac{PВ}{PВ_{ст}}}$$

Эта формула справедлива также для расчета мощности. Номинальная мощность двигателя для повторно-кратковременного режима при заданном  $PВ_{ст}$  равна

$$P_n = k\omega_n M_{cэ}(PВ_{ст})$$

### **4.2.2 Выбор двигателя**

По каталогу выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости. По роду тока и величине напряжения он должен соответствовать сетям энергоснабжения предприятия, по конструктивному исполнению - условиям его компоновки с исполнительным органом и способам крепления на рабочей машине, а по способу вентиляции и защиты от действия окружающей среды – условиям его работы. Затем производится его проверка.

### **4.2.3 Проверка выбранного двигателя**

Выбранный электродвигатель необходимо проверить на пригодность для работы в электроприводе по условиям нагрева, перегрузке и условиям пуска.

**Проверка двигателя по нагреву.** Для проверки двигателя по нагреву чаще всего используется метод эквивалентных величин (тока, момента, мощности).

Метод эквивалентного тока используется в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, который может быть получен расчётным путём или экспериментальным. Двигатель будет удовлетворять условиям нагрева, если соблюдается условие

$$I_э \leq I_n,$$

где  $I_э$  – эквивалентный ток;

$I_n$  – номинальный ток двигателя.

Метод эквивалентного момента применяется для двигателей, работающих с постоянным магнитным потоком (ДПТ независимого и параллельного возбуждения; асинхронные двигатели, работающие при скольжениях, меньших критического). Условием правильного выбора двигателя по нагреву, будет

$$M_{\text{э}} \leq M_{\text{н}},$$

где  $M_{\text{э}}$  – эквивалентный момент нагрузки;  
 $M_{\text{н}}$  – номинальный момент двигателя.

Самое ограниченное применение имеет метод эквивалентной мощности, которым можно воспользоваться, если магнитный поток и скорость двигателя неизменны. Обычно такие условия возникают при работе двигателя с переменной нагрузкой и примерно постоянной скоростью

$$P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}},$$

где  $P_{\text{э}}$  – эквивалентная мощность нагрузки;  
 $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность двигателя.

В повторно кратковременном режиме эквивалентные ток, момент и мощность определяются только для рабочих участков (без учета пауз). Если расчётное значение ПВ отличается от стандартного, то эквивалентные величины приводятся к стандартному  $PВ_{\text{ст}}$

$$I_{\text{э.см}} = I_{\text{э}} \sqrt{\frac{PВ}{PВ_{\text{см}}}}$$

$$M_{\text{э.см}} = M_{\text{э}} \sqrt{\frac{PВ}{PВ_{\text{см}}}}$$

$$P_{\text{э.см}} = P_{\text{э}} \sqrt{\frac{PВ}{PВ_{\text{см}}}}$$

Двигатель будет удовлетворять условиям нагрева при данном  $PВ_{\text{ст}}$  при выполнении условия

$$I_{\text{э.см}} \leq I_{\text{н}}$$

$$M_{\text{э.см}} \leq M_{\text{н}}$$

$$P_{\text{э.см}} \leq P_{\text{н}}$$

где  $I_{\text{н}}, P_{\text{н}}, M_{\text{н}}$  – номинальные величины двигателя при данном  $PВ_{\text{ст}}$ .

Если эквивалентные величины превышают номинальные, то это говорит о недопустимом нагреве двигателя. В этом случае следует выбрать по каталогу двигатель большей мощности и повторить расчёты.

**Проверка двигателя по перегрузочной способности.** По нагрузочной диаграмме электропривода ( $M = f(t)$ , где  $M$  – момент двигателя) проверяется двигатель по перегрузочной способности по условию

$$M_{\text{max}} \geq M_{\text{С max}}$$

$$M_{\text{max}} = \lambda_m M_{\text{н}}$$

где  $M_{\text{max}}$  – максимальный момент двигателя,

$M_{\text{С max}}$  – максимальный момент на нагрузочной диаграмме электропривода,

$\lambda_m$  - допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту (указывается в справочнике),

$M_n$  – номинальный момент двигателя.

Максимально допустимый момент АД следует принимать с учётом возможного снижения напряжения на 10%

$$M_{\max} = (0,9)^2 \cdot \lambda_m \cdot M_n$$

**Проверка двигателя по условиям пуска.** Выбранный двигатель проверяется также по условиям пуска

$$M_{cn} \leq M_n$$

$$M_n = \lambda_n \cdot M_{cn}$$

где  $M_{cn}$  - максимальное значение статического момента при пуске,

$M_n$  – пусковой момент двигателя,

$\lambda_n$  - кратность пускового момента (указывается в справочниках).



Практический раздел  
Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Методические указания для проведения лабораторных работ  
для специальностей

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-36 03 31-31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(производственная деятельность)»

Разработчик \_\_\_\_\_ Э.А.Петрович

Рецензент \_\_\_\_\_ Т.В.Бачило

Указания рассмотрены и рекомендованы к  
утверждению на:  
- заседании цикловой комиссии  
электротехнических дисциплин  
Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
Председатель комиссии \_\_\_\_\_ Е.С.Гутько  
-заседании экспертного методического совета  
Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## 2016 Содержание

Наименование лабораторной работы	Количество часов			Номер страницы
	2-53 01 05	2-37 01 05	2-36 03 31-01	
1 Определение момента инерции и махового момента электропривода по методу свободного выбега	2	2	2	3
2 Снятие и исследование электромеханических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения	2	2	2	12
3 Исследование электромеханических характеристик электропривода с асинхронным двигателем	2	2	2	24
4 Исследование нагрузочных диаграмм электропривода	2			37
Всего	8	6	6	



# Лабораторная работа №1

## Определение момента инерции и махового момента электропривода по методу свободного выбега

### 1 Цель работы:

- определить момент инерции и маховый момент электропривода;
- приобрести практические навыки в опытном определении момента инерции и махового момента электропривода;
- получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о динамическом моменте в электроприводе.

### 2 Оборудование рабочего места:

- лабораторный стенд;
- методические указания по выполнению лабораторной работы.

### 3 Краткие теоретические сведения

#### 3.1 Основные понятия

При постоянной частоте вращения электропривода мощность, развиваемая электродвигателем, расходуется на преодоление лишь только статической нагрузки. Если же в электроприводе наступил переходной режим, и он работает с переменной частотой вращения, то мощность электродвигателя расходуется не только на статическую, но и на динамическую нагрузку.

Статическая нагрузка обусловлена двумя факторами: моментом статического сопротивления на валу рабочего механизма и силами сопротивления в передачах, соединяющих вал электродвигателя с выходным валом рабочего механизма (рабочей машины).

Динамическая нагрузка электропривода определяется динамическим моментом  $M_{\text{дин}}$ , обусловленным изменением скорости движения всех элементов системы электропривода.

Уравнение движения электропривода устанавливает связь между моментами, действующими на валу электродвигателя: моментом  $M$ , развиваемым электродвигателем, моментом статической нагрузки  $M_{\text{с}}$  и моментом динамической нагрузки  $M_{\text{дин}}$ .

$$M = M_{\text{дин}} + M_{\text{с}} \quad (1.1)$$

$$M_{\text{дин}} = M - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость электродвигателя, рад/с;

$t$  – время, с;

$J$  – суммарный момент инерции электропривода, Н·м.

Суммарный момент инерции электропривода определяется в общем случае по формуле

$$J = J_{\text{д}} + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2 \quad (1.3)$$

где  $J_{\text{д}}$  – момент инерции ротора электродвигателя, Н·м;

$J_1$  – момент инерции соединительной муфты и других частей, непосредственно связанных с валом двигателя, Н·м;

$J_2$  – момент инерции частей механизма, вращающихся со скоростью, отличной от скорости двигателя, Н·м;

$i$  – передаточное отношение редуктора;

$m$  – масса поступательно движущихся частей механизма, кг;

$\rho$  – радиус приведения кинематической схемы, м.

Момент инерции  $J$  является мерой инерции тела при его вращении; он равен сумме произведений масс всех элементов тела на квадраты их расстояний от оси вращения.

В практических расчетах момент инерции определяется как:

$$J = m \cdot \rho^2, \quad (1.4)$$

Если всю массу тела сосредоточить в одной точке или распределить на ободе бесконечно малой толщины, то радиусом инерции  $\rho$  будет расстояние от оси вращения до этой точки или обода.

Ранее в технической литературе часто применяли вместо момента инерции  $J$  маховый момент  $GD^2$ , в котором  $G$  – вес тела, Н;  $D$  – диаметр инерции, м. Отсюда получим соотношение:

$$GD^2 = m \cdot g \cdot (2 \cdot \rho)^2 = 4 \cdot g \cdot m \cdot \rho^2 = 4 \cdot g \cdot J, \quad (1.5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,

Тогда

$$J = \frac{GD^2}{4 \cdot g}. \quad (1.6)$$

Значения моментов инерции роторов асинхронных двигателей и якорей двигателей постоянного тока приводятся в соответствующих каталогах и справочниках по электрическим машинам. При отсутствии каталожных данных момент инерции электродвигателя, а также момент инерции привода (двигатель – рабочий орган) может быть определен экспериментально.

Наиболее точные результаты можно получить при расчете момента инерции, но этот способ требует знания всех элементов конструкции и является весьма трудоемким.

Поэтому часто прибегают к определению момента инерции опытным путем. Из опытных методов определения момента инерции наиболее часто встречаются следующие методы:

- метод свободного выбега;
- метод падающего груза;
- метод маятниковых колебаний;
- метод крутильных колебаний.

### 3.2 Метод свободного выбега

В данной работе рассматривается один из методов экспериментального определения общего момента инерции и общего махового момента системы электропривода – метод свободного выбега (самоторможения). Сущность этого метода состоит в следующем. Исследуемый агрегат, включающий в себя электродвигатель и механически соединённые с ним элементы, разгоняется до некоторой установившейся скорости вращения в режиме х.х.  $\omega_0$ .

После этого электродвигатель отключают от сети, и наступает процесс самопроизвольного торможения, т.е. торможения исключительно за счёт внутренних сил трения (трения в подшипниках электродвигателя и сочленённых с ним вращающихся частей о воздух, трения щёток о коллектор и т.п.).

Суммарный момент инерции электропривода равен

$$J = \frac{P_{BP0} \cdot T_M}{\omega_0^2}, \quad (1.7)$$

где  $P_{BP0}$  – мощность, затрачиваемая на приведение во вращение агрегата в режиме холостого хода, Вт;

$\omega_0$  – скорость вращения двигателя в режиме идеального холостого хода, рад/с;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени, с.

По полученному значению  $J$  можно определить маховый момент агрегата:

$$GD^2 = 4gJ = \frac{4g \cdot P_{BP0} \cdot T_M}{\omega_0^2}. \quad (1.8)$$

Значения  $P_{BP0}$  и  $T_M$  определяют экспериментально, выполнив сначала опыт холостого хода, а затем опыт свободного выбега и построив кривую выбега  $\omega=f(t)$ .

#### 3.2.1 Опыт холостого хода

Электродвигатель включают в сеть при номинальном напряжении  $U_C = U_{ном}$ . После того, как скорость вращения агрегата достигнет

установившегося значения, снимают показания приборов и заносят их в таблицу 1.1.

Мощность х.х. в цепи якоря электродвигателя вычисляется по формуле

$$P_0 = U_{\text{НОМ}} \cdot I_0, \quad (1.9)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение питания двигателя, В;  
 $I_0$  – ток двигателя, А.

Мощность электрических потерь в обмотках цепи якоря определяют по формуле

$$P_{\text{Э}} = I_0^2 R_{\text{я}}, \quad (1.10)$$

где  $R_{\text{я}}$  – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом.

При расчетах принять  $R_{\text{я}} = 65$  Ом.

Электрические потери в щёточном контакте определяются по формуле

$$P_{\text{Щ}} = I_0 \cdot \Delta U_{\text{Щ}}, \quad (1.11)$$

где  $\Delta U_{\text{Щ}}$  – падение напряжения в щёточном контакте, В.

При расчетах принять  $\Delta U_{\text{Щ}} = 2$  В.

Все полученные значения величин заносят в таблицу 1.1 и определяют мощность  $P_{\text{ВР0}}$ , затрачиваемую на вращение агрегата в режиме х.х.:

$$P_{\text{ВР0}} = P_0 - (P_{\text{Э}} + P_{\text{Щ}}). \quad (1.12)$$

Таблица 1.1 – Результаты опыта холостого хода

Измерения			Вычисления			
$U_{\text{НОМ}}$	$I_0$	$\omega_0$	$P_0$	$P_{\text{Э}}$	$P_{\text{Щ}}$	$P_{\text{ВР0}}$
В	А	рад/с	Вт	Вт	Вт	Вт

### 3.2.2 Снятие кривой выбега

После снятия показаний приборов при опыте х.х. отключают электродвигатель от сети и одновременно включают секундомер. По мере остановки агрегата необходимо 8-10 раз измерить угловую скорость вращения  $\omega$  с одновременным фиксированием времени. Первый замер частоты вращения делают в момент отключения электродвигателя, а последний – при полной остановке агрегата. Особенно внимательно следует относиться к измерениям при первых трёх замерах, следующих после отключения электродвигателя, т.к. точность этих

измерений в значительной степени влияет на результаты работы. Показания приборов заносят в таблицу 1.2. Затем строят кривую выбега  $\omega=f(t)$ .

Для того чтобы воспользоваться выражением (1.7) для определения общего момента инерции агрегата, необходимо определить время  $T_M$ . С этой целью на графике кривой выбега проводят касательную к начальной части кривой в точке А (рисунок 1.1) до пересечения с осью абсцисс в точке В. Полученный таким образом отрезок ОВ на оси абсцисс и определяет время  $T_M$ . Это значение  $T_M$  заносят в таблицу 1.3. Туда же заносят значения  $P_{ВР0}$  и  $\omega_0$  из таблицы 1.1, а затем определяют общий момент инерции агрегата  $J$  (1.7) и маховый момент  $GD^2$  (1.8).

Таблица 1.2 – Результаты опыта свободного выбега

t, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega$ , рад/с													

Таблица 1.3 – Результаты расчётов

$P_{ВР0}$	$\omega_0$	$T_M$	$J$	$GD^2$
Вт	рад/с	с	кг $\times$ м <sup>2</sup>	Н $\times$ м <sup>2</sup>

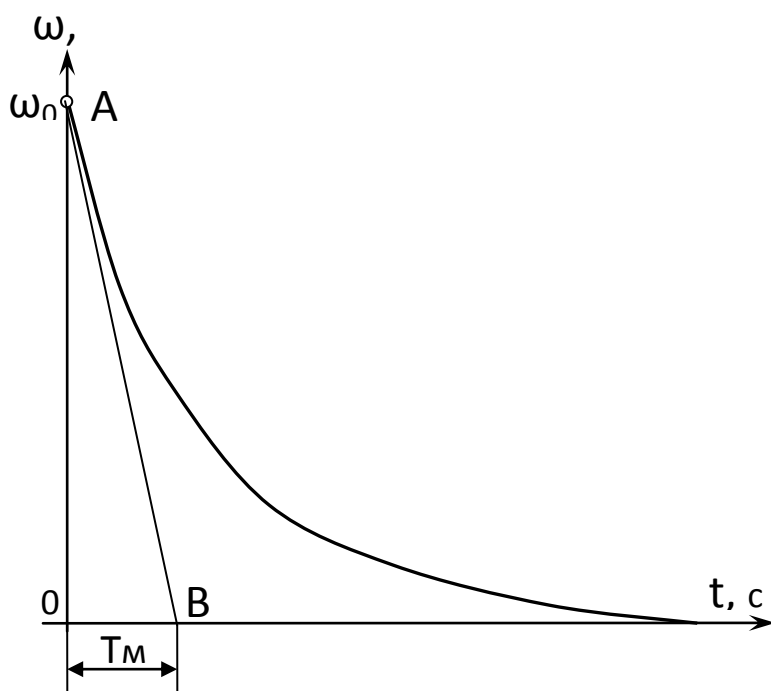


Рисунок 1.1 – Кривая выбега электропривода.



## 4 Порядок выполнения работы

4.1 Собрать схему подключения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) к сети переменного тока (рисунок 1.2)

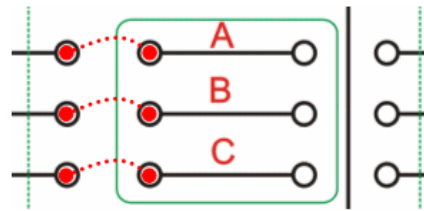


Рисунок 1.2 – Схема подключения ШИП к трехфазному источнику

4.2 Собрать схему подключения напряжения задания для ШИП (рисунок 1.3)

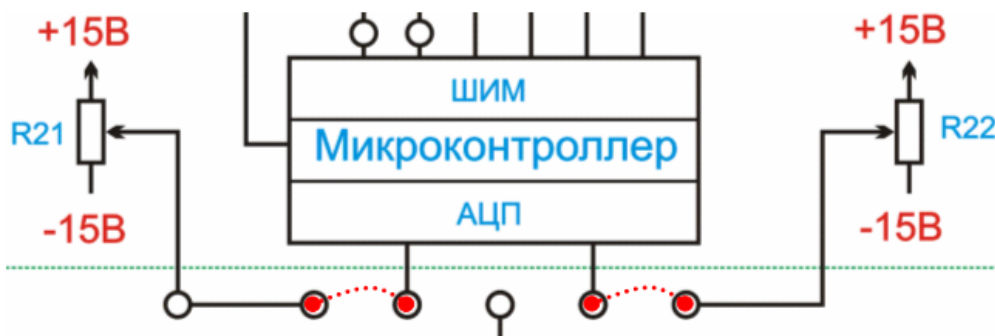


Рисунок 1.3 – Схема подключения задания для ШИП

4.3 Собрать схему подключения якоря (Я) и обмотки возбуждения (ОВ) ДПТ НВ к ШИП (рисунок 1.4)

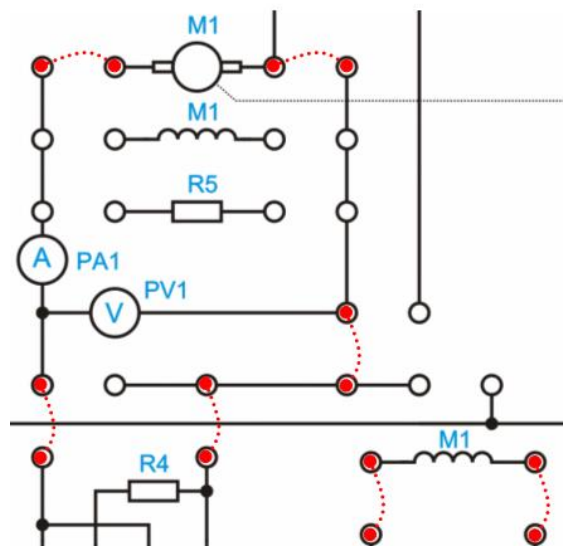


Рисунок 1.4 – Схема подключения Я и ОВ ДПТ НВ к ШИП

4.4 Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «выключено», а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

4.5 Включить ШИП возбуждения (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (возбуждение), %») и резистором  $R_{22}$  установить номинальный ток возбуждения ДПТ НВ равный 0,18 А по прибору  $PA_4$ .

4.6 Подключить релейно-контакторную схему управления (включить тумблер  $SA_{70}$ ).

4.7 Подключить якорь ДПТ НВ к ШИП якоря (подключение якоря к ШИП осуществляется с помощью контактора  $K_5$ , напряжение, на катушку которого подается нажатием кнопки управления  $SB_{74}$ ).

4.8 Задать симметричный режим работы ШИП якоря, для этого установить тумблер в положение «Симметр.» (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.9 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.10 Разогнать двигатель (ДПТ НВ) и резистором  $R_{21}$  установить номинальное напряжение на якоре ДПТ НВ по прибору  $PV_1$ , при этом замерить угловую скорость ДПТ НВ по прибору  $BR_1$ , рад/с. и ток якоря по прибору  $PA_1$ , А. Результаты опыта занести в таблицу 1.1. Выполнить необходимые вычисления.

4.11 Провести опыт свободного выбега. Для этого отключить двигатель (ДПТ НВ) от широтно-импульсного преобразователя нажатием кнопки управления  $SB_{73}$ , одновременно выбрать на панели РКУ режим торможения и записи значений в память.

4.12 После остановки двигателя (ДПТ НВ) отключить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.13 Выбрать на панели РКУ режим просмотра значений торможения и просмотреть данные угловой скорости и времени, записанные в процессе торможения. Значения угловой скорости и времени (соответственно индикаторы 3 и 4) занести в таблицу 1.2.

4.14 По завершении экспериментального исследования выключить ШИП якоря и ШИП возбуждения (тумблеры в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %» и в окошке «Скважность (возбуждение), %» соответственно). Отключить ДПТ НВ от ШИП контактором  $K_5$ , нажав кнопку  $SB_{73}$ . Отключить стенд от сети (выключить автоматические выключатели, расположенные в левой нижней части стенда – надпись «Сеть») и снять установленные переключатели.

4.15 Построить кривую выбега  $\omega = f(t)$ .

4.16 Используя результаты опытов, по пункту 3.2 определить суммарный момент инерции и маховый момент агрегата. Необходимые данные занести в таблицу 1.3.

4.17 Составить отчёт и сделать заключения о проделанной работе.

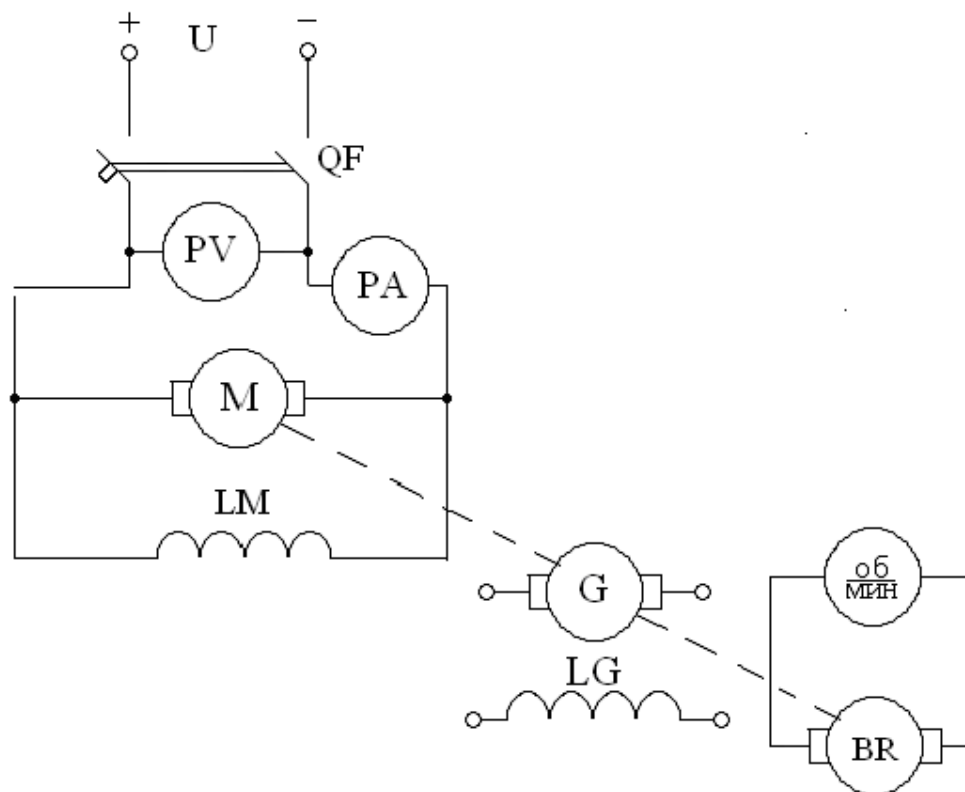


Рисунок 1.5 – Функциональная схема лабораторной установки

## 5 Содержание отчёта

5.1 Название работы.

5.2 Цель работы.

5.3 Функциональная схема лабораторной установки.

5.4 Таблицы с результатами опытов.

5.5 Графические построения.

5.6 Расчеты.

5.7 Выводы по результатам проделанной работы.

## 6 Контрольные вопросы

6.1 Запишите уравнения, описывающие поступательное и вращательное движение элементов в механической части электропривода.

6.2 Поясните, для чего выполняется операция приведения?

6.3 Поясните, что такое динамический момент электропривода.

6.4 Дайте понятия механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины и приведите примеры.

6.5 Дайте понятие жёсткости механической характеристики?

6.6 Поясните, в каком случае в электроприводе возникает неустановившееся движение?

6.7 Расскажите, что такое маховый момент и какова его зависимость от момента инерции системы электропривода?

6.8 Поясните, на какие свойства электропривода влияет величина момента инерции и махового момента?

6.9 Опишите, в чём состоит метод свободного выбега.

6.10 Поясните, как изменится время выбега агрегата, если на валу двигателя установить маховик?

## Лабораторная работа №2

### Снятие и исследование электромеханических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

#### 1 Цель работы:

- приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению скоростных и механических характеристик ДПТ независимого возбуждения;
- получить практическое подтверждение теоретическим сведениям о характеристиках ДПТ независимого возбуждения.

#### 2 Оборудование рабочего места:

- лабораторный стенд;
- методические указания по выполнению лабораторной работы.

#### 3 Краткие теоретические сведения

Основная схема включения двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения представлена на рисунке 2.1.

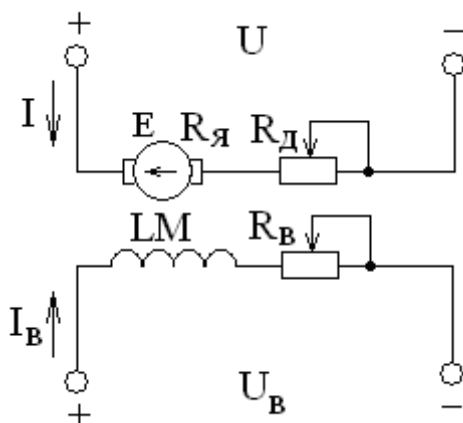


Рисунок 2.1 – Схема включения ДПТ независимого возбуждения

На этой схеме приняты следующие обозначения:  $I$ ,  $I_в$  – токи в цепях обмоток якоря и возбуждения;  $R_я = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} + r_{щ}$  – сопротивление якоря, состоящее из сопротивлений обмотки якоря  $r_{оя}$ , добавочных полюсов  $r_{дп}$ , компенсационной обмотки  $r_{ко}$  и щётчного контакта  $r_{щ}$ ;  $R_{ов}$  – сопротивление обмотки возбуждения. На схеме показаны добавочные резисторы в цепях обмоток якоря  $R_д$  и возбуждения  $R_в$ .

Вывод уравнений для статических характеристик двигателя проведём при следующих допущениях: реакция якоря не учитывается; момент на валу двигателя

равен электромагнитному моменту. Уравнение напряжения для якорной цепи записывается в виде:

$$U=IR+E \quad (2.1)$$

где  $U$  – напряжение источника питания, В;  
 $R$  – полное сопротивление цепи якоря, Ом;  
 $E$  – ЭДС якоря, В.

ЭДС якоря рассчитывается по формуле

$$E=k\Phi\omega, \quad (2.2)$$

где  $k$ – конструктивный коэффициент двигателя, В·с/рад;  
 $\Phi$  – магнитный поток двигателя, Вб;  
 $\omega$  – угловая скорость двигателя, рад/с.

Электромагнитный момент двигателя определяется

$$M=k\Phi I \quad (2.3)$$

Подставляя (2.2) в (2.1), получаем формулу для электромеханической характеристики  $\omega = f(I)$ :

$$\omega = \frac{U-IR}{k\Phi} \quad (2.4)$$

Формула для механической характеристики  $\omega(M)$  ДПТ параллельного возбуждения получается из (2.4) с использованием выражения (2.3):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (2.5)$$

Уравнения (2.4) и (2.5) можно представить в сокращённой форме записи:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.6)$$

где  $\omega_0$  - скорость идеального холостого хода двигателя,

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}; \quad (2.7)$$

$\Delta\omega$  - изменение угловой скорости, вызванное нагрузкой двигателя,

$$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (2.8)$$

Таким образом, как это следует из (2.4) и (2.5), электромеханическая и механическая характеристики ДПТ параллельного возбуждения представляют собой прямые линии.

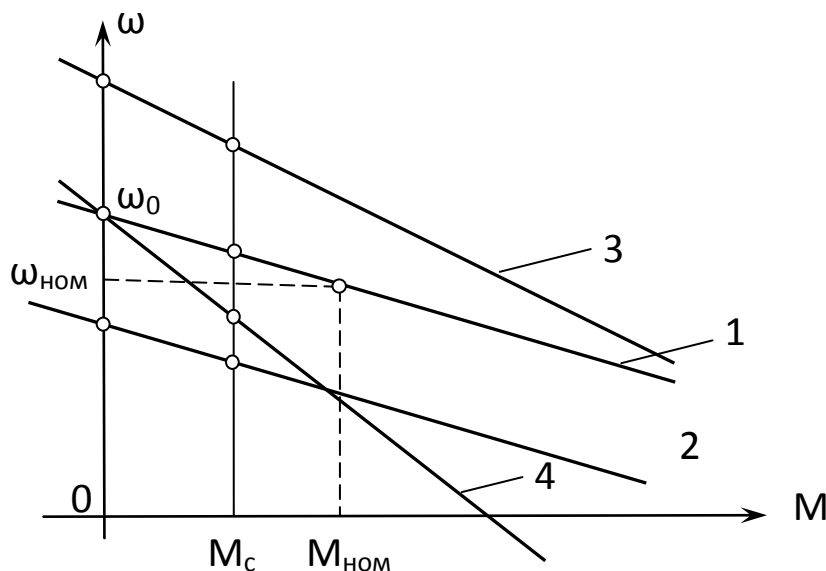


Рисунок 2.2 – Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения

Выражение (2.8) показывает, что изменение скорости вращения двигателя, обусловленное изменением его нагрузки, прямо пропорционально электрическому сопротивлению цепи якоря  $R$ . Поэтому номинальному сопротивлению цепи якоря  $R = R_{\text{я}}$  соответствует наименьшее изменение скорости  $\Delta\omega$ . В этом случае электромеханическая и механическая характеристики являются наиболее жёсткими. Такие характеристики называют естественными (прямая 1, рисунок 2.2). Прямые 2 – 4 называются искусственными характеристиками. Характеристика 2 построена при пониженном напряжении на якоре, характеристика 3 – при ослаблении магнитного потока, характеристика 4 – при введении добавочного сопротивления  $R_{\text{д}}$  в цепь якоря.

### Описание универсального лабораторного стенда

Для исследования статических характеристик ДПТ НВ универсальный стенд оснащен двухдвигательным электромашинным агрегатом, в который входят:

- исследуемый двигатель – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ).
- нагрузочный двигатель – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД).

Для измерения скорости вращения электромашинного агрегата используется импульсный датчик положения, имеющий 90 отверстий.

Для питания обмоток якоря и возбуждения ДПТ НВ в состав стенда входит трехфазный широтно-импульсный преобразователь (ШИП), два плеча которого используются для получения реверсивного ШИП для питания якоря ДПТ,

оставшееся плечо используется в качестве нереверсивного ШИП для питания обмотки возбуждения ДПТ.

Реверсивный ШИП может работать в симметричном (поочередное диагональное включение) режиме или несимметричном (диагональное включение одной пары транзисторов).

Для питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в стенде используется инвертор, представляющий собой трехфазный мост на IGBT-транзисторах, собранных в одном силовом модуле.

Для регистрации измеряемых величин в процессе выполнения экспериментальных исследований в состав стенда входит блок измерения (на базе цифрового измерительного прибора), который позволяет проводить измерение постоянного (переменного) тока и напряжения (действующее или среднее значение).

По измеренным величинам могут быть вычислены:

- частота напряжения/тока;
- фазовый сдвиг между током и напряжением;
- активная, реактивная, полная мощности.

Блок измерения позволяет осуществить индикацию измеренных величин и передачу данных на компьютер через интерфейс RS485.

Релейно-контакторная схема, входящая в состав лабораторного стенда, позволяет осуществлять требуемые коммутации и дистанционное подключение электромашинного агрегата к источникам питания, реализуя требуемые схемы включения.

Для исследования искусственных (реостатных) статических характеристик ДПТ НВ в состав стенда включены 3 переменных резистора (R1, R2, R3).

Паспортные данные двигателей электромашинного агрегата

#### **ДПТ НВ**

Тип – ПЛ-062

Номинальная мощность – 90 Вт

Номинальное напряжение – 220 В

Номинальный ток – 0,71 А

Частота вращения – 1500 об/мин

Номинальный КПД – 57,5 %

#### **АД с короткозамкнутым ротором**

Тип – АИР56А4У3

Номинальная мощность – 120 Вт

Номинальная частота вращения – 1350 об/мин

Номинальное скольжение – 10 %

КПД = 58 %,  $\cos\varphi = 0,66$

( $M_{\max}/M_{\text{ном}}$ ) = 2,2      ( $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$ ) = 2,3,

( $M_{\text{min}}/M_{\text{ном}}$ ) = 1,8,      ( $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ ) = 5,0



## 4 Порядок выполнения работы

4.1 Собрать схему подключения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) и инвертора (И) к сети переменного тока (рисунок 2.3)

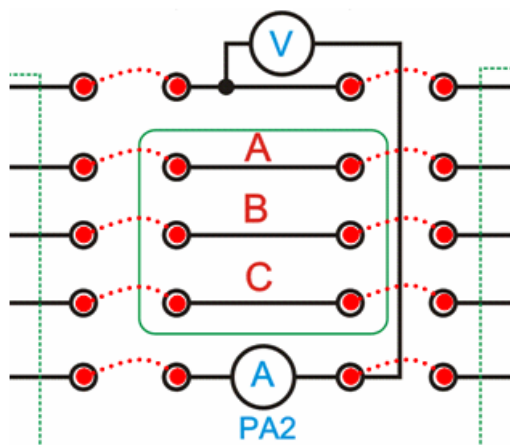


Рисунок 2.3 – Схема подключения ШИП и И к трехфазному источнику с организацией общей сети постоянного тока

4.2 Собрать схему подключения задания для ШИП (рисунок 2.4)

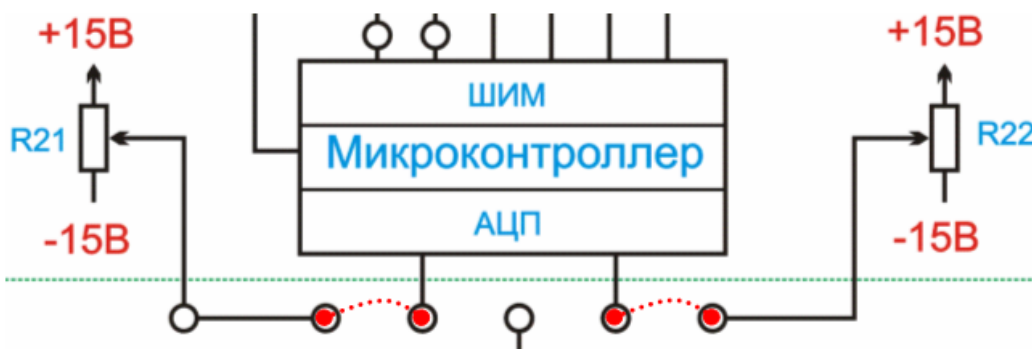


Рисунок 2.4 – Схема подключения задания для ШИП

4.3 Собрать схему подключения напряжения задания для И (рисунок 2.5)

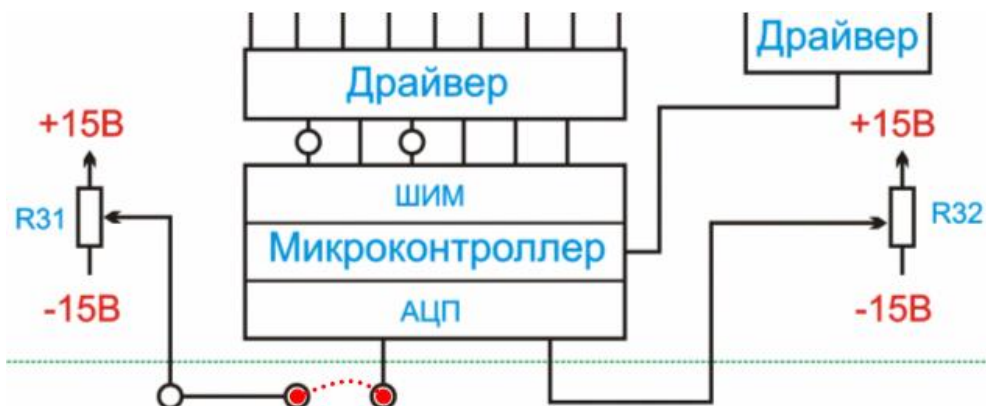


Рисунок 2.5 – Схема подключения задания для И

4.4 Собрать схему подключения якоря (Я) и обмотки возбуждения (ОВ) ДПТ НВ к ШИП для экспериментального исследования естественной характеристики (рисунок 2.6).

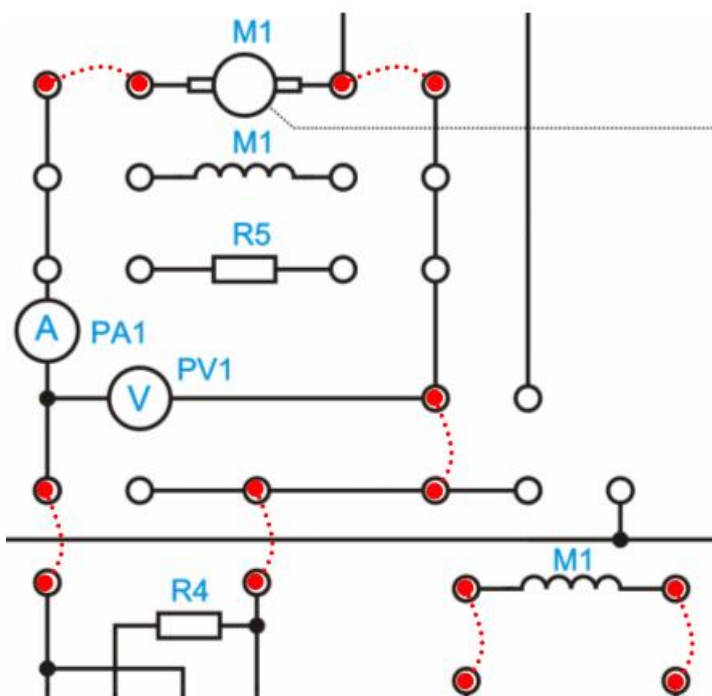


Рисунок 2.6 – Схема подключения Я и ОВ ДПТ НВ к ШИП

4.5 Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «выключено», а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

4.6 Включить ШИП возбуждения (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (возбуждение), %») и резистором  $R22$  установить номинальный ток возбуждения ДПТ НВ равный 0,18 А по прибору  $PA4$ .

4.7 Подключить релейно-контакторную схему управления (включить тумблер  $SA70$ ).

4.8 Подключить якорь ДПТ НВ к ШИП якоря (подключение якоря к ШИП осуществляется с помощью контактора  $K5$ , напряжение на катушку которого подается нажатием кнопки управления  $SB74$ ).

4.9 Задать симметричный режим работы ШИП якоря, для этого установить тумблер в положение «Симметр.» (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.10 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.11 Разогнать исследуемый двигатель (ДПТ НВ) и резистором  $R21$  установить номинальное напряжение на якоря ДПТ НВ по прибору  $PV1$ , при этом замерить угловую скорость ДПТ НВ по прибору  $BR1$ , рад/с.

4.12 Выключить ШИП якоря (положение резистора  $R21$  не изменять).

4.13 Выбрать режим работы инвертора  $(U-IR)/f = Const$  и резистором  $R31$  задать частоту инвертора равной нулю прибор «Частота, Гц»

4.14 Подключить нагрузочный двигатель АД к инвертору И, для этого предварительно тумблером  $SA71$  задать схему включения обмоток статора АД «треугольник», затем с помощью магнитного пускателя  $K1$  подключить АД к инвертору, нажав кнопку  $SB70$  «Вперед».

4.15 Плавно увеличивая частоту инвертора (прибор «Частота, Гц») с помощью резистора  $R31$  разогнать АД до угловой скорости, соответствующей скорости ДПТ НВ по п. 1.11., контроль угловой скорости проводить по прибору  $BR1$ , рад/с.

4.16 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.17 Задать для ДПТ НВ режим идеального холостого хода, для этого с помощью резистора  $R31$  подстроить выходную частоту инвертора так, чтобы ток, протекающий по обмотке якоря, стал равен нулю (прибор  $PA1$ ).

### **Исследование естественной характеристики ДПТ НВ**

4.18 Приступить к исследованию естественной механической характеристики исследуемого ДПТ НВ. Для этого, выполнив все действия согласно пунктам 4.1. – 4.18, приступают к снятию характеристики ДПТ НВ в двигательном режиме. Для этого, ступенчато уменьшая частоту на выходе инвертора, снимают последовательно ряд точек установившегося режима работы ДПТ НВ (обычно 4-5 точек). Показания приборов  $BR1$  (угловая скорость, рад/с),  $PA1$  (ток якоря, А) заносят в таблицу 2.1.

#### Примечание:

1) При проведении исследований, уменьшая частоту инвертора, необходимо поддерживать ток возбуждения ДПТ НВ равный номинальному значению (прибор  $PA4$  с помощью резистора  $R22$ ), так как в процессе работы ДПТ НВ происходит его нагрев, и, следовательно, происходит увеличение сопротивления обмотки возбуждения, что приводит при заданном напряжении на обмотке возбуждения («Скважность (возбуждение), %») к уменьшению тока возбуждения, а, значит, и магнитного потока двигателя.

2) При проведении исследований, уменьшая частоту инвертора, необходимо также поддерживать постоянным и напряжение на якоре ДПТ НВ (прибор  $PVI$ ), моделируя тем самым сеть постоянного тока бесконечной мощности. В действительности, при увеличении нагрузки на валу ДПТ НВ ток якоря возрастает, значит, возрастает и ток, протекающий по ШИП, что при конечной мощности ШИП приводит к снижению напряжения на его выходе.

### **Исследование искусственных характеристик ДПТ НВ при пониженном напряжении на якоре**

4.19 Экспериментальное исследование искусственных статических характеристик ДПТ НВ при пониженном напряжении на якоре проводят аналогично исследованию естественной характеристики, с той лишь разницей, что резистором  $R21$  по прибору  $PV1$  необходимо установить напряжение на якоре ДПТ НВ 170 В. При выполнении исследований необходимо поддерживать на якоре (прибор  $PV1$ ) это напряжение. Результаты исследований – показания приборов  $BR1$  (угловая скорость, рад/с),  $PA1$  (ток якоря, А) занести в таблицу 2.1.

### **Исследование искусственных характеристик ДПТ НВ при ослабленном потоке**

4.20 Экспериментальное исследование искусственных статических характеристик ДПТ НВ при ослабленном потоке возбуждения проводят аналогично исследованию естественной характеристики, с той лишь разницей, что резистором  $R22$  по прибору  $PA4$  необходимо установить не номинальный ток возбуждения ДПТ НВ  $I_B = 0,12$  А. При выполнении исследований необходимо поддерживать этот ток (прибор  $PA4$ ) на заданном уровне. Результаты исследований – показания приборов  $BR1$  (угловая скорость, рад/с),  $PA1$  (ток якоря, А) занести в таблицу 2.1.

### **Исследование искусственных (реостатных) характеристик ДПТ НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений**

4.21 Экспериментальное исследование реостатных статических характеристик ДПТ НВ при введении в цепь якоря добавочного сопротивления  $R_d$  проводят аналогично исследованию естественной характеристики, с той лишь разницей, что необходимо собрать схему ДПТ НВ с включенными в цепь якоря сопротивлениями (рисунок 2.7). Перед проведением экспериментальных исследований необходимо установить с помощью омметра требуемое значение сопротивления реостата. Величина сопротивления изменяется с помощью круговых потенциометров  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  на панели стенда.

Результаты исследований – показания приборов  $BR1$  (угловая скорость, рад/с),  $PA1$  (ток якоря, А) занести в таблицу 2.1.

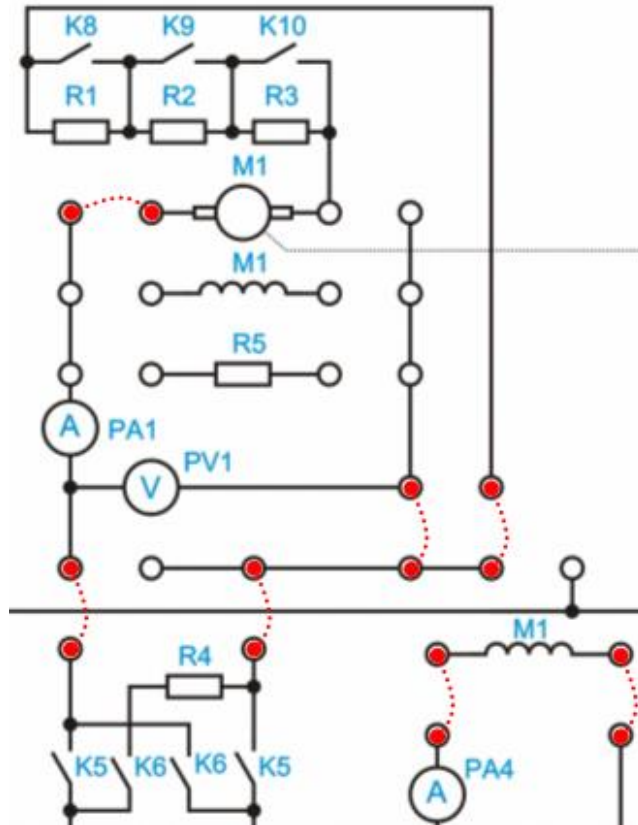


Рисунок 2.7 – Схема подключения Я и ОВ ДПТ НВ к ШИП с добавочными резисторами

### Обработка полученных результатов.

Мощность  $P$  (Вт), потребляемая ДПТ НВ, определяется выражением:

$$P = U \cdot I \pm (I^2 \cdot R_{\text{Я}} + I^2 \cdot R_{\text{Д}}),$$

где  $I^2 \cdot R_{\text{Я}}$  – потери мощности на сопротивлении якоря, Вт;

$I^2 \cdot R_{\text{Д}}$  – потери мощности на добавочном сопротивлении (в случае реостатной характеристики), Вт;

знак "+" относится к двигательному режиму работы ДПТ НВ;

знак "-" относится к тормозным режимам работы ДПТ НВ.

Момент ДПТ НВ определяется выражением:

$$M = \frac{P}{\omega}$$

После выполнения расчетов и заполнения таблицы 2.1 приступают к построению статических электромеханических  $\omega=f(I)$  и механических характеристик  $\omega=f(M)$ .

Таблица 2.1 – Результаты исследований статических характеристик ДПТ НВ

Характеристика	Координата	Ед. изм	Нагрузка				
			х.х.	1	2	3	4
1 Естественная характеристика  $U = U_{НОМ} = 220В$ $I_B = I_{ВНОМ} = 0,18А$ $R_D = 0$	$\omega$	рад/с					
	I	А					
	$I^2 R_{я}$	Вт					
	$I^2 R_D$	Вт	0	0	0	0	0
	P	Вт					
	M	Н · м					
2 Искусственная характеристика  $U = 170 В$ $I_B = I_{ВНОМ} = 0,18А$ $R_D = 0$	$\omega$	рад/с					
	I	А					
	$I^2 R_{я}$	Вт					
	$I^2 R_D$	Вт	0	0	0	0	0
	P	Вт					
	M	Н · м					
3 Искусственная характеристика  $U = U_{НОМ} = 220В$ $I_B = 0,12 А$ $R_D = 0$	$\omega$	рад/с					
	I	А					
	$I^2 R_{я}$	Вт					
	$I^2 R_D$	Вт	0	0	0	0	0
	P	Вт					
	M	Н · м					
4 Искусственная характеристика  $U = U_{НОМ} = 220В$ $I_B = I_{ВНОМ} = 0,18А$ $R_D \neq 0$	$\omega$	рад/с					
	I	А					
	$I^2 R_{я}$	Вт					
	$I^2 R_D$	Вт					
	P	Вт					
	M	Н · м					

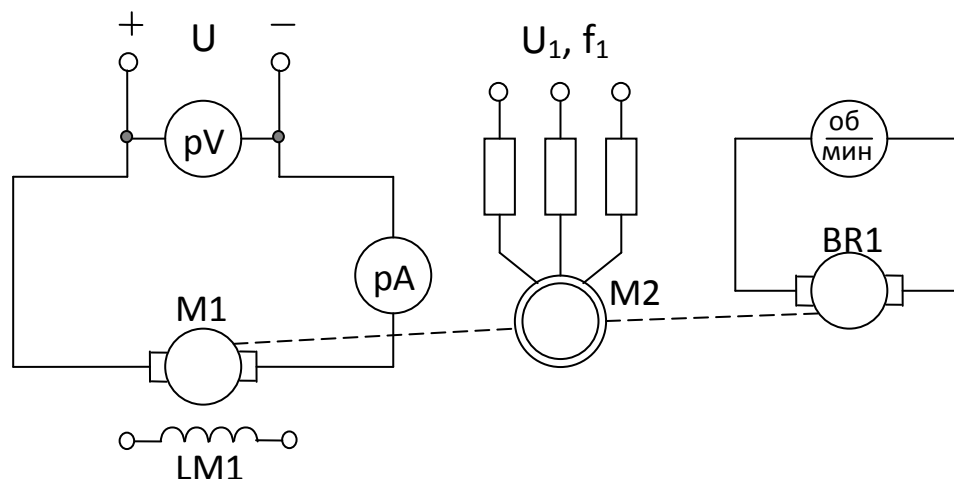


Рисунок 2.8 – Функциональная схема лабораторной установки

## 5 Содержание отчёта

- 5.1 Название работы.
- 5.2 Цель работы.
- 5.3 Функциональная схема лабораторной установки.
- 5.4 Таблица с результатами исследования характеристик.
- 5.5 Расчеты
- 5.6 Графические построения.
- 5.7 Выводы по результатам проделанной работы о соответствии полученных характеристик теоретическим сведениям.

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1 Нарисуйте схему включения ДПТ независимого возбуждения и поясните назначение всех элементов.
- 6.2 Назовите все энергетические режимы работы ДПТ НВ.
- 6.3 Напишите и объясните уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ НВ.
- 6.4 Охарактеризуйте основные способы регулирования скорости ДПТ НВ.
- 6.5 Поясните, как происходит динамическое торможение ДПТ НВ.
- 6.6 Поясните, как происходит торможение противовключением ДПТ НВ.
- 6.7 Поясните, что такое скорость идеального холостого хода ДПТ НВ. Почему ток в якоре при скорости идеального холостого хода равен нулю?
- 6.8 Поясните, как изменится механическая и электромеханическая характеристика при уменьшении напряжения на якоре, при ослаблении магнитного потока двигателя, при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря ДПТ НВ. Начертите эти характеристики.

# Лабораторная работа №3

## Исследование механических характеристик электропривода с асинхронным двигателем

### 1 Цель работы:

- изучить статические механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (естественные и искусственные);
  - освоить методику расчета статических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным (естественных и искусственных)
  - получить практические навыки по экспериментальному исследованию статических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;
  - проверить опытным и расчётным путём зависимости  $\omega = f(M)$  в двигательном режиме.

### 2 Оборудование рабочего места:

- лабораторный стенд;
- методические указания по выполнению лабораторной работы.

### 3 Краткие теоретические сведения

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором находят широкое применение в приводах различных промышленных механизмов благодаря простоте их конструкции, надежности в эксплуатации, высоким энергетическим показателям и сравнительно низкой стоимости.

Момент электромагнитный, развиваемый асинхронным двигателем определяется выражением:

$$M = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (3.1)$$

- где  $U_{\Phi}$  – действующее значение фазного напряжения сети, В;  
 $R_1, R_2'$  – активные сопротивления обмоток соответственно фазы статора и фазы ротора, приведенные к цепи статора, Ом;  
 $X_k$  – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, Ом;  
 $S$  – скольжение двигателя;  
 $\omega_0$  – угловая скорость поля двигателя, рад/с.

Скольжение двигателя – это относительный параметр, характеризующий разность скоростей (частот) вращения магнитного поля статора и ротора:



$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (3.2)$$

Угловая скорость вращения магнитного поля статора определяется:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \quad (3.3)$$

где  $f_1$  – частота напряжения питающей сети, Гц;  
 $p$  – число пар полюсов двигателя.

Номинальную угловую скорость двигателя можно определить, зная номинальную частоту вращения  $n_{\text{НОМ}}$  [об/мин] по выражению:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30}. \quad (3.4)$$

Номинальное скольжение двигателя

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_0}. \quad (3.5)$$

Статическую механическую характеристику АД  $\omega = f(M)$  (здесь  $M$  – момент электромагнитный) можно построить, используя формулу (3.1) и уравнение связи между угловой скоростью вала двигателя и скольжением:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S). \quad (3.6)$$

С учетом того, что момент электромагнитный по формуле (3.1) имеет экстремум (критическое значение), то возможна и другая форма записи зависимости  $M = f(s)$ , называемая формулой Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot S_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2 \cdot a \cdot S_k}, \quad (3.7)$$

где  $M_k$  – максимальное (критическое) значение момента, Н·м;  
 $s_k$  – критическое скольжение, соответствующее  $M_k$ ;  
 $a$  – параметр ( $a = R_1/R'_2$ ).

Момент критический и скольжение критическое определяются выражениями:

$$M_k = \pm \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}, \quad (3.8)$$

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (3.9)$$

В некоторых случаях при построении механической характеристики используют приближённые формулы. Если пренебречь активным сопротивлением статора, т.е. считать  $R_1=0$ , то механическая характеристика АД в этом случае будет определяться упрощённой формулой Клосса (эта формула обычно используется для расчета рабочего участка механической характеристики):

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (3.10)$$

Обычно в каталогах на асинхронные двигатели не приведены параметры схемы замещения (активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток), поэтому вышеприведенные формулы имеют ограниченное применение для расчета статических характеристик АД. В каталогах на асинхронные двигатели помимо номинальных данных ( $P_{2\text{НОМ}}$ ,  $n_{\text{НОМ}}$ ,  $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ ,  $\eta_{\text{НОМ}}$  и др.) приводится также кратность максимального момента в двигательном режиме по отношению к номинальному моменту (перегрузочная способность АД)  $\lambda_m = M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}$ . Умножив номинальный момент двигателя на кратность максимального момента, нетрудно найти значение критического момента, используемого в формуле (3.10).

Значение  $S_k$  в каталогах не приводится, но оно может быть найдено по известным параметрам асинхронного двигателя:

$$S_k = S_{\text{НОМ}} \cdot \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right). \quad (3.11)$$

Таким образом, используя формулы (3.6, 3.10 и 3.11), можно рассчитать статическую механическую характеристику асинхронного двигателя  $\omega = f(M)$  по каталожным данным. Для этого необходимо, изменяя скольжение в требуемых пределах с определенным шагом, вычислять значения момента по (3.10) и значения скорости по (3.6). Следует иметь в виду, что рассчитанная таким образом характеристика будет представлять собой зависимость угловой скорости вала асинхронного двигателя от момента на его валу.

На рисунке 3.1 представлен примерный вид статической механической характеристики АД, рассчитанной по формулам (3.1), (3.8), (3.9).

Характерные точки механической характеристики (рисунок 3.1):

- 1)  $S = 0$ ,  $\omega = \omega_0$ ,  $M = 0$  – точка идеального холостого хода;
- 2)  $S = 1$ ,  $\omega = 0$ ,  $M = M_{\text{КЗ}} = M_{\text{П}}$  – точка короткого замыкания;
- 3)  $S = S_{\text{К.Д.}}$ ,  $M = M_{\text{К.Д.}}$ ,  $S = -S_{\text{К.Г.}}$ ,  $M = -M_{\text{К.Г.}}$  – критические точки в двигательном и генераторном режимах;
- 4)  $S \rightarrow \pm \infty$ ,  $\omega \rightarrow \pm \infty$ ,  $M \rightarrow 0$  – асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

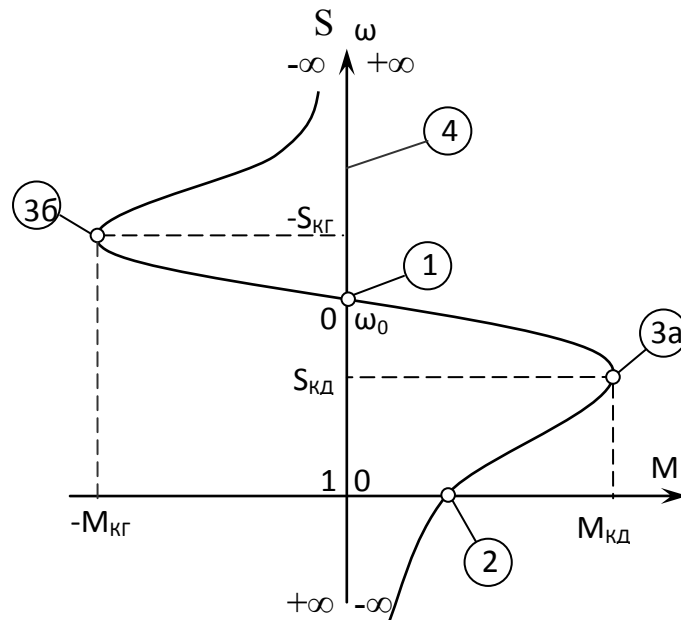


Рисунок 3.1 – Статическая механическая характеристика АД

Характерные точки механической характеристики (рисунок 3.1):

- 1)  $S = 0$ ,  $\omega = \omega_0$ ,  $M = 0$  – точка идеального холостого хода;
- 2)  $S = 1$ ,  $\omega = 0$ ,  $M = M_{кз} = M_{п}$  – точка короткого замыкания;
- 3)  $S = S_{кд}$ ,  $M = M_{кд}$ ,  $S = -S_{кг}$ ,  $M = -M_{кг}$  – критические точки в двигательном и генераторном режимах;
- 4)  $S \rightarrow \pm \infty$ ,  $\omega \rightarrow \pm \infty$ ,  $M \rightarrow 0$  – асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

### Описание универсального лабораторного стенда

Для исследования статических характеристик асинхронного электродвигателя универсальный стенд оснащен двухдвигательным электромашинным агрегатом, в который входят:

- исследуемый двигатель – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором ( в дальнейшем АД).
- нагрузочный двигатель – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ).

Для измерения скорости вращения электромашинного агрегата используется импульсный датчик положения, имеющий 90 отверстий.

Для питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в стенде используется инвертор, представляющий собой трехфазный мост на IGBT-транзисторах, собранных в одном силовом модуле.

Для питания обмоток якоря и возбуждения ДПТ НВ в состав стенда входит трехфазный широтно-импульсный преобразователь (ШИП), два плеча которого используются для получения реверсивного ШИП для питания якоря ДПТ,

оставшееся плечо используется в качестве нереверсивного ШИП для питания обмотки возбуждения ДПТ.

Реверсивный ШИП может работать в симметричном (поочередное диагональное включение) режиме или несимметричном (диагональное включение одной пары транзисторов).

Для регистрации измеряемых величин в процессе выполнения экспериментальных исследований в состав стенда входит блок измерения (на базе цифрового измерительного прибора), который позволяет проводить измерение постоянного (переменного) тока и напряжения (действующее или среднее значение).

По измеренным величинам могут быть вычислены:

- частота напряжения/тока;
- фазовый сдвиг между током и напряжением;
- активная, реактивная, полная мощности.

Блок измерения позволяет осуществить индикацию измеренных величин и передачу данных на компьютер через интерфейс RS485.

Релейно-контакторная схема, входящая в состав лабораторного стенда, позволяет осуществлять требуемые коммутации и дистанционное подключение электромашиного агрегата к источникам питания, реализуя требуемые схемы включения.

### **Паспортные данные двигателей электромашиного агрегата**

#### **ДПТ НВ**

Тип – ПЛ-062

Номинальная мощность – 90 Вт

Номинальное напряжение – 220 В

Номинальный ток – 0,71 А

Частота вращения – 1500 об/мин

Номинальный КПД – 57,5 %

#### **АД с короткозамкнутым ротором**

Тип – АИР56А4У3

Номинальная мощность – 120 Вт

Число пар полюсов – 2

Номинальная частота вращения – 1350 об/мин

Номинальное скольжение – 10 %

КПД = 58 %

$\cos\varphi = 0,66$

$(M_{\max}/M_{\text{ном}}) = 2,2$

$(M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}) = 2,3$

$(M_{\text{min}}/M_{\text{ном}}) = 1,8$

$(I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}) = 5,0$

## 4 Порядок выполнения работы

4.1 Собрать схему подключения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) и инвертора (И) к сети переменного тока (рисунок 3.2)

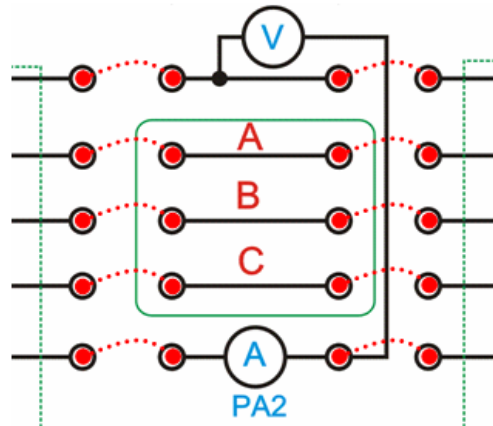


Рисунок 3.2 – Схема подключения ШИП и И к трехфазному источнику с организацией общей сети постоянного тока

4.2 Собрать схему задания напряжения для ШИП (рисунок 3.3)

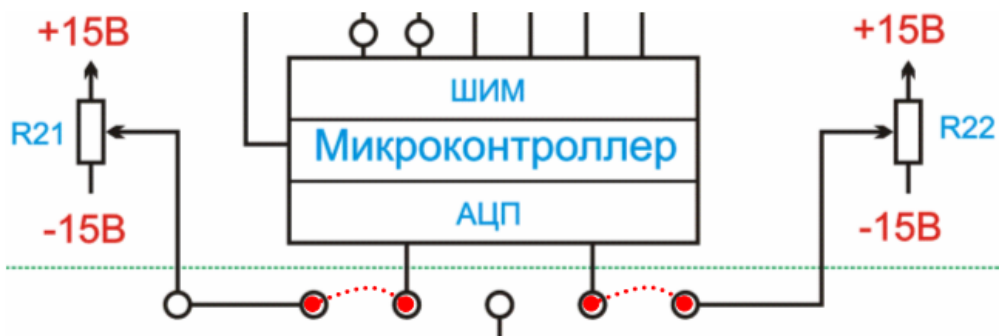


Рисунок 3.3 – Схема подключения напряжения задания для ШИП

4.3 Собрать схему подключения напряжения задания для И (рисунок 3.4)

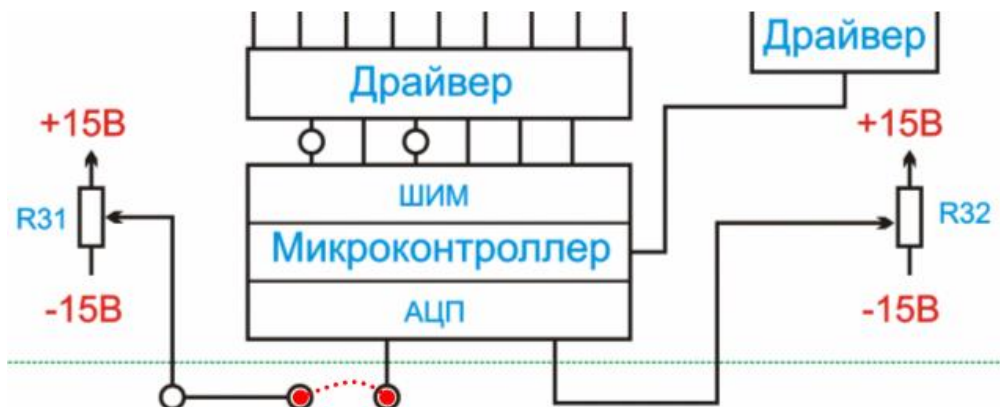


Рисунок 3.4 – Схема подключения напряжения задания для И

4.4 Собрать схему подключения якоря (Я) и обмотки возбуждения (ОВ) нагрузочной машины (ДПТ НВ) к ШИП (рисунок 3.5)

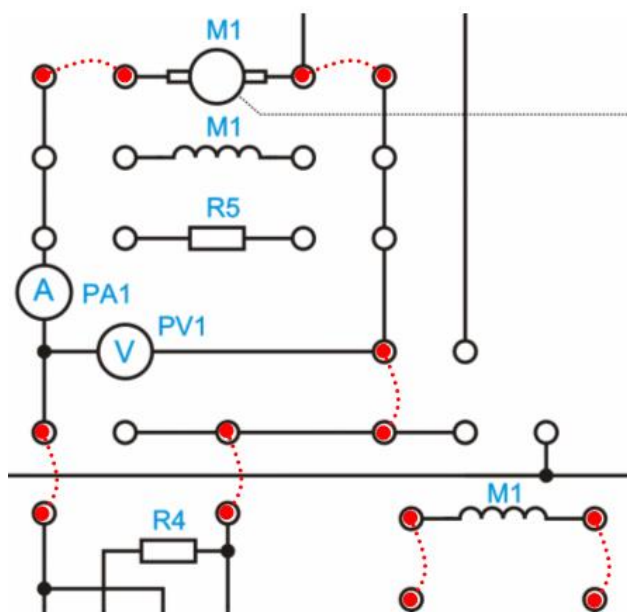


Рисунок 3.5 – Схема подключения Я и ОВ ДПТ НВ к ШИП

4.5 Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «выключено», а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

4.6 Подключить релейно-контакторную схему управления (включить тумблер SA70).

4.7 Подключить исследуемый двигатель АД к инвертору И, для этого предварительно тумблером SA71 задать схему включения обмоток статора АД «звезда» (тумблер SA71 в положение выключено).

4.8 С помощью магнитного пускателя KI подключить АД к инвертору, нажав кнопку SB70 «Вперед».

4.9 Выбрать режим работы инвертора  $(U-IR)/f = Const$  и плавно увеличивая частоту инвертора (прибор «Частота, Гц») с помощью резистора R31 задать частоту инвертора равной номинальной (50 Гц). При этом исследуемый двигатель разгонится до скорости холостого хода (нагрузка отсутствует). Замерить угловую скорость АД по прибору BR1, рад/с.

Примечание:

1) При выбранном режиме работы инвертора  $(U-IR)/f = Const$  установив по прибору «Частота, Гц» частоту 50 Гц, на приборе «PV3, В» будет отображаться номинальное напряжение на выходе инвертора.

2) Следует учесть, что прибор «PV3, В» измеряет действующее значение линейного напряжения на выходе инвертора.

3) Так же следует учесть, что в лабораторном стенде в качестве исследуемого асинхронного двигателя используется АД с номинальным фазным напряжением 220 В (при соединении обмоток статора в «звезду»), а используемый инвертор вырабатывает номинальное напряжение 127 В, т.е. меньшее, чем требуемое для исследования естественной характеристики АД. Этот факт необходимо учитывать при обработке результатов исследований (см. Обработка результатов исследований).

4.10 Отключить исследуемый двигатель АД от преобразователя частоты, нажав кнопку SB71.

4.11 Включить ШИП возбуждения (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (возбуждение), %») и резистором R22 установить номинальный ток возбуждения ДПТ НВ равный 0,18 А по прибору PA4.

4.12 Подключить якорь ДПТ НВ к ШИП якоря (подключение якоря к ШИП осуществляется с помощью контактора K5, напряжение на катушку которого подается нажатием кнопки управления SB74).

4.13 Задать симметричный режим работы ШИП якоря, для этого установить тумблер в положение «Симметр.» (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.14 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.15 Разогнать нагруженный двигатель (ДПТ НВ) до скорости холостого хода АД, плавно увеличивая скважность резистором R21. Угловую скорость контролировать по прибору BR1, рад/с.

4.16 Подключить исследуемый двигатель АД к инвертору И, нажав кнопку управления SB70.

### **Исследование естественной характеристики АД**

4.17 Ступенчато уменьшая скважность ШИП якоря, снимают последовательно ряд точек установившегося режима работы АД в двигательном режиме работы (I квадрант плоскости  $\{\omega, M\}$ ). Показания приборов BR1 (угловая скорость, рад/с), PA1 (ток якоря, А), PV1 (напряжение на якоре, В), PA3 (ток статора, А) с учетом знака заносят в таблицу 3.1.

4.18 Ступенчатое уменьшение скважности ШИП якоря приводит к ступенчатому увеличению нагрузки на валу АД. При этом АД работает в двигательном режиме работы, потребляя электрическую энергию от И, преобразует ее за вычетом потерь в механическую энергию и передает ее на вал ДПТ НВ, который работает в генераторном режиме, преобразовывая эту энергию за вычетом потерь в электрическую энергию, которая через ШИП (а он реверсивный) и звено постоянного тока передается на инвертор И, о чем свидетельствует показание амперметра PA2.

*Примечание:*

1) При исследовании естественной механической характеристики АД (для определения момента потерь вращения) установить с помощью резистора R21 нагрузку на валу АД равную номинальной, при этом по обмотке статора будет протекать номинальный ток (прибор PA3). В этом режиме работы записать отдельно в отчет по лабораторной работе показания приборов: PA1 – ток якоря ДПТ, PV1 – напряжение на якоре ДПТ и BR1 – угловую скорость.

### **Исследование искусственных характеристик АД при пониженном напряжении на статоре**

4.19 Экспериментальное исследование искусственных статических характеристик АД при пониженном напряжении на статоре проводят аналогично исследованию естественной характеристики, с той лишь разницей, что согласно п.4.9 нужно выбрать режим работы инвертора не  $(U-IR)/f = \text{Const}$ , а «Независимое управление» и резистором R31 задать номинальную частоту – 50 Гц (по прибору «Частота, Гц»), а резистором R32 по прибору PV3 установить не номинальное напряжение на статоре АД, а заданное. Например,  $0,6U_{ном}$  или  $0,4U_{ном}$  или другое значение, меньше чем номинальное.

4.20 Далее приступают к исследованию статической характеристики АД при пониженном напряжении на статоре, при этом все действия аналогичны действиям при исследовании естественной характеристики. Показания приборов BR1 (угловая скорость, рад/с), PA1 (ток якоря, А), PV1 (напряжение на якоре, В), PA3 (ток статора, А) заносят в таблицу 3.1.

### **Исследование искусственных характеристик АД КЗ при пониженной частоте питающего напряжения**

4.21 Экспериментальное исследование искусственных статических характеристик АД при пониженной частоте питающего напряжения проводят аналогично исследованию естественной характеристики, с той лишь разницей, что согласно п.4.9. резистором R31 по прибору «Частота, Гц» необходимо установить не номинальную частоту питающего напряжения, а заданную (меньше номинальной). Например,  $0,6f_{ном}$  или  $0,4f_{ном}$  или другое значение. Показания приборов BR1 (угловая скорость, рад/с), PA1 (ток якоря, А), PV1 (напряжение на якоре, В), PA3 (ток статора, А) заносят в таблицу 3.1.

### **Исследование искусственных характеристик АД КЗ при повышенной частоте питающего напряжения**

4.22 Экспериментальное исследование искусственных статических характеристик АД при повышенной частоте питающего напряжения проводят аналогично исследованию искусственной характеристики при пониженном напряжении на статоре, с той лишь разницей, что резистором R31 по прибору



«Частота, Гц» необходимо установить не номинальную частоту питающего напряжения, а заданную (выше номинальной). Например,  $1,4f_{ном}$  или  $1,8f_{ном}$  или другое значение, а напряжение на выходе инвертора не должно превышать номинальное.

Показания приборов BR1 (угловая скорость, рад/с), PA1 (ток якоря, А), PV1 (напряжение на якоре, В), PA3 (ток статора, А) заносят в таблицу 3.1.

### Обработка результатов исследований

Вал исследуемого двигателя АД и вал нагрузочного ДПТ НВ механически соединены посредством муфты, следовательно, они имеют на валу одинаковый по значению момент (соединение абсолютно жесткое). Но если исследуемый двигатель АД работает в двигательном режиме, то у него момент на валу положительный, в то время, как нагрузочный двигатель ДПТ НВ работает в тормозном (генераторном) режиме работы и момент на его валу отрицательный.

Момент на валу нагрузочного ДПТ НВ определяется по формуле:

$$M = \frac{P}{\omega},$$

где  $\omega$  - угловая скорость ДПТ НВ, рад/с;

$P$  – электромагнитная мощность ДПТ НВ, Вт.

Электромагнитная мощность  $P$  (Вт) определяется выражением:

$$P = U_{я} \cdot I_{я} \pm I_{я}^2 \cdot R_{я},$$

где  $U_{я}$  – напряжение на якоре ДПТ НВ, В; (прибор PV1);

$I_{я}$  – ток якоря ДПТ НВ, А; (прибор PA1);

$R_{я}$  – сопротивление якорной цепи ДПТ НВ, Ом; (см. лаб. раб. № 2);

знак "+" относится к двигательному режиму работы ДПТ НВ;

знак "-" относится к тормозным режимам работы ДПТ НВ.

Момент электромагнитный ДПТ НВ вычислим по формуле:

$$M_{и} = \frac{U_{я} \cdot I_{я} \pm I_{я}^2 \cdot R_{я}}{\omega}$$

где  $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи ДПТ НВ, Ом; (см. лаб. раб. № 1);

$U_{я}$ ,  $I_{я}$  – напряжение на якоре ДПТ НВ, В и ток якоря ДПТ НВ, А;

#### Примечание:

1) При расчете момента на валу АД для естественной характеристики нужно учесть, что напряжение инвертора номинальное не соответствует номинальному

напряжению статора АД, поэтому, чтобы экспериментально построить естественную механическую характеристику исследуемого двигателя АД, необходимо момент на валу, рассчитанный через момент электромагнитный ДПТ НВ помножить на коэффициент равный квадрату отношения напряжений двигателя АД номинального и инвертора И номинального, т.е.:

$$M_e = M_{и} \cdot k = M_{и} \cdot \left( \frac{U_{НОМ}}{U_{И}} \right)^2 = M_{и} \cdot \left( \frac{220}{127} \right)^2$$

Таблица 3.1 – Результаты исследований статических характеристик АД

№ точки	Наименование характеристики	Режим	Данные опыта				Данные расчета		
			I <sub>1</sub>	U <sub>я</sub>	I <sub>я</sub>	ω	P	M <sub>и</sub>	M <sub>е</sub>
			А	В	А	рад/с	Вт	Н·м	Н·м
1	1 Естественная характеристика U <sub>1</sub> = U <sub>1НОМ</sub> = 127 В f = f <sub>НОМ</sub> = 50 Гц	Независимое управление							
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
1	2 Искусственная характеристика U <sub>1</sub> = 90 В f = f <sub>НОМ</sub> = 50 Гц	Независимое управление							
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
1	3 Искусственная характеристика f = 35 Гц U <sub>1</sub> = U <sub>1НОМ</sub> = 127 В	(U-I·R)/f=const							
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
1	4 Искусственная характеристика f = 65 Гц U <sub>1</sub> = U <sub>1НОМ</sub> = 127 В	Независимое управление							
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

4.23 По техническим данным двигателя рассчитать и построить естественную механическую характеристику в двигательном режиме.

4.24 По результатам опытов построить механическую характеристику испытуемого двигателя (на одном графике с рассчитанной характеристикой).

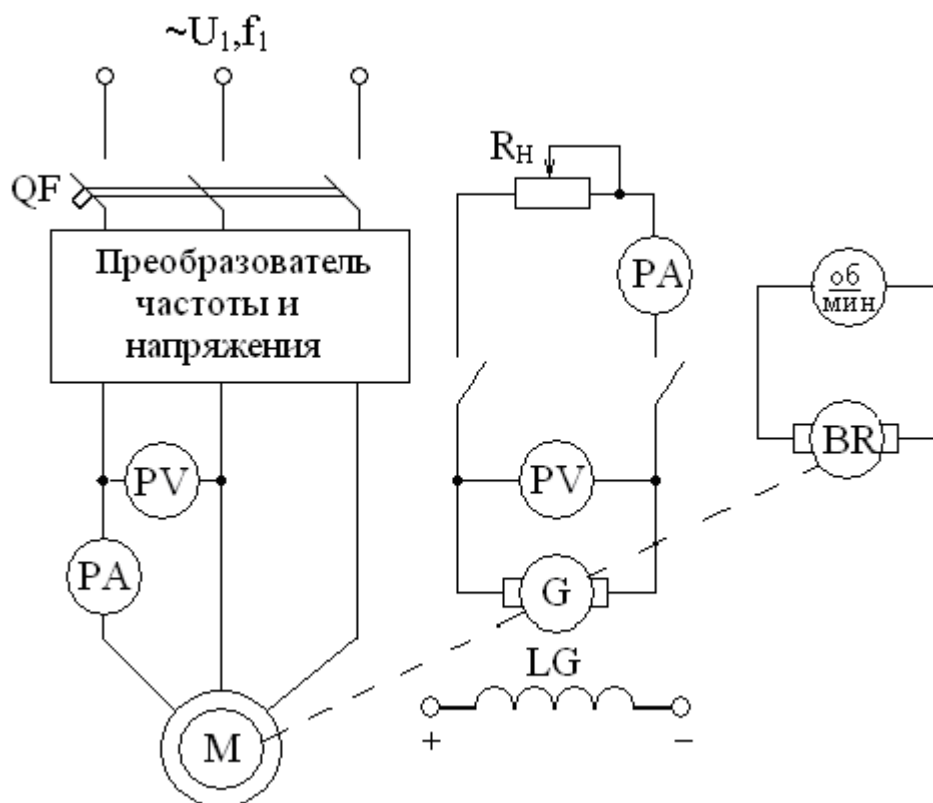


Рисунок 3.6 – Функциональная схема лабораторной установки

## 5 Содержание отчёта

- 5.1 Название работы.
- 5.2 Цель работы.
- 5.3 Функциональная схема лабораторной установки.
- 5.4 Таблицы с результатами опытов.
- 5.5 Расчёты и графические построения.
- 5.6 Выводы по результатам проделанной работы.

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1 Поясните, что такое механическая характеристика АД? Приведите её графическое изображение и покажите на ней характерные точки.
- 6.2 Поясните, что такое перегрузочная способность АД?
- 6.3 Перечислите способы регулирования координат ЭП с АД.
- 6.4 Поясните, от чего зависит скорость идеального холостого хода АД?
- 6.5 Перечислите достоинства и недостатки способа регулирования координат АД с помощью резисторов?

6.6 Поясните, с какой целью при частотном способе производится также и регулирование подводимого к АД напряжения.

6.7 Поясните принцип изменения числа пар полюсов.

6.8 Поясните, какие существуют варианты конструкции роторов АД?

6.9 Поясните, что такое естественная механическая характеристика? В чем разница между естественной и искусственной механической характеристикой?

6.10 Запишите выражение естественной механической характеристики асинхронного двигателя и проанализируйте его.

## **Лабораторная работа №4**

### **Исследование нагрузочных диаграмм электропривода**

#### **1 Цель работы:**

- изучить режимы работы электродвигателей в электроприводах;
- получить опытные данные для построения нагрузочных диаграмм;
- научиться рассчитывать эквивалентный статический момент.

#### **2 Оборудование рабочего места:**

- лабораторный стенд;
- методические указания по выполнению лабораторной работы.

#### **3 Краткие теоретические сведения**

При создании (проектировании) новых ЭП или модернизации уже существующих выбирают такие серийно выпускаемые двигатели, которые обеспечивали бы наилучшее выполнение возлагаемых на них функций и соответствовали бы условиям работы привода и рабочей машины. Их паспортные (номинальные) данные (мощность, напряжение, ток, частота и др.) должны быть близки к расчетным при работе данного ЭП, а конструктивное исполнение должно соответствовать способу его размещения и условиям окружающей среды.

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который будет обеспечивать заданный технологический цикл рабочей машины, иметь конструкцию, соответствующую условиям эксплуатации и компоновки с рабочей машиной, а его нагрев при этом не должен превышать нормативный (допустимый) уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины. Происходящие при этом его повышенный нагрев и ускоренное старение изоляции определяют преждевременный выход самого двигателя из строя, останов рабочей машины и соответствующие экономические потери.

Недопустимым является также использование двигателей завышенной мощности, так как при этом, имея повышенную первоначальную стоимость, ЭП работает с низкими КПД и коэффициентом мощности.

Выбор электродвигателя обычно производится в следующей последовательности: предварительный расчет мощности и выбор двигателя; проверка выбранного двигателя по условиям пуска, перегрузке и нагреву. Если двигатель удовлетворяет условиям проверки, то на этом выбор заканчивается. Если хотя бы одно условие не выполняется, то выбирается двигатель большей мощности и проверка повторяется.

Основой для расчета мощности и выбора двигателя является нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости исполнительного органа рабочей машины.

Нагрузочная диаграмма представляет собой график изменения во времени приведенного к валу двигателя статического момента (или мощности) нагрузки. Она рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи.

На основании анализа режимов работы электроприводов выделяются наиболее характерные, т.е. номинальные режимы работы для которых проектируются и изготавливаются электродвигатели.

Номинальные режимы работы имеют обозначения S1 – S8.

Режимы S1 – S3 являются в настоящее время основными. Номинальные данные двигателей в этих режимах включаются в паспорт двигателя и каталоги.

Режимы S4 – S8 – дополнительные. Они уточняют основные и помогают упростить нагрузочные диаграммы произвольных режимов.

Режим S1 – длительный (продолжительный) номинальный режим работы. Работа двигателя в этом характеризуется нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Работа двигателя в режиме S1 может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой. В таком режиме работают электродвигатели насосов, вентиляторов, эскалаторов, транспортеров и т.д.

Режим S2 – кратковременный номинальный режим работы. Это режим, при котором периоды работы двигателя чередуются с паузами; при этом периоды работы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившегося значения, а периоды остановки настолько длительны, что все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. В таком режиме работают электродвигатели зажимных устройств металлорежущих станков, открытия затворов шлюза, разводных мостов и т.д.

Режим S3 – повторно-кратковременный номинальный режим работы. Это режим, при котором кратковременные периоды с неизменной нагрузкой чередуются с периодами отключения (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя могли достигнуть установившихся значений. В таком режиме работают электродвигатели кранов, лифтов, экскаваторов, подъемно-транспортных механизмов и т.д.

Мощность электродвигателя предварительно рассчитывается исходя из нагрузочной диаграммы механизма и режима работы электропривода.

Для электроприводов, работающих в продолжительном режиме с постоянной нагрузкой, мощность двигателя определяется по формуле

$$P_H = \frac{k \cdot P_C}{\eta_{II}}, \quad (4.1)$$

где  $k$  - коэффициент запаса мощности, обычно  $k=1,08 \div 1,36$ ;

$P_C$  - статическая мощность механизма, Вт;

$\eta_{II}$  - КПД передачи,  $\eta_{II} = 0,93 \div 0,98$ .

Мощность двигателя, работающего в продолжительном режиме с переменной нагрузкой можно рассчитать по эквивалентному статическому моменту

$$P_H = k \cdot M_{CЭ} \cdot \omega_H, \quad (4.2)$$

$$M_{CЭ} = \sqrt{\frac{1}{t_{Ц}} \cdot \sum_{i=1}^n M_{Ci}^2 \cdot t_i}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_H$  - номинальная угловая скорость двигателя, рад/с;

$M_{Ci}$  - статический момент на  $i$ -м интервале нагрузочной диаграммы механизма, Н·м;

$t_i$  - продолжительность  $i$ -го интервала, с;

$t_{Ц}$  - время цикла, с;

$n$  - число интервалов в цикле.

Время цикла определяется по формуле

$$t_{Ц} = t_p + t_0, \quad (4.4)$$

где  $t_p$  - продолжительность работы двигателя за время цикла, с

$t_0$  - время паузы, с.

При повторно-кратковременном режиме работы эквивалентный статический момент рассчитывается за рабочее время, то есть без учета пауз, когда двигатель отключается от источника питания

$$M_{CЭ}(ПВ) = \sqrt{\frac{1}{t_p} \cdot \sum_{i=1}^n M_{Ci}^2 \cdot t_i}, \quad (4.5)$$

где  $n$  - число рабочих интервалов в цикле;

$t_i$  - продолжительность  $i$ -го рабочего интервала, с.

Продолжительность включения ПВ [%] двигателя определяется

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{Ц}} \cdot 100\%. \quad (4.6)$$

В этом режиме время цикла не должно превышать 10 минут. Если время цикла превышает 10 минут, то режим работы относится к продолжительному с переменной нагрузкой.

Рассчитанный эквивалентный статический момент ПВ следует привести к эквивалентному статическому моменту при стандартном  $ПВ_{СТ} = 15, 25, 40, 60\%$

$$M_{CЭ}(ПВ_{СТ}) = M_{CЭ}(ПВ) \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{СТ}}}. \quad (4.7)$$

При кратковременном режиме работы двигателей, отвечающих режиму S2, необходимо чтобы действительное время кратковременной работы  $t_p$  было

равно одному из стандартных значений времени  $t_{p.cm} = 10, 30, 60, 90$  мин, для которого выполнен двигатель. Тогда двигатель выбирается из условия

$$M_{CЭ.СТ} = \sqrt{\frac{1}{t_{p.cm}} \cdot M_C^2 \cdot t_P}. \quad (4.8)$$

Если  $t_p \neq t_{p.cm}$ , то предварительно выбирается двигатель, имеющий по каталогу значения  $t_{p.cm}$  и  $P_H$ , ближайšie к заданным значениям  $t_p$  и  $M_{CЭ.СТ}$ .

## 4 Порядок выполнения работы

4.1 Собрать схему подключения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) и инвертора (И) к сети переменного тока (рисунок 4.1)

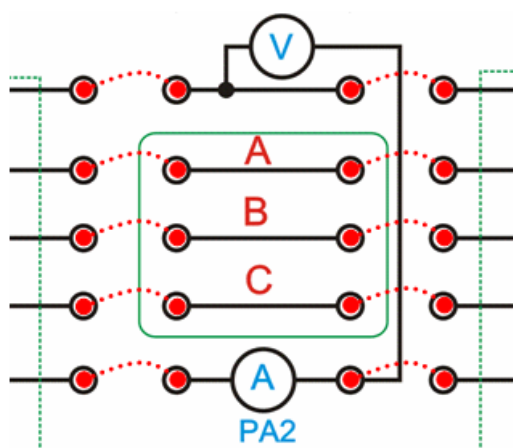


Рисунок 4.1 – Схема подключения ШИП и И к трехфазному источнику с организацией общей сети постоянного тока

4.2 Собрать схему подключения задания для ШИП (рисунок 4.2)

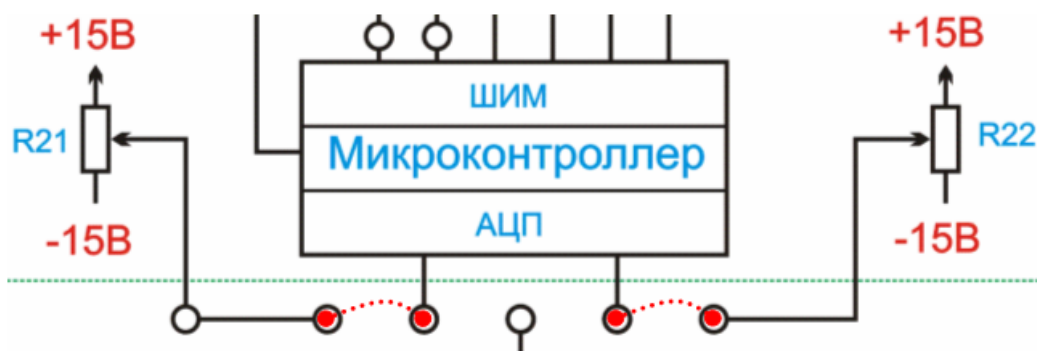


Рисунок 4.2 – Схема подключения задания для ШИП

4.3 Собрать схему подключения напряжения задания для И (рисунок 4.3)



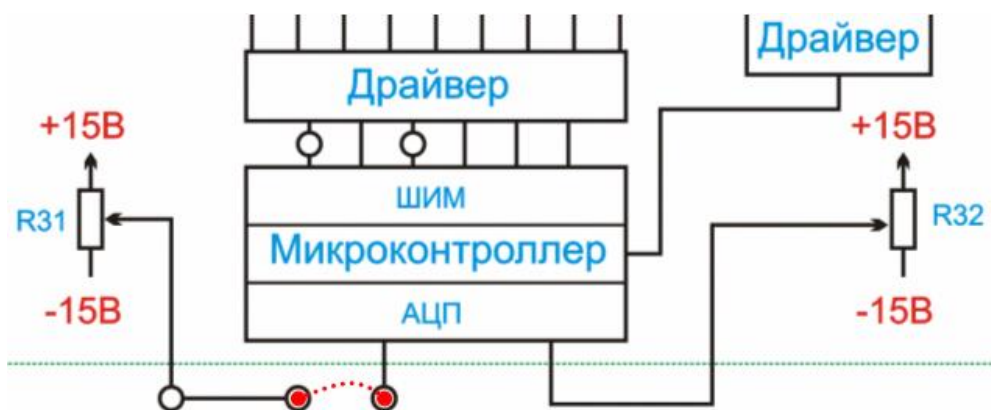


Рисунок 4.3 – Схема подключения задания для И

4.4 Собрать схему подключения якоря (Я) и обмотки возбуждения (ОВ) ДПТ НВ к ШИП для экспериментального исследования естественной характеристики (рисунок 4.4).

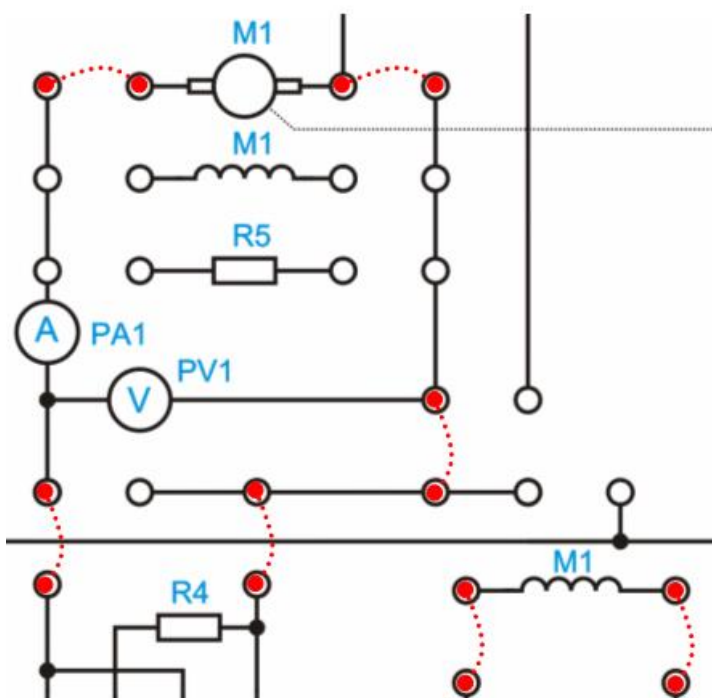


Рисунок 4.4 – Схема подключения Я и ОВ ДПТ НВ к ШИП

4.5 Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «выключено», а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

4.6 Включить ШИП возбуждения (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Сквозность (возбуждение), %») и резистором  $R22$  установить номинальный ток возбуждения ДПТ НВ равный 0,18 А по прибору  $PA4$ .

4.7 Подключить релейно-контакторную схему управления (включить тумблер SA70).

4.8 Подключить якорь ДПТ НВ к ШИП якоря (подключение якоря к ШИП осуществляется с помощью контактора K5, напряжение, на катушку которого подается нажатием кнопки управления SB74).

4.9 Задать симметричный режим работы ШИП якоря, для этого установить тумблер в положение «Симметр.» (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.10 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.11 Разогнать исследуемый двигатель (ДПТ НВ) и резистором R21 установить номинальное напряжение на якоре ДПТ НВ по прибору PV1, при этом замерить угловую скорость ДПТ НВ по прибору BR1, рад/с.

4.12 Выключить ШИП якоря (положение резистора R21 не изменять).

4.13 Выбрать режим работы инвертора  $(U-IR)/f = Const$  и резистором R31 задать частоту инвертора равной нулю прибор «Частота, Гц»

4.14 Подключить нагрузочный двигатель АД к инвертору И, для этого предварительно тумблером SA71 задать схему включения обмоток статора АД «треугольник», затем с помощью магнитного пускателя K1 подключить АД к инвертору, нажав кнопку SB70 «Вперед».

4.15 Плавно увеличивая частоту инвертора (прибор «Частота, Гц») с помощью резистора R31 разогнать АД до угловой скорости, соответствующей скорости ДПТ НВ по п. 4.11., контроль угловой скорости проводить по прибору BR1, рад/с.

4.16 Включить ШИП якоря (тумблер в нижней части панели стенда, в окошке «Скважность (якорь), %»).

4.17 Приступить к исследованию нагрузочных диаграмм электропривода. Для этого, выполнив все действия согласно пунктам 4.1. – 4.18, приступают к снятию данных согласно таблице 4.1. Частоту на выходе инвертора ступенчато задают в пределах от 0 до номинальной.

Примечание:

1) При проведении исследований, уменьшая частоту инвертора, необходимо поддерживать ток возбуждения ДПТ НВ, равный номинальному значению (прибор PA4 с помощью резистора R22), так как в процессе работы ДПТ НВ происходит его нагрев и увеличение сопротивления обмотки возбуждения, что приводит при заданном напряжении на обмотке к уменьшению магнитного потока.

2) При проведении исследований, уменьшая частоту инвертора, необходимо также поддерживать постоянным и напряжение на якоре ДПТ НВ (прибор PV1), моделируя тем самым сеть постоянного тока бесконечной мощности. В действительности, при увеличении нагрузки на валу ДПТ НВ, ток якоря возрастает, значит и возрастает ток, протекающий по ШИП, что при конечной мощности ШИП приводит к снижению напряжения на его выходе.

Таблица 4.1 – Результаты опытов по снятию нагрузочных диаграмм

Характеристика	Параметр	Ед. изм	Нагрузка			
			1	2	3	4
1 Режим S1 с постоянной нагрузкой	$\omega$	рад/с				
	I	А				
	t	ч				
	$I^2R_{я}$	Вт				
	P	Вт				
	M	Н · м				
2 Режим S1 с переменной нагрузкой	$\omega$	рад/с				
	I	А				
	t	ч				
	$I^2R_{я}$	Вт				
	P	Вт				
	M	Н · м				
3 Режим S2	$\omega$	рад/с				
	I	А				
	t	мин				
	$I^2R_{я}$	Вт				
	P	Вт				
	M	Н · м				
4 Режим S3	$\omega$	рад/с				
	I	А				
	t	мин				
	$I^2R_{я}$	Вт				
	P	Вт				
	M	Н · м				

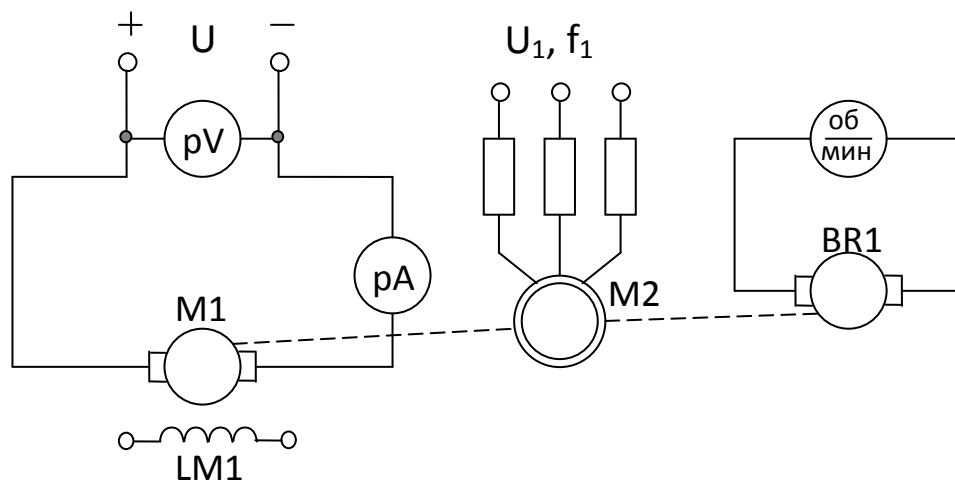


Рисунок 4.5 – Функциональная схема лабораторной установки

### Обработка полученных результатов.

Мощность  $P$  (Вт), потребляемая ДПТ НВ, определяется выражением:

$$P = U \cdot I \pm I^2 \cdot R_{\text{я}},$$

где  $I^2 \cdot R_{\text{я}}$  – потери мощности на сопротивлении якоря, Вт.

Момент ДПТ НВ определяется по формуле:

$$M = \frac{P}{\omega}$$

После выполнения расчетов и заполнения таблицы 4.1 приступают к построению нагрузочных диаграмм электропривода и расчету эквивалентного статического момента для каждого из режимов.

## 5 Содержание отчёта

- 5.1 Название работы.
- 5.2 Цель работы.
- 5.3 Функциональная схема лабораторной установки.
- 5.4 Таблицы с результатами опытов.
- 5.5 Расчеты.
- 5.6 Графические построения.
- 5.7 Выводы по результатам проделанной работы.

## **6 Контрольные вопросы**

6.1 Перечислите названия основных режимов работы электродвигателя в электроприводе.

6.2 Поясните, почему необходимо проводить тщательный подбор двигателя для работы в электроприводе?

6.3 Поясните, что такое нагрузочная диаграмма и скоростная диаграмма исполнительного органа рабочей машины.

6.4 Поясните, как производится расчет мощности двигателя в режимах S1, S2 и S3.

6.5 Поясните, что такое продолжительность включения двигателя. На какие стандартные значения продолжительности включения изготавливаются электродвигатели?

## Литература

- 1 Васин В.М. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1984
- 2 Москаленко В.В. Электрический привод. – М.:Мастерство: Высшая школа, 2000
- 3 Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Издательский центр «Академия», 2006
- 4 Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В. А.Елисеева, А.В.Шинянского.- 3-е изд. перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1983
- 5 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Высшая школа,1981

## Перечень ТНПА

- ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.  
ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. Правила выполнения электронных схем.  
СТО 07-2011 Правила выполнения текстовых документов.  
ГОСТ 2.721-74 ЕСКД Обозначения условные графические в схемах.  
Обозначения общего применения.  
ГОСТ 2.747-68 ЕСКД Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений.

Министерство образования Республики Беларусь

Филиал БНТУ

«Минский государственный политехнический колледж»

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Методические указания для проведения практических работ  
для специальностей

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования»

Разработчик \_\_\_\_\_

Т.В. Бачило

Рецензент \_\_\_\_\_

Э.А. Петрович

Указания рассмотрены и рекомендованы к  
утверждению на:

- заседании цикловой комиссии  
электротехнических дисциплин

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ Е.С. Гутько

- заседании экспертного методического совета

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

2016

# Практическая работа №1

## Расчет сопротивлений пускового реостата, включенного в цепь обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать сопротивление цепи обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

#### 4.1 Краткие теоретические сведения

Ток в якоре двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) в переходных режимах не должен превосходить некоторых допустимых значений, иначе двигатель может выйти из строя. В простейших случаях регулирование (ограничение) тока и, тем самым момента, осуществляется введением в цепь якоря добавочного резистора  $R_d$ . Для того, чтобы сузить пределы изменений тока и момента в переходных процессах резистор  $R_d$  секционируется на соответствующее число ступеней, которые закорачиваются последовательно по мере разбега или торможения двигателя.

Устройство, служащее для введения и выведения сопротивления в цепи якоря в период пуска и разгона электропривода, называется *пусковым реостатом*. Введение и выведение сопротивлений производится ступенчато (секциями). Для регулирования угловой скорости двигателя применяется *регулировочный реостат*.

Для пуска и торможения электродвигателей требуются определенные значения токов (моментов). Их определяют соответствующим расчетом сопротивлений в силовой цепи двигателя. Рассматриваемый ниже метод расчетов справедлив для номинальных значений питающего напряжения и магнитного потока.

Схема включения и пусковые реостатные характеристики ДПТ НВ показаны на рисунке 1. Сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  называются *сопротивлениями секций* пускового реостата. Контакты  $K_1, K_2, K_3$  служат для закорачивания секций пускового реостата.



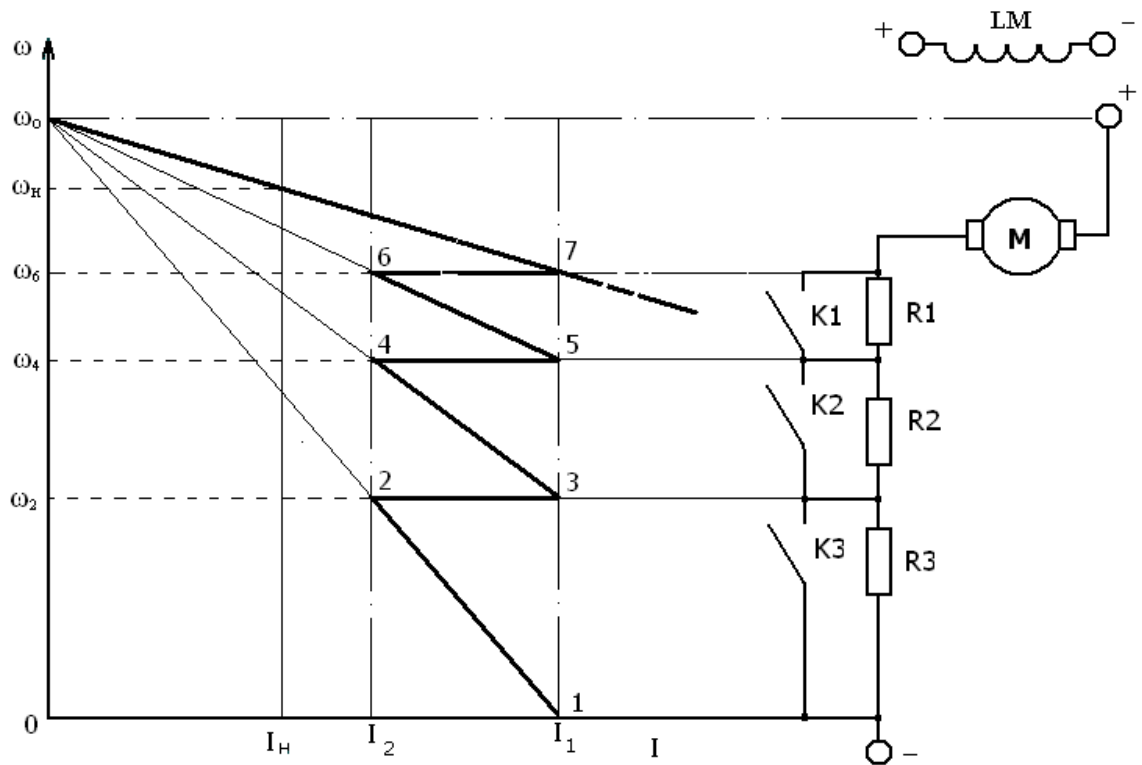


Рисунок 1.1 - Схема включения и пусковые характеристики ДПТ НВ

Наибольшее значение тока  $I_1$  при пуске ограничивается требованием допустимой коммутации тока якоря и для двигателей общего назначения принимается равным

$$I_1 = (2 \div 2,5)I_n, \quad (1.1)$$

где  $I_n$  - номинальный ток двигателя, А.

Номинальный ток двигателя равен

$$I_n = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta_n}, \quad (1.2)$$

где  $P_n$  - номинальная мощность двигателя, Вт;

$U_n$  - номинальное значение напряжения, подводимое к якорю двигателя, В;

$\eta_n$  - номинальный КПД двигателя.

В ряде случаев наибольший пусковой ток на первой реостатной характеристике ограничивается не условиями коммутации, а допустимым пусковым моментом.

Минимальное значение тока переключения  $I_2$  при шунтировании секций пускового реостата определяется по формуле

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda}, \quad (1.3)$$

где  $\lambda$  - кратность пускового тока к току переключения.

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = m \sqrt{\frac{U_n}{I_1 \cdot R_{я}}}, \quad (1.4)$$

где  $m$  - число ступеней пускового реостата;

$R_{я}$  - сопротивление якоря, Ом.

Сопротивление якоря равно

$$R_{я} = 1,25(r_{я} + r_{ДП}) + r_{ЩК}, \quad (1.5)$$

где  $r_{я}$  - сопротивление обмотки якоря, Ом;

$r_{ДП}$  - сопротивление добавочных полюсов, Ом;

$r_{ЩК}$  - сопротивление щётчного контакта, Ом.

Сопротивление щётчного контакта определяется по формуле

$$r_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_H}, \quad (1.6)$$

где  $\Delta U_{Щ}$  - падение напряжения в щётчном контакте, принимают равным 2 В.

Сопротивление n-ой секции пускового реостата  $R_{\rho.n}$ , Ом, равно

$$R_{\rho.n} = R_{я} \cdot \lambda^{n-1} (\lambda - 1), \quad (1.7)$$

$n = 1 \dots m$ ,

где  $m$  – количество секций пускового реостата.

Построение пусковой диаграммы ДПТ независимого возбуждения, выражающей зависимость угловой скорости двигателя от момента, производится в следующем порядке:

а) строится естественная характеристика двигателя по двум точкам:

1)  $\omega = \omega_0$ ,  $I = 0$ ;

2)  $\omega = \omega_H$ ,  $I = I_H$ ;

б) задаются токами  $I_1$  и  $I_2$  в пределах указанных выше значений;

в) строится первая реостатная характеристика (при введении всех ступеней пускового реостата), которая проводится через точку  $\omega = \omega_0$ ,  $I = 0$  и точку 1 ( $\omega = 0$ ,  $I = I_1$ );

г) строятся реостатные характеристики последующих ступеней, для чего из точек 2, 4, 6 проводятся горизонтальные линии до пересечения с вертикалью  $I_1$  в точках 3, 5, 7. Через точки пересечения и точку  $\omega = \omega_0$ ,  $I = 0$  проводятся реостатные характеристики.

Построение считается выполненным, если выход на естественную характеристику происходит в точке 7 при токе  $I_1$ .

В соответствии с характеристикой 1-2, угловая скорость двигателя увеличивается до значения  $\omega_2$  равного

$$\omega_2 = \omega_3 = \omega_0 - \frac{I_2(R_{я} + R_{\rho.1} + R_{\rho.2} + R_{\rho.3})}{c}, \quad (1.8)$$

где  $\omega_0$  - скорость идеального холостого хода двигателя, рад/с;

$R_{я}$  - сопротивление обмотки якоря, Ом.

Скорость идеального холостого хода двигателя равна

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c}, \quad (1.9)$$

где  $c$  – конструктивная постоянная двигателя, В·с.

Конструктивная постоянная двигателя  $c$  находится по формуле

$$c = \frac{U_H - I_H \cdot R_{Я}}{\omega_H}, \quad (1.10)$$

где  $\omega_H$  – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Формула перехода от частоты вращения двигателя  $n$ , об/мин, к угловой скорости двигателя  $\omega$ , рад/с, имеет вид

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (1.11)$$

При этой скорости шунтируется первая ступень реостата (замыкается контакт К1). Угловая скорость двигателя из-за инерции механической системы электропривода не может измениться мгновенно, а момент быстро растет, поэтому переход на новую характеристику практически осуществляется по линии, параллельной оси абсцисс.

Далее двигатель будет разгоняться по прямой 3-4 до точки 4, и когда замкнется контакт К2, произойдет переход на следующую характеристику при скорости  $\omega_4$  двигателя равной

$$\omega_4 = \omega_5 = \omega_0 - \frac{I_2(R_{Я} + R_1 + R_2)}{c} \quad (1.12)$$

После замыкания К3 (при скорости  $\omega_6$ ) наступит последний этап пуска двигателя, т.е. переход на естественную характеристику.

$$\omega_6 = \omega_7 = \omega_0 - \frac{I_2 \cdot (R_{Я} + R_1)}{c} \quad (1.13)$$

Если при пуске статический момент на валу двигателя равен номинальному, то двигатель по окончании пуска будет работать на естественной характеристике с угловой скоростью  $\omega_H$ .

Сопротивление добавочного резистора при динамическом торможении

$$R_{Д} \approx \frac{U_H}{I_1} - R_{Я} \quad (1.14)$$

Сопротивление добавочного резистора при реверсе или торможении противовключением

$$R_{Д} \approx \frac{2 \cdot U_H}{I_1} - R_{Я} \quad (1.15)$$

## 4.2 Условия задач

*Задача 1* Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения рассчитать  $m$ -ступенчатый пусковой реостат. Данные двигателя взять из таблицы 1.1.

*Задача 2* Рассчитать сопротивление тормозного резистора в случае динамического торможения.

*Задача 3* Рассчитать сопротивление тормозного резистора в случае торможения противовключением.

## 5 Содержание отчета

- 5.1 Название практической работы
- 5.2 Цель практической работы
- 5.3 Краткие теоретические сведения
- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1 Опишите основную схему включения ДПТ НВ.
- 6.2 Приведите математическое выражение электромеханической характеристики ДПТ НВ.
- 6.3 Приведите математическое выражение механической характеристики ДПТ НВ.
- 6.4 Назовите виды электромеханических (механических) характеристик.
- 6.5 Поясните устройство и назначение пускового реостата.
- 6.6 Поясните устройство и назначение регулировочного реостата.
- 6.7 Что показывает пусковая диаграмма двигателя?
- 6.8 Расскажите порядок построения пусковой диаграммы двигателя.
- 6.9 Приведите виды торможения ДПТ НВ.

Таблица 1.1- Данные ДПТ НВ

№ вар.	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$n_n$ , об/мин	$r_{я}$ , Ом	$r_{д.п.}$ , Ом	$\eta_n$	$m$
1	1,3	110	800	0,472	0,308	0,655	2
2	2,2	220	1000	0,88	0,64	0,755	3
3	3,2	110	1120	0,11	0,078	0,805	4
4	4,5	220	2240	0,271	0,204	0,765	2
5	5,2	110	800	0,065	0,044	0,805	3
6	6,7	220	3000	0,12	0,089	0,86	4
7	7,5	110	1000	0,042	0,03	0,89	2
8	9,0	220	1060	0,143	0,073	0,86	3
9	9,5	110	3000	0,02	0,018	0,86	4
10	10,0	220	1500	0,121	0,071	0,865	2
11	11,0	440	1000	0,5	0,264	0,87	3
12	12,0	440	3000	0,171	0,131	0,895	4
13	14,0	220	1500	0,071	0,041	0,88	2
14	14,0	440	2120	0,232	0,154	0,89	3
15	17,0	220	1500	0,055	0,037	0,90	4

## Практическая работа № 2

### Расчет параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости вращения

**1 Цель работы:** рассчитать параметры электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных способах регулирования скорости.

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

#### 4.1 Краткие теоретические сведения

Математическое выражение электромеханической характеристики ДПТ НВ имеет вид

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{I \cdot R}{k \cdot \Phi}, \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость двигателя, рад/с;

$U$  – подводимое к якорю напряжение, В;

$I$  – ток в цепи обмотки якоря, А;

$R$  – сопротивление якорной цепи, Ом;

$k$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$\Phi$  – магнитный поток двигателя, Вб.

Математическое выражение механической характеристики ДПТ НВ имеет вид

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R}{(k \cdot \Phi)^2}, \quad (2.2)$$

где  $M$  – момент двигателя, Н·м.

Сопротивление цепи якоря определяется по формуле

$$R = R_{я} + R_{д}, \quad (2.3)$$

где  $R_{я}$  – сопротивление якоря, Ом;

$R_{д}$  – добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом.

Сопротивление якоря  $R_{я}$  определяется по формуле (1.5)

При магнитном потоке  $\Phi = \Phi_H$  коэффициент  $k\Phi_H$  равен

$$k \cdot \Phi_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\text{я}}}{\omega_H} \quad (2.4)$$

Индекс «н» означает номинальные параметры двигателя.

Перехода от частоты вращения двигателя  $n$ , об/мин, к угловой скорости двигателя  $\omega$ , рад/с, осуществляется по формуле (1.11)

Номинальный момент двигателя  $M_H$ , Н·м, определяется по формуле

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (2.5)$$

где  $\omega_H$  – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Сопротивление добавочного резистора  $R_{\text{д}}$ , Ом, в цепи якоря ДПТ НВ можно найти по формуле

$$R_{\text{д}} = R_{\text{я}} \left( \frac{\Delta \omega_H}{\Delta \omega_e} - 1 \right), \quad (2.6)$$

где  $\Delta \omega_H$  – изменение угловой скорости двигателя относительно скорости идеального холостого хода на искусственной механической характеристике, рад/с;

$$\Delta \omega_H = \omega_0 - \omega_H, \quad (2.7)$$

где  $\Delta \omega_e$  – изменение угловой скорости двигателя относительно идеального холостого хода на естественной механической характеристике, рад/с;

$$\Delta \omega_e = \frac{M_H \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi_H)^2} \quad (2.8)$$

Математическое выражение электромеханической характеристики ДПТ НВ, питаемого от тиристорного преобразователя имеет вид

$$\omega = \frac{E_{\text{п}}}{k \cdot \Phi} - \frac{I(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})}{k \cdot \Phi}, \quad (2.9)$$

где  $E_{\text{п}}$  – среднее значение ЭДС преобразователя, В;

$R_{\text{п}}$  – внутреннее сопротивление преобразователя, Ом.

Математическое выражение механической характеристики ДПТ НВ, питаемого от тиристорного преобразователя имеет вид

$$\omega = \frac{E_{\text{п}}}{k \cdot \Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})}{(k \cdot \Phi)^2} \quad (2.10)$$

Среднее значение ЭДС преобразователя равно

$$E_{\text{п}} = E_{\text{ср.о}} \cdot \cos \alpha, \quad (2.11).$$

где  $E_{\text{ср.о}}$  – среднее значение ЭДС преобразователя при  $\alpha=0$ , В;

$\alpha$  – угол открывания тиристорov, эл.град.

## 4.2 Условия задач

*Задача 1* Определить сопротивление резистора, включенного в цепь якоря ДПТ НВ, для снижения угловой скорости двигателя до  $\omega$  рад/с при моменте нагрузки  $M_c$  на валу двигателя (таблица 2.1).

*Задача 2* Для ДПТ НВ, работающего с номинальным моментом нагрузки на естественной характеристике, определить напряжение, подводимое к якорю двигателя, при котором его скорость уменьшится в  $n$  раз.

*Задача 3* Определить угловую скорость ДПТ НВ, работающего с магнитным потоком  $\Phi$  и активным моментом нагрузки  $M_c$  на валу двигателя

*Задача 4* Для ДПТ НВ определить сопротивление добавочного резистора в цепи якоря, включение которого обеспечит прохождение искусственной характеристики через точку с координатами  $\omega_n$  и  $M_n$  (таблица 2.1).

*Задача 5* Для ДПТ НВ рассчитать и построить механическую характеристику двигателя при питании его от тиристорного преобразователя с внутренним сопротивлением  $R_n$  при  $E_n = U_n$ . Определить значение  $E_n$  при котором механическая характеристика двигателя пройдет через точку с координатами  $\omega_n$  и  $M_c$  и построить эту характеристику. Определить для рассчитанной  $E_n$  угол управления тиристорами  $\alpha$  приняв  $E_{cr,0}$  из таблицы 2.1.

## **5 Содержание отчета**

- 5.1 Название практической работы
- 5.2 Цель практической работы
- 5.3 Краткие теоретические сведения
- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## **6 Контрольные вопросы**

- 6.1 Опишите основную схему включения ДПТ НВ.
- 6.2 Охарактеризуйте основные способы регулирования скорости ДПТ НВ.
- 6.3 Что такое жесткость характеристики?
- 6.4 Назовите способы регулирования скорости ДПТ НВ.
- 6.5 Какой из основных способов регулирования скорости ДПТ НВ наиболее энергоемкий?
- 6.6 Что представляет собой система «тиристорный преобразователь – ДПТ»?

Таблица 2.1 – Исходные данные для решения задач

№ вар.	P <sub>н</sub> , кВт	U <sub>н</sub> , В	n <sub>н</sub> , об/мин	r <sub>я</sub> , Ом	r <sub>д.п.</sub> , Ом	η <sub>н</sub>	Задача 1		Задача 2	Задача 3		Задача 4		Задача 5			
							ω, рад/с	M <sub>с</sub> , Н·м	n	Φ, Вб	M <sub>с</sub> , Н·м	ω <sub>н</sub> , рад/с	M <sub>н</sub> , Н·м	R <sub>п</sub> , Ом	ω <sub>и</sub> , рад/с	M <sub>с</sub> , Н·м	E <sub>ср.о.</sub> , В
1	1,8	110	1000	0,346	0,224	0,7	100	0,7·M <sub>н</sub>	2	0,9·Φ <sub>н</sub>	0,8·M <sub>н</sub>	70	10	0,1	70	10	198
2	2,8	220	1500	0,601	0,454	0,765	90	0,9·M <sub>н</sub>	1,5	0,7·Φ <sub>н</sub>	0,9·M <sub>н</sub>	100	15	0,1	100	15	342
3	3,4	110	1500	0,12	0,089	0,79	80	0,8·M <sub>н</sub>	1,7	0,8·Φ <sub>н</sub>	0,8·M <sub>н</sub>	90	20	0,12	90	20	198
4	4,0	220	1000	0,328	0,227	0,82	70	0,6·M <sub>н</sub>	1,3	0,9·Φ <sub>н</sub>	0,7·M <sub>н</sub>	60	28	0,12	60	28	342
5	5,3	110	2200	0,055	0,039	0,835	150	0,5·M <sub>н</sub>	1,8	0,7·Φ <sub>н</sub>	0,5·M <sub>н</sub>	160	15	0,15	160	15	198
6	6,0	220	1600	0,235	0,151	0,845	120	0,7·M <sub>н</sub>	3	0,8·Φ <sub>н</sub>	0,9·M <sub>н</sub>	90	25	0,1	90	25	342
7	7,5	110	1500	0,044	0,031	0,85	95	0,9·M <sub>н</sub>	2	0,9·Φ <sub>н</sub>	0,7·M <sub>н</sub>	85	40	0,1	85	40	198
8	8,0	220	2240	0,145	0,101	0,865	180	0,8·M <sub>н</sub>	3,5	0,7·Φ <sub>н</sub>	0,9·M <sub>н</sub>	180	30	0,12	180	30	342
9	9,5	110	3000	0,02	0,018	0,86	230	M <sub>н</sub>	2,9	0,8·Φ <sub>н</sub>	0,8·M <sub>н</sub>	250	25	0,12	250	25	198
10	10,0	220	2360	0,069	0,049	0,885	165	0,7·M <sub>н</sub>	4	0,9·Φ <sub>н</sub>	0,6·M <sub>н</sub>	200	35	0,15	200	35	342
11	11,0	220	1000	0,125	0,08	0,865	75	0,8·M <sub>н</sub>	2	0,7·Φ <sub>н</sub>	M <sub>н</sub>	70	75	0,15	70	75	342
12	12,0	220	3000	0,044	0,031	0,89	270	0,6·M <sub>н</sub>	2,5	0,8·Φ <sub>н</sub>	0,9·M <sub>н</sub>	240	30	0,1	240	30	342
13	14,0	220	2120	0,058	0,037	0,89	160	M <sub>н</sub>	3,1	0,9·Φ <sub>н</sub>	0,7·M <sub>н</sub>	160	50	0,1	160	0	342
14	15,0	220	750	0,146	0,064	0,805	50	1,1·M <sub>н</sub>	3,8	0,7·Φ <sub>н</sub>	1,1·M <sub>н</sub>	50	150	0,1	50	150	342
15	17,0	220	3000	0,038	0,025	0,89	250	0,9·M <sub>н</sub>	2,3	0,8·Φ <sub>н</sub>	M <sub>н</sub>	230	45	0,1	230	45	342



## Практическая работа № 3

### Расчет сопротивлений добавочных резисторов в цепях асинхронного электродвигателя

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать сопротивления резисторов, включенных в статорные и роторные цепи конкретных асинхронных двигателей.

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

#### 4.1 Расчет резисторов в цепи статора

Рассмотрим наиболее распространенную задачу, когда включение добавочного резистора во все три фазы статора должно обеспечить заданную кратность  $\mu$  пускового момента

$$\mu = M_{п.и} / M_{п.е},$$

где  $M_{п.и}$ ,  $M_{п.е}$  – пусковые моменты асинхронного двигателя (АД) при включении добавочного резистора и без него.

Введем понятие полного комплексного сопротивления короткого замыкания  $Z_k$ , Ом, соответствующего моменту пуска АД

$$Z_k = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3} \cdot I_{п}}, \quad (3.1)$$

где  $U_{1н}$  – номинальное напряжение АД, В;  
 $I_{п}$  – пусковой ток АД, А.

Введем также понятие активного  $r_k$ , Ом, и реактивного  $x_k$ , Ом, сопротивлений короткого замыкания, определяемых по формулам

$$r_k = Z_k \cdot \cos \varphi_{п}, \quad (3.2)$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}, \quad (3.3)$$

где  $\cos \varphi_{п}$  – коэффициент мощности АД в момент его пуска.

Тогда для получения заданной кратности момента требуемое сопротивление добавочного резистора  $R_{10}$ , Ом, определяется по формуле

$$R_{10} = \sqrt{(Z_k / \mu)^2 - x_k^2} - r_k \quad (3.4)$$

## 4.2 Расчет резисторов в цепи ротора

Типовой задачей для ЭП с АД с фазным ротором является расчет резисторов в цепи ротора, обеспечивающих заданную пусковую диаграмму двигателя.

Пусковая диаграмма АД обычно строится по аналогии с ДПТ НВ в предположении, что рабочий участок механических характеристик АД близок к линейному. При построении пусковой диаграммы АД пусковой момент  $M_1$ , Н·м, обычно принимается равным

$$M_1 = (0,8 \dots 0,9) M_k, \quad (3.5)$$

где  $M_k$  – критический момент АД, Н·м.

Кратность пускового момента к моменту переключения

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \sqrt[m]{\frac{M_H}{M_1 \cdot S_H}}, \quad (3.6)$$

где  $M_H$  – номинальный момент АД, Н·м;

$m$  – число ступеней пускового реостата;

$S_H$  – номинальное скольжение АД.

Сопротивление  $n$ -ой секции  $R_{2\partial.n}$ , Ом, пускового реостата равно

$$R_{2\partial.n} = R_2 \cdot \lambda^{n-1} (\lambda - 1), \quad (3.7)$$

$n = 1 \dots m$ ,

где  $R_2$  – активное сопротивление фазы ротора, Ом.

Активное сопротивление фазы ротора определяется по формуле

$$R_2 = \frac{U_{2H} \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}, \quad (3.8)$$

где  $U_{2H}$  – номинальное линейное напряжение на кольцах ротора при неподвижном роторе, В;

$I_{2H}$  – номинальный ток фазы ротора, А.

Если задана некоторая точка искусственной характеристики с координатами  $M_{и}$ ,  $S_{и}$ , то искомое добавочное сопротивление в фазе обмотки ротора можно найти по формуле

$$R_{2д} = R_2 \left( \frac{S_{и}}{S_e} - 1 \right), \quad (3.9)$$

где  $S_e$  – скольжение АД на естественной характеристике, соответствующее моменту  $M_{и}$ .

## 4.3 Условия задач

*Задача 1* Для АД с фазным ротором рассчитать  $m$ -ступенчатый пусковой реостат. Данные двигателя взять из таблицы 3.1.

*Задача 2* Рассчитать сопротивление резистора включенного в цепь ротора АД, чтобы начальный пусковой момент равнялся максимальному моменту двигателя.

*Задача 3* Рассчитать сопротивление резистора включенного в цепь ротора АД, чтобы при номинальном вращающем моменте угловая скорость равнялась  $\omega_{и}$ .

*Задача 4* Для заданного типа двигателя (таблица 3.1) рассчитать сопротивление резистора, включение которого в цепь статора АД с короткозамкнутым ротором обеспечивает снижение пускового момента на  $N\%$ .

## **5 Содержание отчета**

- 5.1 Название практической работы
- 5.2 Цель практической работы
- 5.3 Краткие теоретические сведения
- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## **6 Контрольные вопросы**

6.1 Приведите математическое выражение механической характеристики АД.

6.2 Нарисуйте семейство механических характеристик АД при включении добавочных резисторов в цепь статора.

6.3 Нарисуйте семейство механических характеристик АД при включении добавочных резисторов в цепь ротора.

6.4 Дайте сравнительную характеристику способам регулирования скорости при включении добавочных резисторов в цепи статора и ротора.

Таблица 3.1 - Исходные данные для решения задач

№ вар.	P <sub>н</sub> , кВт	2p	n <sub>н</sub> , об/мин	U <sub>2н</sub> , В	I <sub>2н</sub> , А	M <sub>к</sub> , Н·м	Задача 1	Задача 3	Задача 4		
							m	ω <sub>н</sub> , рад/с	I <sub>п</sub> , А	cosφ <sub>п</sub>	N, %
1	2,2	6	810	144	11	55	2	70	22,7	0,85	5
2	3,7	6	900	190	13,8	85	3	80	37,2	0,8	10
3	5,5	6	915	213	18,3	135	4	85	57	0,77	15
4	7,5	6	935	242	20,7	190	2	90	79	0,72	20
5	11	6	910	179	41	325	3	60	148	0,68	25
6	15	6	930	213	48	460	4	65	203	0,65	5
7	22	8	715	241	59	800	2	55	275	0,6	10
8	30	8	720	252	71	1030	3	70	380	0,55	15
9	37	8	725	302	79	1390	4	68	91,5	0,72	20
10	45	10	576	181	146	1940	2	40	141	0,68	25
11	55	8	720	196	170	2160	3	65	185	0,65	5
12	60	10	580	239	135	2670	4	45	295	0,85	10
13	75	10	582	308	142	3480	2	50	310	0,65	15
14	90	8	730	355	162	3470	3	55	336	0,55	20
15	110	10	584	272	250	4560	4	30	460	0,5	25

## Практическая работа № 4

### Расчет параметров асинхронного электродвигателя

**1 Цель работы:** научиться выполнять типовые расчеты для асинхронных двигателей, пользуясь основными соотношениями.

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

Синхронная угловая скорость АД определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{P}, \quad (4.1)$$

где  $f_1$  - частота напряжения питающей сети, Гц;

$P$  - число пар полюсов.

Механическая характеристика АД описывается следующими уравнениями

$$M = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot a \cdot S_K}, \quad (4.2)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S), \quad (4.3)$$

где  $M_K$  - критический момент АД, Н·м;

$a$  - параметр;

$S_K$  - критическое скольжение АД;

$S$  - скольжение АД.

Параметр  $a$  равен

$$a = \frac{R_1}{R_2'}, \quad (4.4)$$

где  $R_1$  - активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

$R_2'$  - активное сопротивление фазы обмотки ротора приведенное к обмотке статора, Ом.

Критический момент АД определяется по формуле

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2})}, \quad (4.5)$$

где  $U_{1\phi}$  - значение фазного напряжения питающей сети, В;

$X_K$  - реактивное сопротивление короткого замыкания, Ом.

Критическое скольжение АД равно

$$S_K = S_H \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}), \quad (4.6)$$

где  $S_H$  - номинальное скольжение АД;

$\lambda_m$  - перегрузочная способность АД.

Номинальное скольжение определяется по формуле

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_H}{n_0}, \quad (4.7)$$

где  $\omega_H$  - номинальная скорость вращения АД, рад/с;

$n_0$  - синхронная частота вращения АД, об/мин;

$n_H$  - номинальная частота вращения АД, об/мин

Перехода от частоты вращения двигателя  $n$ , об/мин, к угловой скорости двигателя  $\omega$ , рад/с, осуществляется по формуле (1.11)

Перегрузочная способность АД равна

$$\lambda_m = \frac{M_K}{M_H}, \quad (4.8)$$

где  $M_H$  - номинальный момент АД, Н·м.

Номинальный момент АД определяется по формуле (2.5)

## 4.2 Условия задач

*Задача 1* По паспортным данным асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором определить его максимальный момент при напряжении питающей сети  $U_1$ . Данные двигателя взять из таблицы 4.1.

*Задача 2* Определить перегрузочную способность и критическое скольжение заданного двигателя при напряжении сети равном  $U_1$  (таблица 4.1).

*Задача 3* Для заданного двигателя определить напряжение сети, при котором максимальный момент двигателя будет равен номинальному моменту.

## 5 Содержание отчета

- 5.1 Название практической работы
- 5.2 Цель практической работы
- 5.3 Краткие теоретические сведения
- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## 6 Контрольные вопросы

- АД.
- 6.1 Напишите математическое выражение механической характеристики АД.
- 6.2 Что называется критическим моментом АД?
- 6.3 Что называется перегрузочной способностью двигателя?
- 6.4 Как связаны между собой критический момент АД и величина напряжения питающей сети?
- 6.5 Какие возможности по управлению АД имеет способ, связанный с регулированием напряжения на его статоре?

Таблица 4.1 – Исходные данные для решения задач

№ вар.	$P_n$ , кВт	$n_0$ , об/мин	$S_n$ , %	$M_k/M_n$	Задача 1	Задача 2
					$U_1$ , В	$U_1$ , В
1	1,1	3000	6,3	2,2	$0,95 \cdot U_{1н}$	$0,75 \cdot U_{1н}$
2	1,5	1500	6,7	2,2	$0,9 \cdot U_{1н}$	$0,8 \cdot U_{1н}$
3	2,2	1000	5,1	2,2	$0,85 \cdot U_{1н}$	$0,95 \cdot U_{1н}$
4	3,0	3000	5,4	2,2	$0,8 \cdot U_{1н}$	$0,9 \cdot U_{1н}$
5	4,0	1500	5,3	2,2	$0,75 \cdot U_{1н}$	$0,85 \cdot U_{1н}$
6	5,5	1000	4,1	2,2	$0,95 \cdot U_{1н}$	$0,75 \cdot U_{1н}$
7	7,5	3000	2,6	2,2	$0,9 \cdot U_{1н}$	$0,8 \cdot U_{1н}$
8	11	1500	2,8	2,2	$0,85 \cdot U_{1н}$	$0,95 \cdot U_{1н}$
9	15	1000	3,0	2,0	$0,8 \cdot U_{1н}$	$0,9 \cdot U_{1н}$
10	18,5	3000	2,3	2,2	$0,75 \cdot U_{1н}$	$0,85 \cdot U_{1н}$
11	22	1500	2,2	2,2	$0,95 \cdot U_{1н}$	$0,75 \cdot U_{1н}$
12	30	1000	2,3	2,0	$0,9 \cdot U_{1н}$	$0,8 \cdot U_{1н}$
13	37	3000	1,9	2,2	$0,85 \cdot U_{1н}$	$0,95 \cdot U_{1н}$
14	45	1500	1,8	2,2	$0,8 \cdot U_{1н}$	$0,9 \cdot U_{1н}$
15	75	1000	2,0	1,9	$0,75 \cdot U_{1н}$	$0,85 \cdot U_{1н}$

# Практическая работа № 5

## Расчет энергетических показателей электропривода

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать постоянные, переменные и полные потери мощности и энергии в электродвигателе, а также коэффициент полезного действия и коэффициент мощности электропривода.

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

В общем случае потери мощности и энергии в электроприводе (ЭП) складываются из потерь в электродвигателе (ЭД), механической передаче, в силовом преобразователе и системе управления.

Потери мощности в ЭД составляют основную долю потерь в ЭП и представляются суммой постоянных  $C$ , Вт, и переменных  $V$ , Вт, потерь, т.е.

$$\Delta P = C + V \quad (5.1)$$

Под постоянными потерями подразумеваются потери мощности, не зависящие от токов двигателя (нагрузки). К ним относятся потери в стали магнитопровода, потери в обмотках возбуждения, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Под переменными потерями подразумеваются потери, выделяемые в обмотках двигателя при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой ЭП.

Для двигателей постоянного тока (ДПТ) переменные потери мощности равны

$$V = I^2 R, \quad (5.2)$$

где  $I$  и  $R$  – соответственно ток, А, и сопротивление, Ом, цепи якоря двигателя.

В трехфазных асинхронных двигателях (АД)

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2', \quad (5.3)$$

где  $V_1, V_2$  – переменные потери мощности, Вт, соответственно в цепях статора и

ротора;

$I_1$  и  $I_2'$  – соответственно ток статора, А, и приведенный ток ротора, А;

$R_1$  и  $R_2'$  – активные фазные сопротивления, Ом, соответственно обмотки статора и приведенные обмотки ротора.



При использовании П-образной схемы замещения АД, когда по резистору  $R_1$  протекает ток  $I_2'$ , потери в статоре равны

$$V_1 = 3I_1^2 R_1 = 3I_2'^2 R_1 \frac{R_1}{R_2} = V_2 \frac{R_1}{R_2}, \quad (5.4)$$

тогда полные переменные потери определяются по формуле

$$V = 3I_1^2 (R_1 + R_2') = V_2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (5.5)$$

В синхронных двигателях переменные потери равны

$$V = 3I_1^2 R_1$$

Переменные потери мощности, выделяющиеся в якоре ДПТ и роторе АД, могут быть рассчитаны и по механическим переменным и параметрам двигателей

$$V = M\omega_0\delta \quad (5.6)$$

$$V_2 = M\omega_0 S \quad (5.7)$$

где  $M$  – момент двигателя, Н·м;

$\omega_0$  – скорость идеального холостого хода, рад/с;

$\delta$  и  $S$  – соответственно относительная скорость ДПТ и скольжение АД.

Относительная скорость ДПТ и скольжение АД можно определить по формуле

$$\delta = S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (5.8)$$

Переменные потери в статоре АД равны

$$V_1 = M\omega_0 S \frac{R_1}{R_2} \quad (5.9)$$

Полные потери АД определяются по выражению

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (5.10)$$

Полные потери мощности при работе двигателя в номинальном режиме определяются по его паспортным данным с помощью номинального КПД  $\eta_n$  и номинальной мощности  $P_n$

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1 - \eta_n)}{\eta_n} \quad (5.11)$$

Тогда постоянные потери мощности определим по формуле

$$C = \Delta P_n - V_n \quad (5.12)$$

За время работы  $t_p$ , с, двигателя с постоянной нагрузкой, полные потери энергии обусловленные  $\Delta P$  определяются по формуле

$$\Delta A = \Delta P \cdot t_p \quad (5.13)$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой, полные потери энергии за весь цикл равны

$$\Delta A = \int_0^{t_u} \Delta P(t) \cdot dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i \quad (5.14)$$

где  $\Delta P_i, t_i$  - соответственно полные потери мощности, Вт, и время работы, с,

на  $i$ -том участке цикла;

$n$  – число отдельных участков цикла;

$t_{ц} = \sum_{i=1}^n t_i$  - время цикла.

Когда ЭП работает в некотором цикле с различными скоростями  $\omega_{ci}$  или нагрузками  $M_{ci}$  как в установившемся, так и в переходном режимах цикловой (средневзвешенный) КПД электропривода равен

$$\eta_{ц} = \frac{A_{пол}}{A_{потр}} = \frac{A_{пол}}{A_{пол} + \Delta A} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{пол i} t_i}{\sum_{i=1}^n P_{пол i} t_i + \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} \omega_{ci} t_i}{\sum_{i=1}^n M_{ci} \omega_{ci} t_i + C \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n V_i t_i} \quad (5.15)$$

где  $A_{пол}$  и  $A_{потр}$  – соответственно полезная механическая и потреблённая электрическая энергия, Дж;

$\Delta A$  – потери энергии, Дж;

$P_{пол i}$  – полезная механическая мощность на  $i$ -том участке цикла, Вт;

$\Delta P_i$  – потери мощности на  $i$ -том участке цикла, Вт;

$n$  – число участков цикла работы ЭП.

Работа ЭП, как и любого другого потребителя активной  $P_a$  и реактивной  $Q$  энергии, характеризуется коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}} \quad (5.16)$$

Если ЭП работает в каком-то цикле с различными скоростями или нагрузками в установившемся и в переходном режимах, то он как потребитель реактивной энергии характеризуется средневзвешенным или цикловым коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии  $A_a$ , Дж, за цикл к полной энергии  $A_{п}$ , Дж, в соответствии с формулой

$$\cos \varphi_{ц} = \frac{A_a}{A_{п}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{P_{ai}^2 + Q_i^2} \cdot t_i} \quad (5.17)$$

Активная  $P_a$ , Вт, и реактивная  $Q$ , вар, мощности применительно к установившемуся режиму работы трехфазного АД могут быть рассчитаны по следующим формулам

$$P_a = P_{мех} + \Delta P = M\omega + C + V_1 + V_2 \quad (5.18)$$

$$Q = 3I_{\mu}^2 x_{\mu} + 3I_1^2 x_1 + 3I_2^2 x_2' \quad (5.19)$$

где  $I_{\mu}$  - ток намагничивания, А;

$x_1, x_2'$  – индуктивные сопротивления от потоков рассеяния соответственно фазы обмотки статора и приведенное фазы обмотки ротора, Ом;

$x_{\mu}$  - индуктивное сопротивления контура намагничивания, Ом.

Для П-образной схемы замещения АД при  $R_{\mu} \approx 0$  и  $I_{\mu} = U_{1\phi} / x_{\mu}$  формулу (5.18) можно записать в следующем виде

$$Q = 3U_{1\phi} I_{\mu} + 3I_2^2 x_k = 3U_{1\phi} I_{\mu} + \frac{M\omega_0 S x_k}{R_2'} \quad (5.20)$$

где  $U_{\phi}$  – действующее значение фазного напряжения сети, В;

$x_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания равно

$$x_k = x_1 + x_2' \quad (5.21)$$

Приведенный ток ротора АД можно определить по формуле

$$I_2' = \sqrt{\frac{M \omega_0 S}{3R_2'}} \quad (5.22)$$

Номинальная активная мощность  $P_{1н}$ , Вт, потребляемая из сети равна

$$P_{1н} = 3 U_{1ф} I_{1н} \cos \varphi_n \quad (5.23)$$

Полные номинальные потери мощности определяются

$$\Delta P_n = P_{1н} - P_n \quad (5.24)$$

Скольжение на естественной характеристике, соответствующее моменту нагрузки  $M_c$  можно определить через номинальные скольжение  $S_n$  и момент  $M_n$  согласно выражению

$$S_c = S_n \frac{M_c}{M_n} \quad (5.25)$$

## 4.2 Условия задач

*Задача 1* Для заданного ДПТ (таблица 5.1) определить постоянные потери мощности. Рассчитать переменные потери энергии в якоре двигателя за цикл работы, в котором он в течении времени  $t_1$  работает с моментом нагрузки  $M_{c1}$ , в течении времени  $t_2$  работает с моментом нагрузки  $M_{c2}$  и в течении времени  $t_3$  работает с моментом нагрузки  $M_{c3}$ . Найти КПД двигателя при его работе в заданном цикле. Ток возбуждения двигателя в цикле не изменяется и равен номинальному.

*Задача 2* Для заданного АД (таблица 5.2) рассчитать полные потери мощности и коэффициент мощности при его работе на естественной характеристике с моментом нагрузки  $M_c$ .

## 5 Содержание отчета

- 5.1 Название практической работы
- 5.2 Цель практической работы
- 5.3 Краткие теоретические сведения
- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1 Какие потери в ЭП являются постоянными?
- 6.2 Какие потери в ЭП являются переменными?
- 6.3 Как определить полные потери мощности в ЭП?
- 6.4 Что называется цикловым КПД?
- 6.5 Что называется цикловым коэффициентом мощности?

Таблица 5.1- Данные двигателя постоянного тока независимого возбуждения

№ вар.	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$n_H$ , об/мин	$r_{я}$ , Ом	$r_{д.п.}$ , Ом	$\eta_H$	$M_1$ , Н·м	$t_1$ , мин	$M_2$ , Н·м	$t_2$ , мин	$M_3$ , Н·м	$t_3$ , мин
1	1,3	110	800	0,472	0,308	0,655	$M_H$	3	$0,5 \cdot M_H$	10	$0,9 \cdot M_H$	15
2	2,2	220	1000	0,88	0,64	0,755	$0,9 \cdot M_H$	4	$0,6 \cdot M_H$	11	$M_H$	4
3	3,2	110	1120	0,11	0,078	0,805	$0,8 \cdot M_H$	5	$M_H$	12	$0,7 \cdot M_H$	9
4	4,5	220	2240	0,271	0,204	0,765	$0,7 \cdot M_H$	6	$0,8 \cdot M_H$	13	$M_H$	6
5	5,2	110	800	0,065	0,044	0,805	$0,6 \cdot M_H$	7	$0,9 \cdot M_H$	14	$M_H$	17
6	6,7	220	3000	0,12	0,089	0,086	$0,5 \cdot M_H$	8	$M_H$	15	$0,8 \cdot M_H$	8
7	7,5	110	1000	0,042	0,03	0,89	$M_H$	9	$0,5 \cdot M_H$	16	$M_H$	4
8	9,0	220	1060	0,143	0,073	0,86	$0,9 \cdot M_H$	10	$0,6 \cdot M_H$	2	$M_H$	12
9	9,5	110	3000	0,02	0,018	0,86	$0,8 \cdot M_H$	11	$M_H$	3	$0,6 \cdot M_H$	10
10	10,0	220	1500	0,121	0,071	0,865	$0,7 \cdot M_H$	12	$0,8 \cdot M_H$	4	$M_H$	7
11	11,0	440	1000	0,5	0,264	0,87	$0,6 \cdot M_H$	13	$0,9 \cdot M_H$	5	$M_H$	3
12	12,0	440	3000	0,171	0,131	0,895	$0,5 \cdot M_H$	14	$M_H$	6	$0,8 \cdot M_H$	14
13	14,0	220	1500	0,071	0,041	0,88	$M_H$	15	$0,5 \cdot M_H$	7	$M_H$	2
14	14,0	440	2120	0,232	0,154	0,89	$0,9 \cdot M_H$	16	$0,6 \cdot M_H$	8	$M_H$	5
15	17,0	220	1500	0,055	0,037	0,90	$0,8 \cdot M_H$	17	$M_H$	9	$0,5 \cdot M_H$	13

Таблица 5.2 – Технические данные асинхронных двигателей

№ вар.	2p	P <sub>НОМ</sub> , кВт	n <sub>НОМ</sub> , об/мин	I <sub>НОМ</sub> , А	η <sub>НОМ</sub> , %	cosφ <sub>НОМ</sub>	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	I <sub>μ</sub> , А	X <sub>1</sub> , Ом	X <sub>2</sub> , Ом	M <sub>с</sub> , Н·м
1	6	2,2	810	7,2	64	0,76	2,97	3,334	5,51	3,11	3,95	0,8·M <sub>Н</sub>
2	6	3,7	900	11,2	70	0,79	1,55	1,774	7,7	1,95	3,2	0,9·M <sub>Н</sub>
3	6	5,5	915	14,8	74	0,74	1,07	0,863	8,96	1,3	2,1	0,7·M <sub>Н</sub>
4	6	7,5	935	18,2	77	0,77	0,68	0,666	11,1	0,98	1,44	0,6·M <sub>Н</sub>
5	6	11	910	32	79	0,76	0,35	0,31	23,5	0,59	1,01	0,5·M <sub>Н</sub>
6	8	15	710	42	79	0,71	0,235	0,243	29,8	0,51	0,725	0,7·M <sub>Н</sub>
7	8	22	715	57	80,5	0,7	0,14	0,138	37,3	0,31	0,47	0,9·M <sub>Н</sub>
8	8	30	720	74,6	83	0,72	0,14	0,084	46,7	0,23	0,42	0,8·M <sub>Н</sub>
9	8	37	725	87,4	86	0,74	0,1	0,07	52,3	0,17	0,31	0,6M <sub>Н</sub>
10	10	45	576	103	85	0,76	0,06	0,063	57,8	0,21	0,24	0,7·M <sub>Н</sub>
11	10	60	580	124	85	0,75	0,047	0,044	70,6	0,15	0,19	0,8·M <sub>Н</sub>
12	10	75	582	166	87	0,77	0,031	0,03	89,5	0,11	0,146	0,6·M <sub>Н</sub>
13	10	110	584	266	89	0,7	0,019	0,021	155	0,078	0,134	1,2M <sub>Н</sub>
14	10	132	585	315	89	0,68	0,014	0,017	183	0,064	0,11	1,1·M <sub>Н</sub>
15	10	160	586	392	90,3	0,61	0,012	0,012	247	0,048	0,085	0,9·M <sub>Н</sub>

## Практическая работа № 6

### Расчет мощности электродвигателя при различных режимах работы

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать и выбирать электродвигатели по мощности для различных режимов работы

**2 Оснащение рабочего места:** методические указания по выполнению практической работы.

### 3 Порядок выполнения работы

- 3.1 Выписать данные двигателя
- 3.2 Выполнить решения задач
- 3.3 Составить отчет о проделанной работе
- 3.4 Ответить на контрольные вопросы и подготовиться к защите

### 4 Теоретическая часть

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который будет обеспечивать заданный технологический цикл рабочей машины, иметь конструкцию, соответствующую условиям эксплуатации и компоновки с рабочей машиной, а его нагрев при этом не должен превышать допустимый уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины. Происходящие при этом его повышенный нагрев и ускоренное старение изоляции определяют преждевременный выход самого двигателя из строя, останов рабочей машины и соответствующие экономические потери.

Недопустимым является также использование двигателей завышенной мощности, так как при этом, имея повышенную первоначальную стоимость, ЭП работает с низкими КПД и коэффициентом мощности. Таким образом, обоснованный выбор электродвигателя во многом определяет технико-экономические показатели работы комплекса «ЭП – рабочая машина».

Для разнообразных условий, изменяющих статическую нагрузку двигателей, рассчитывают и строят нагрузочные диаграммы, представляющие собой график изменения во времени мощности или момента. Основными величинами для расчета нагрузочных диаграмм являются статическая мощность  $P_{\text{ст}}$  или момент  $M_{\text{ст}}$  на каждом этапе работы исполнительного органа. Зависимость  $P_{\text{ст}}$  и  $M_{\text{ст}}$  от времени работы  $t$  механизма называется нагрузочной диаграммой механизма.

На основании анализа режимов работы выделены наиболее характерные, т.е. номинальные режимы работы для которых проектируются и изготавливаются электродвигатели.

Номинальные режимы работы имеют обозначения S1...S8.

Режимы S1, S2, S3 являются в настоящее время основными. Номинальные данные двигателей в этих режимах включаются в паспорт и каталоги.

Режимы S4...S8 уточняют основные и помогают упростить нагрузочные диаграммы произвольных режимов.

Продолжительный номинальный режим работы (S1) двигателя характеризуется неизменной нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Работа двигателя в режиме S1 может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой. В таком режиме работают электродвигатели насосов, вентиляторов, эскалаторов, транспортеров.

Кратковременный номинальный режим работы (S2) двигателя – режим, при котором периоды работы двигателя с неизменной нагрузкой чередуются с периодами его отключения (остановки); при этом периоды работы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившегося значения, а периоды остановки настолько длительны, что все его части охлаждаются до температуры окружающей среды. В таком режиме работают электродвигатели зажимных устройств металлорежущих станков, открытия затворов шлюза, разводных мостов.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы (S3) двигателя – режим, при котором кратковременные периоды с неизменной нагрузкой чередуются с периодами отключения (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя могли достигнуть установившихся значений. В таком режиме работают электродвигатели кранов, лифтов, экскаваторов, подъемно-транспортных механизмов.

#### 4.1 Предварительный выбор мощности электродвигателя

Мощность электродвигателя предварительно рассчитывается исходя из нагрузочной диаграммы механизма и режима работы электропривода.

Для электроприводов, работающих в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, мощность двигателя, Вт, принимается равной

$$P_H = \frac{k \cdot P_C}{\eta_{II}}, \quad (5.1)$$

где  $k$  - коэффициент запаса мощности, обычно  $k = 1,08 \div 1,36$ ;

$P_C$  - статическая мощность механизма, Вт;

$\eta_{II}$  - КПД передачи,  $\eta_{II} = 0,93 \div 0,98$ .

Мощность двигателя, Вт, работающего в продолжительном режиме с переменной нагрузкой можно рассчитать по эквивалентному статическому моменту  $M_{\text{э}}$ , Н·м

$$P_H = k \cdot M_{\text{э}} \cdot \omega_H, \quad (5.2)$$

Эквивалентный статический момент равен

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{II}} \cdot \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}, \quad (5.3)$$

где  $\omega_H$  - номинальная угловая скорость двигателя, рад/с;

$M_{.i}$  - статический момент на  $i$ -м интервале нагрузочной диаграммы механизма, Н·м;

$t_i$  - продолжительность  $i$ -го интервала, с;

$t_{Ц}$  - время цикла, с;

$n$  - число интервалов в цикле.

Время цикла определяется по формуле

$$t_{Ц} = t_p + t_0, \quad (5.4)$$

где  $t_p$  - продолжительность работы двигателя за время цикла, с;

$t_0$  - время паузы, с.

При повторно-кратковременном режиме работы эквивалентный статический момент рассчитывается за рабочее время, то есть без учета пауз, когда двигатель отключается от источника питания

$$M_{\text{Э}}(ПВ) = \sqrt{\frac{1}{t_p} \cdot \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}, \quad (5.5)$$

где  $n$  - число рабочих интервалов в цикле;

$t_i$  - продолжительность  $i$ -го рабочего интервала, с.

Продолжительность включения двигателя ПВ, %, равна

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{Ц}} \cdot 100\% \quad (5.6)$$

В этом режиме время цикла не должно превышать 10 минут. Если время цикла превышает 10 минут, то режим работы относится к продолжительному с переменной нагрузкой.

Рассчитанный эквивалентный статический момент при реальной ПВ следует привести к эквивалентному статическому моменту при стандартной  $ПВ_{СТ} = 15, 25, 40, 60\%$

$$M_{\text{Э}}(ПВ_{СТ}) = M_{\text{Э}}(ПВ) \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{СТ}}} \quad (5.7)$$

При кратковременном режиме работы двигателей, отвечающих режиму S2, необходимо чтобы действительное время кратковременной работы  $t_p$  было равно одному из стандартных значений времени  $t_{p.см} = 10, 30, 60, 90$  мин, для которого выполнен двигатель. Тогда двигатель выбирается из условия

$$M_{\text{Э.СТ}} = \sqrt{\frac{1}{t_{p.см}} \cdot M_C^2 \cdot t_p} \quad (5.8)$$

Если  $t_p \neq t_{p.см}$ , то предварительно выбирается двигатель, имеющий по каталогу значения  $t_{p.см}$  и  $P_H$ , ближайшие к заданным значениям  $t_p$  и  $M_{\text{Э.СТ}}$ .

## 4.2 Проверка электродвигателя выбранной мощности

Проверка двигателя по нагреву осуществляется методом эквивалентных величин (момента, тока, мощности) по условию

$$M_H > M_{\text{Э}}, \quad (5.9)$$



где  $M_H$  - номинальный момент двигателя, Н·м.

Проверка двигателя по перегрузочной способности осуществляется по условию

$$M_{MAX} > M_{i,max}, \quad (5.10)$$

где  $M_{MAX}$  - максимальный момент, развиваемый двигателем, Н·м;  
 $M_{i,max}$  - наибольшее значение статического момента на нагрузочной диаграмме, Н·м.

Максимальный момент определяется по формуле

$$M_{MAX} = \lambda_m \cdot M_H, \quad (5.11)$$

где  $\lambda_m$  - допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту (находится по справочнику).

Проверка двигателя по пусковым условиям осуществляется по условию

$$M_{II} > M_{c,max}, \quad (5.12)$$

где  $M_{II}$  - момент, развиваемый двигателем при пуске, Н·м;

$M_{c,max}$  - максимальное значение статического момента при пуске, Н·м.

Пусковой момент двигателя равен

$$M_{II} = \lambda_n \cdot M_H, \quad (5.13)$$

где  $\lambda_n$  - кратность пускового момента (находится по справочнику).

Если эквивалентные величины превышают номинальные и не выполняются условия проверки двигателя по перегрузке и пуску, то в этом случае следует выбрать по каталогу двигатель большей мощности и повторить расчеты.

### 4.3 Условия задач

*Задача 1* Выбрать мощность двигателя постоянного тока, который работает в режиме S1 с постоянной статической мощностью  $P_c$ . Данные для расчетов взять из таблицы 6.1.

*Задача 2* Выбрать мощность асинхронного двигателя и проверить его по необходимым условиям. Двигатель работает в режиме S1 с переменной нагрузкой по заданному циклу (таблица 6.1). Номинальная скорость двигателя равна  $\omega_n$ .

*Задача 3* Выбрать мощность асинхронного двигателя и проверить его по необходимым условиям. Двигатель работает в режиме S2 с моментом нагрузки  $M_c$ . Значения времени рабочего периода  $t_p$  и номинальной скорости двигателя  $\omega_n$  взять из таблицы 6.1.

*Задача 4* Выбрать мощность асинхронного двигателя и проверить его по необходимым условиям. Двигатель работает в режиме S3 с переменной нагрузкой по заданному циклу (таблица 6.1) с продолжительностью включения  $PВ_{ст}$ . Номинальная скорость двигателя равна  $\omega_n$ .

## 5 Содержание отчета

5.1 Название практической работы

5.2 Цель практической работы

5.3 Краткие теоретические сведения

- 5.4 Условия задач
- 5.5 Расчеты для решения задач
- 5.6 Вывод о выполненной работе

## **6 Контрольные вопросы**

- 6.1 В чем отличие нагрузочной диаграммы механизма от нагрузочной диаграммы электропривода?
- 6.2 Что представляет собой продолжительный номинальный режим работы S1 двигателя? Особенности выбора двигателя для этого режима.
- 6.3 Что представляет собой кратковременный номинальный режим работы S2 двигателя? Особенности выбора двигателя для этого режима.
- 6.4 Что представляет собой повторно-кратковременный номинальный режим работы S3 работы двигателя? Особенности выбора двигателя для этого режима.
- 6.5 Какие условия проверки выбранного двигателя существуют?

Таблица 6.1– Исходные данные для решения задач

№ п/п	Задача 1		Задача 2							Задача 3			Задача 4							
	Р <sub>с</sub> , кВт	η <sub>п</sub>	М <sub>1</sub> , Н·м	t <sub>1</sub> , Ч	М <sub>2</sub> , Н·м	t <sub>2</sub> , ч	М <sub>3</sub> , Н·м	t <sub>3</sub> , ч	ω <sub>н</sub> , рад/с	М <sub>с</sub> , Н·м	t <sub>р</sub> , мин	ω <sub>н</sub> , рад/с	М <sub>1</sub> , Н·м	t <sub>1</sub> , с	М <sub>2</sub> , Н·м	t <sub>2</sub> , с	М <sub>3</sub> , Н·м	t <sub>3</sub> , с	ПВ <sub>ст</sub> , %	ω <sub>н</sub> , рад/с
1	2	0,93	20	0,5	15	1,5	40	0,7	104,7	20	80	104,7	80	60	30	175	0	90	60	314,2
2	3	0,94	30	0,8	20	1,2	10	0,3	104,7	100	27	157,1	60	65	75	130	0	180	40	104,7
3	5	0,95	50	1,0	80	0,8	30	1,0	157,1	30	55	314,2	15	50	50	100	0	200	25	157,1
4	7	0,96	40	1,5	20	0,5	50	2,0	157,1	90	10	104,7	40	100	70	150	0	200	60	314,2
5	8	0,97	35	1,1	45	0,9	55	1,2	314,2	40	50	157,1	100	40	80	100	0	120	40	104,7
6	9	0,98	60	1,8	40	0,4	20	0,6	314,2	80	85	314,2	45	50	30	20	0	145	25	157,1
7	10	0,93	20	0,4	50	1,7	10	0,5	104,7	50	35	104,7	25	180	40	90	0	160	60	314,2
8	11	0,94	80	0,6	60	1,6	20	1,5	104,7	70	92	157,1	80	80	120	100	0	180	40	104,7
9	12	0,95	25	1,2	40	0,7	10	1,2	157,1	60	60	314,2	20	60	45	30	0	130	25	157,1
10	13	0,96	45	1,5	80	0,3	50	0,8	157,1	95	15	104,7	60	130	35	150	0	120	60	314,2
11	14	0,97	100	1,6	120	1,0	80	0,5	314,2	25	65	157,1	35	100	55	40	0	165	40	104,7
12	15	0,98	40	0,3	80	2,0	100	0,9	314,2	85	57	314,2	40	90	20	60	0	250	25	157,1
13	16	0,93	15	0,9	50	1,2	15	0,4	104,7	35	20	104,7	50	120	10	115	0	155	60	314,2
14	17	0,94	60	1,3	80	0,6	30	1,7	157,1	75	75	157,1	30	80	60	105	0	170	40	104,7
15	18	0,95	80	2,0	100	0,5	130	1,6	314,2	55	40	314,2	20	210	40	55	0	160	25	157,1

## Раздел контроля знаний

Вопросы к тематическому контролю №1  
по учебной дисциплине «Основы электропривода»  
для специальностей 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация  
электрооборудования (по направлениям)»  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»  
2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

- 1 Дайте определение электропривода, приведите и поясните его общую структурную схему.
- 2 Напишите и поясните основное уравнение движения электропривода.
- 3 Напишите и поясните уравнения, описывающие движение в механической части электропривода.
- 4 Выведите формулу для определения приведённого момента нагрузки на примере кинематической схемы подъемной лебедки.
- 5 Поясните понятия активного и реактивного моментов нагрузки, а также жёсткости механической характеристики.
- 6 Поясните понятия естественной и искусственных характеристик двигателей.
- 7 Выведите формулу для определения приведённого момента инерции электропривода на примере кинематической схемы подъемной лебедки.
- 8 Опишите неустановившееся движение ЭП при постоянном динамическом моменте с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.
- 9 Поясните понятие установившегося движение ЭП и его статической устойчивости.
- 10 Опишите неустановившееся движение ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.

Составил преподаватель

Э.А.Петрович

Рассмотрены и рекомендованы на заседании  
цикловой комиссии электротехнических дисциплин

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201 г.

Председатель комиссии

Е.С.Гутько

Вопросы к тематическому контролю №2  
по учебной дисциплине «Основы электропривода»

для специальностей 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация  
электрооборудования (по направлениям)»  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»  
2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

- 1 Приведите схему включения ДПТ НВ. Приведите формулы и графики механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ.
- 2 Изложите вывод уравнений статических характеристик ДПТ НВ.
- 3 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (режимы короткого замыкания, холостого хода и двигательный).
- 4 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (тормозные режимы работы двигателя).
- 5 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря. Привести соответствующие статические характеристики и формулы.
- 6 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.
- 7 Поясните, как производится регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске и торможении. Приведите статические характеристики и формулы для расчета сопротивлений добавочных резисторов.
- 8 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением магнитного потока. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.
- 9 Приведите схему включения ДПТ последовательного возбуждения, опишите его режимы работы, привести статические характеристики.
- 10 Опишите свойства и характеристики системы «тиристорный преобразователь –ДПТ». Приведите схему и статические характеристики системы.
- 11 Поясните, как производится импульсное регулирование скорости ЭП с ДПТ НВ. Приведите соответствующие схемы и механические характеристики.
- 12 Поясните, как производится торможение ЭП с ДПТ последовательного возбуждения. Ответ поясните с помощью схем и механических характеристик.

Составил преподаватель

Э.А.Петрович

Рассмотрены и рекомендованы на заседании  
цикловой комиссии электротехнических дисциплин

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201 г.

Председатель комиссии

Е.С.Гутько

Вопросы к тематическому контролю №3  
по учебной дисциплине «Основы электропривода»

для специальностей 2-36 03 31-01 «Монтаж и эксплуатация  
электрооборудования (по направлениям)»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

1 Приведите и поясните схемы включения и П-образную схему замещения АД.

2 Приведите электромеханическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

3 Приведите механическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

4 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД с помощью резисторов. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

5 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

6 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением частоты. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

7 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением числа пар полюсов. Приведите соответствующие схемы, статические характеристики и формулы.

8 Поясните, как производится торможение противовключением ЭП с АД. Приведите механические характеристики.

9 Поясните, как производится рекуперативное торможение ЭП с АД. Приведите механические характеристики.

10 Поясните, как производится динамическое торможение ЭП с АД. Приведите схему и статические характеристики.

11 Приведите и поясните схемы статических частотных преобразователей.

Составил преподаватель

Э.А.Петрович

Рассмотрены и рекомендованы на заседании  
цикловой комиссии электротехнических дисциплин

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201 г.

Председатель комиссии

Е.С.Гутько

## **Примерный перечень вопросов к ОКР по учебной дисциплине «Основы электропривода»**

для специальностей 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(по направлениям)»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

### **1 уровень**

1 Дайте определение электропривода, приведите и поясните его общую структурную схему.

2 Приведите классификацию электроприводов (по назначению, по роду тока, по характеристике движения, по количеству двигателей, по виду силового преобразователя).

3 Дайте определение понятию механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины.

4 Поясните понятия естественной и искусственных характеристик двигателей.

5 Поясните понятие жёсткости механической характеристики двигателя.

6 Поясните понятия активного и реактивного моментов нагрузки.

7 Поясните понятие динамического момента.

8 Поясните понятия скорость идеального холостого хода и статический перепад скорости ЭП с ДПТ НВ.

9 Поясните понятие перегрузочная способность АД.

10 Поясните понятие скольжения АД.

### **2 уровень**

1 Напишите и поясните основное уравнение движения электропривода.

2 Напишите и поясните уравнения, описывающие движение в механической части электропривода.

3 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (режимы короткого замыкания, холостого хода и двигательный).

4 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (тормозные режимы работы двигателя).

5 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

6 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

7 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением магнитного потока. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

8 Приведите схему включения ДПТ последовательного возбуждения, опишите его режимы работы, Приведите статические характеристики.

9 Приведите электромеханическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

10 Приведите механическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

### **3 уровень**

1 Выведите формулу для определения приведённого момента инерции электропривода на примере кинематической схемы подъемной лебедки.

2 Опишите неустановившееся движение ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.

3 Опишите свойства и характеристики системы «тиристорный преобразователь –ДПТ». Приведите схему и статические характеристики системы.

4 Поясните, как производится торможение ЭП с ДПТ последовательного возбуждения. Ответ поясните с помощью схем и механических характеристик.

5 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

6 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением частоты. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

7 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД с помощью резисторов. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

8 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением числа пар полюсов. Приведите соответствующие схемы, статические характеристики и формулы.

9 Поясните, как производится торможение противовключением ЭП с АД. Приведите механические характеристики.

10 Поясните, как производится рекуперативное торможение ЭП с АД. Приведите механические характеристики.



Примерный перечень экзаменационных вопросов  
по учебной дисциплине «Основы электропривода»  
для дневного и заочного отделений

для специальностей 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»  
2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(по направлениям)»

Уровень 1

- 1 Дайте определение электропривода, приведите и поясните его общую структурную схему.
- 2 Приведите классификацию электроприводов (по назначению, по роду тока, по характеристике движения, по количеству двигателей, по виду силового преобразователя).
- 3 Напишите и поясните основное уравнение движения электропривода.
- 4 Напишите и поясните уравнения, описывающие движение в механической части электропривода.
- 5 Выведите формулу для определения приведённого момента нагрузки на примере кинематической схемы подъемной лебедки.
- 6 Дайте определение понятию механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины.
- 7 Поясните понятия активного и реактивного моментов нагрузки, а также жёсткости механической характеристики.
- 8 Поясните понятия естественной и искусственных характеристик двигателей.
- 9 Поясните понятие электромеханической постоянной времени, её геометрический смысл.
- 10 Охарактеризуйте установившееся движение ЭП.
- 11 Поясните понятие динамического момента.
- 12 Поясните понятие устойчивости установившегося движения в электроприводе.
- 13 Поясните понятия скорость идеального холостого хода и статический перепад скорости ЭП с ДПТ НВ.
- 14 Поясните понятие пусковой диаграммы ДПТ НВ.
- 15 Поясните понятие перегрузочная способность АД.
- 16 Приведите численные значения скольжения АД при различных режимах работы.
- 17 Поясните понятие КПД электроприводов.
- 18 Поясните понятие коэффициент мощности электроприводов.
- 19 Поясните понятия диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы механизма.
- 20 Изложите основные этапы истории развития электропривода.

Уровень 2

- 1 Выведите формулу для определения приведённого момента инерции электропривода на примере кинематической схемы подъемной лебедки.

2 Опишите неустановившееся движение ЭП при постоянном динамическом моменте с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.

3 Приведите схему включения ДПТ НВ. Приведите формулы и графики механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ.

4 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (режимы короткого замыкания, холостого хода и двигательный).

5 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (тормозные режимы работы двигателя).

6 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

7 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

8 Поясните, как производится регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске и торможении. Приведите статические характеристики и формулы для расчета сопротивлений добавочных резисторов.

9 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением магнитного потока. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

10 Приведите схему включения ДПТ последовательного возбуждения, опишите его режимы работы, приведите статические характеристики.

11 Приведите и поясните схемы включения и П-образную схему замещения АД.

12 Приведите электромеханическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

13 Приведите механическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

14 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД с помощью резисторов. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

15 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

16 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением частоты. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

17 Поясните, как производится регулирование скорости АД в каскадных схемах его включения. Ответ поясните с помощью схем и статических характеристик.

18 Приведите и поясните схему преобразователя частоты с синхронным генератором.

19 Приведите и опишите схему включения, статические характеристики ЭП с синхронным двигателем.

20 Охарактеризуйте потери мощности и энергии в установившемся режиме работы ЭП.

### Уровень 3

- 1 Поясните понятие установившегося движение ЭП и его статической устойчивости.
- 2 Опишите неустановившееся движение ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.
- 3 Изложите вывод уравнений статических характеристик ДПТ НВ.
- 4 Расскажите алгоритм и приведите формулы для расчёта сопротивлений секций пускового реостата ДПТ НВ.
- 5 Опишите способы пуска ДПТ, дайте определение понятию пусковая диаграмма ДПТ.
- 6 Опишите свойства и характеристики системы «тиристорный преобразователь–двигатель». Приведите схему и статические характеристики системы.
- 7 Поясните, как производится регулирование координат в системе «источник тока – двигатель». Приведите схему регулирования и статические характеристики.
- 8 Поясните, как производится импульсное регулирование скорости ЭП с ДПТ НВ. Приведите соответствующие схемы и механические характеристики.
- 9 Поясните, как производится торможение ЭП с ДПТ последовательного возбуждения. Ответ поясните с помощью схем и механических характеристик.
- 10 Изложите вывод формул для расчёта резисторов в цепи якоря ДПТ НВ методом пропорций.
- 11 Изложите вывод формул для расчёта резисторов в цепи якоря ДПТ НВ методом отрезков.
- 12 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением числа пар полюсов. Приведите соответствующие схемы, статические характеристики и формулы.
- 13 Поясните, как производится торможение противовключением ЭП с АД. Приведите механические характеристики.
- 14 Поясните, как производится рекуперативное торможение ЭП с АД. Приведите механические характеристики.
- 15 Поясните, как производится динамическое торможение ЭП с АД. Приведите схему и статические характеристики.
- 16 Поясните, как производится торможение АД при самовозбуждении. Приведите схемы и статические характеристики.
- 17 Поясните, как производится импульсное регулирование координат ЭП с АД. Приведите соответствующие схемы и механические характеристики.
- 18 Приведите и поясните схемы статических частотных преобразователей.
- 19 Поясните, как производится выбор двигателей для электропривода.
- 20 Поясните, как производится проверка двигателей по нагреву.

### Уровень 4

- 1 Для ДПТ НВ рассчитайте сопротивление секций пускового реостата и постройте пусковую диаграмму.
- 2 Для ЭП с ДПТ НВ определите угол  $\alpha$  управления тиристорами для снижения угловой скорости в  $n$  раз по сравнению с номинальной.
- 3 Определите сопротивление резистора в цепи якоря ДПТ НВ.
- 4 Определите статический перепад скорости ЭП с ДПТ НВ при появлении на валу момента сопротивления  $M_c$ .
- 5 Постройте нагрузочную диаграмму и определите расчетную мощность двигателя для электропривода.
- 6 Определите угловую скорость ДПТ НВ при заданных значениях магнитного потока и нагрузки на валу.
- 7 Рассчитайте угловую скорость и сопротивление резистора в цепи ротора АД.
- 8 Рассчитайте сопротивление секций пускового реостата для АД с фазным ротором.
- 9 Определите величину сопротивления в цепи ротора АД, чтобы его пусковой момент равнялся максимальному.
- 10 Найдите критический момент АД и его перегрузочную способность при заданном снижении величины питающего напряжения.
- 11 Произведите проверку пригодности выбранного двигателя для работы в ЭП.

Примерный перечень вопросов к дифференцированному зачету  
по учебной дисциплине «Основы электропривода»  
для специальности 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования  
(по направлениям)»

- 1 Дайте определение электропривода, привести и пояснить его общую структурную схему.
- 2 Приведите классификацию электроприводов (по назначению, по роду тока, по характеристике движения, по количеству двигателей, по виду силового преобразователя).
- 3 Напишите и поясните основное уравнение движения электропривода (ЭП).
- 4 Напишите и поясните уравнения, описывающие движение в механической части ЭП.
- 5 Выведите формулу для определения приведённого момента нагрузки на примере кинематической схемы подъемной лебедки.
- 6 Дайте определение механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины.
- 7 Поясните понятия активного и реактивного моментов нагрузки, а также жёсткости механической характеристики.
- 8 Поясните понятия естественной и искусственных характеристик двигателей.
- 9 Поясните понятие электромеханической постоянной времени, её геометрический смысл.
- 10 Охарактеризуйте установившееся движение ЭП.
- 11 Поясните понятие динамического момента.
- 12 Поясните понятие устойчивости установившегося движения в электроприводе.
- 13 Поясните понятия скорость идеального холостого хода и статический перепад скорости ЭП с ДПТ НВ.
- 14 Поясните понятие пусковой диаграммы ДПТ НВ.
- 15 Поясните понятие перегрузочная способность АД.
- 16 Приведите численные значения скольжения АД при различных режимах работы.
- 17 Поясните понятие КПД электроприводов.
- 18 Поясните понятие коэффициент мощности электроприводов.
- 19 Поясните понятия диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы механизма.
- 20 Изложите основные этапы истории развития электропривода.
- 21 Выведите формулу для определения приведённого момента инерции электропривода на примере кинематической схемы подъемной лебедки.
- 22 Опишите неустановившееся движение ЭП при постоянном динамическом моменте с помощью соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.
- 23 Приведите схему включения ДПТ НВ. Привести формулы и графики механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ.

24 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (режимы короткого замыкания, холостого хода и двигательный).

25 Опишите энергетические режимы работы ДПТ НВ с помощью соответствующих схем и формул (тормозные режимы работы двигателя).

26 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

27 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением подводимого к якорю напряжения. Привести соответствующие статические характеристики и формулы.

28 Поясните, как производится регулирование тока и момента ДПТ НВ при пуске и торможении. Приведите статические характеристики и формулы для расчета сопротивлений добавочных резисторов.

29 Поясните способ регулирования координат ЭП с ДПТ НВ изменением магнитного потока. Привести соответствующие статические характеристики и формулы.

30 Приведите схему включения ДПТ последовательного возбуждения, опишите его режимы работы, приведите статические характеристики.

31 Приведите и поясните схемы включения и П-образную схему замещения АД.

32 Приведите электромеханическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

33 Приведите механическую характеристику АД, покажите на ней характерные точки. Приведите формулы, описывающие данную характеристику.

34 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД с помощью резисторов. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

35 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением напряжения. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

36 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением частоты. Приведите соответствующие статические характеристики и формулы.

37 Поясните, как производится регулирование скорости АД в каскадных схемах его включения. Ответ поясните с помощью схем и статических характеристик.

38 Приведите и пояснить схему преобразователя частоты с синхронным генератором.

39 Приведите и опишите схему включения, статистические характеристики ЭП с синхронным двигателем.

40 Охарактеризуйте потери мощности и энергии в установившемся режиме работы ЭП.

41 Поясните понятие установившегося движение ЭП и его статической устойчивости.

42 Опишите неустановившееся движение ЭП при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа с помощью

соответствующих формул, механических характеристик и графиков переходных процессов.

43 Изложите вывод уравнений статических характеристик ДПТ НВ.

44 Расскажите алгоритм и привести формулы для расчёта сопротивлений секций пускового реостата ДПТ НВ.

45 Опишите способы пуска ДПТ, дайте определение понятию пусковая диаграмма ДПТ.

46 Опишите свойства и характеристики системы «тиристорный преобразователь –двигатель». Приведите схему и статические характеристики системы.

47 Поясните, как производится регулирование координат в системе «источник тока – двигатель». Привести схему регулирования и статические характеристики.

48 Поясните, как производится импульсное регулирование скорости ЭП с ДПТ НВ. Приведите соответствующие схемы и механические характеристики.

49 Поясните, как производится торможение ЭП с ДПТ последовательного возбуждения. Ответ поясните с помощью схем и механических характеристик.

50 Изложите вывод формул для расчёта резисторов в цепи якоря ДПТ НВ методом пропорций.

51 Изложите вывод формул для расчёта резисторов в цепи якоря ДПТ НВ методом отрезков.

52 Поясните способ регулирования координат ЭП с АД изменением числа пар полюсов. Приведите соответствующие схемы, статические характеристики и формулы.

53 Поясните, как производится торможение противовключением ЭП с АД. Приведите механические характеристики.

54 Поясните, как производится рекуперативное торможение ЭП с АД. Приведите механические характеристики.

55 Поясните, как производится динамическое торможение ЭП с АД. Приведите схему и статические характеристики.

56 Поясните, как производится торможение АД при самовозбуждении. Приведите схемы и статические характеристики.

57 Поясните, как производится импульсное регулирование координат ЭП с АД. Приведите соответствующие схемы и механические характеристики.

58 Приведите и пояснить схемы статических частотных преобразователей.

59 Поясните, как производится выбор двигателей для электропривода.

60 Поясните, как производится проверка двигателей по нагреву.

**Перечень учебных изданий и информационно-аналитических  
материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины**

**ЛИТЕРАТУРА**

**Основная**

1. Кацман М.М. Электрический привод: учебник для студ.образоват. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2013.– 384 с.
2. Епифанов А.П. Основы электропривода: Учебное пособие. 2-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 192 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования – М.: Издательский центр «Академия», 2005.– 368 с.
4. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: Учеб. пособие.- Минск: Техноперспектива, 2007

**Дополнительная**

- Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию : Учеб. пособие для вузов / И.И. Алиев. 2-е изд., доп. М., 2000.
- Ильинский, Н.Ф. Электропривод. Энерго- и ресурсосбережение : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. М., 2008.
- Коломиец, А.П. Электропривод и электрооборудование комплексов : учебникдля студ. высш. учеб. заведений / А.П. Коломиец, Н.П. Кондратьева, И.Р.Владыкин, С.И. Юран. М., 2007.
- Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода : Учебник / В.В. Москаленко. М., 2004.
- Онищенко, Г.Б. Электрический привод : Учебник для вузов / Г.Б. Онищенко М., 2003.

**Технические нормативные правовые акты**

- ГОСТ 2.701 – 2008 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
- ГОСТ 2.710 – 81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.
- ГОСТ 2.721 – 74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения.
- ГОСТ 2.702 – 2011 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем.
- ГОСТ 2.755 – 87 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения.
- ГОСТ 2.105 – 95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.



ГОСТ 2.722 – 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Машины электрические.

ГОСТ 2.723 – 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители.

ГОСТ 2.727 – 68 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Разрядники, предохранители.

ГОСТ 2.728 – 74 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Резисторы, конденсаторы.

ГОСТ 2.730 – 73 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Приборы полупроводниковые.

ГОСТ 2.756 – 76 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Воспринимающая часть электромеханических устройств.