Балаковский инженерно-технологический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Факультет атомной энергетики и технологий
Кафедра «Атомная энергетика»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
по дисциплине «Автоматизированный электрический привод»

Направления подготовки
«13.03.02 Электроэнергетика и электротехника»

Основная профессиональная образовательная программа
«Электроснабжение»

Квалификация выпускника
Бакалавр

Форма обучения

Заочная

Балаково

Цели освоения дисциплины

Целью преподавания дисциплины является формирование, развитие и совершенствование у обучаемых профессиональных компетенций, позволяющих выпускнику осуществлять оформление технической документации на различных стадиях разработки проекта системы электроснабжения объектов капитального строительства

Профессиональный стандарты:

- «16.147. Специалист по проектированию систем электроснабжения объектов капитального строительства.»,
- «24.089.Специалист в области электротехнического обеспечения атомной станции»,
- «24.033.Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики атомной станции».

Место дисциплины в структуре ООП ВО

Дисциплина входит в профессиональный цикл, дисциплина по выбору в структуре ООП направления 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

Дисциплина «Автоматизированный электрический привод» формирует компетенции во взаимосвязи со следующими дисциплинами и практиками:

- Экология, Общая энергетика, Безопасность жизнедеятельности, Электрические станции и подстанции, Электроэнергетические системы и сети, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, Техника высоких напряжений, Электроснабжение, Механика, Инженерная графика, Основы проектирования электрооборудования, Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения, Надежность электроснабжения, Перспективные электро-технологии, Применение электро-технологий в промышленности, Основы электроэнергетики, Передача и распределение электрической энергии, Светотехника, Основы электрического освещения, Автономные источники электроснабжения, Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, Электрические аппараты, Микропроцессорные устройства управления и защиты, Электропривод производственных машин и механизмов, Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии, Преобразовательные устройства в системе электроснабжения, Технико-экономические расчеты в электроэнергетике, Организация и функционирование рынков электрической энергии, мощности и систем услуг, Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий, Проектирование систем электроснабжения городов, Производственная практика (эксплуатационная), Производственная практика (преддипломная), Государственная итоговая аттестация.
- Электрические машины, Эксплуатация систем электроснабжения, Электрические аппараты, Микропроцессорные устройства управления и защиты, Электропривод производственных машин и механизмов, Производственная практика (эксплуатационная), Производственная практика (преддипломная), Государственная итоговая аттестация.
- Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения, Электрические аппараты, Микропроцессорные устройства управления и защиты, Электропривод производственных машин и механизмов, Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии, Преобразовательные устройства в системе электроснабжения, Производственная практика (эксплуатационная), Производственная практика (преддипломная).

При освоении данной дисциплины студент сможет частично продемонстрировать трудовые функции:

- B/02.6. Разработка текстовой и графической частей проектной документации системы электроснабжения объектов капитального строительства.
- B/01.6.Обеспечение эксплуатации СИ, СА и аппаратуры СУЗ на АС .
- A/02.6. Контроль оперативного обслуживания и режимов ЭТО и устройств в соответствии с требованиями ЛНА и НТД АС ,
- C/04.6.Организация оперативного обслуживания ЭТО и устройств с производством сложных переключений АС ,
- D/03.6. Разработка мероприятий по продлению сроков эксплуатации, модернизации и техническому переоснащению АС .

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В процессе освоения данной дисциплины у студента формируются следующие компетенции: профессиональные

Задачи профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
Участие в расчетах и проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; проведение предварительного технико-экономического обоснования проектных решений	Электрические станции и подстанции; электроэнергетические системы и сети; системы электроснабжения городов, промышленных предприятий, сельского хозяйства, транспортных систем и их объекты	ПК-1 Способен принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно технической документацией, соблюдая различные технические и экологические требования	З-ПК-1 Знать: методы разработки технической документации и нормативную базу для составления информационных обзоров, рецензий, отзывов, заключений на техническую документацию У-ПК-1 Уметь: осуществлять взаимодействие с проектными, конструкторскими организациями и организациями изготовителями электро-технического оборудования, выполнять анализ проектной документации В-ПК-1 Владеть: навыками использования типовых проектов и анализ применимости указанного в проекте электро-технического оборудования для объекта профессиональной деятельности
Контроль соблюдения заданных параметров режимов оборудования	Электрические станции и подстанции; электроэнергетические системы и сети; системы электроснабжения промышленных предприятий и их объекты	ПК-4 Способен соблюдать и оценивать параметры пусковых режимов оборудования с обеспечением своевременного и безопасного включения его в работу	З-ПК-4 Знать: главные схемы и схемы собственных нужд электростанции, способов обеспечения нормальных режимов работы оборудования и предотвращения и/или ликвидации ненормальных и аварийных режимов У-ПК-4 Уметь: выполнять требования нормативно-технической документации, организовывать и контролировать процесс выполнения работ подчиненным оперативным персоналом смены цеха при вводе в работу турбогенераторов, трансформаторов, автотрансформаторов и

			шунтирующих реакторов В-ПК-4 Владеть: навыками работы с современными системами управления, сбора и передачи данных, постоянного мониторинга состояния оборудования, параметров его режима работы и их анализа
Участие в расчетах и проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; проведение предварительного технико-экономического обоснования проектных решений	Электрические станции и подстанции; электроэнергетические системы и сети; системы электроснабжения промышленных предприятий и их объекты	ПК-7.1 Способен анализировать и рассчитывать режимы работы, принимать участие в проектировании, модернизации и реконструкции объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием.	З-ПК-7.1 Знать: основы проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий и их объектов; алгоритм выбора номинальных напряжений, выбора конфигурации сети и оборудования электрических сетей при их модернизации и реконструкции; методы расчета режимов электрических сетей промышленных предприятий и их объектов У-ПК-7.1 Уметь: производить выбор электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий и их объектов; рассчитывать технико-экономические показатели систем электроснабжения; выбирать оптимальный вариант схемы электрической сети; рассчитывать параметры нормальных и послеаварийных режимов систем электроснабжения объектов профессиональной деятельности; работать с нормативной и справочной документацией. В-ПК-7.1 Владеть навыками выбора электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий и их объектов; навыками расчета технико-экономических показателей систем электроснабжения; навыками работы с нормативной и справочной документацией; навыками

			анализа результатов расчета режимов работы систем электроснабжения объектов профессиональной деятельности.

Задачи воспитания, реализуемые в рамках освоения дисциплины

В процессе освоения данной дисциплины реализуются следующие задачи воспитания:

Направление/ цели	**Создание условий, обеспечивающих**	**Использование воспитательного потенциала учебных дисциплин**	**Вовлечение в разноплановую внеучебную деятельность**
Профессиональное воспитание	- формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения **(В18)**	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.	1.Организация научно-практических конференций, круглых столов, встреч с ведущими специалистами предприятий экономического сектора города по вопросам технологического лидерства России. 2. Участие в подготовке публикаций в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях
Профессиональное воспитание	- формирование навыков коммуникации, командной работы и лидерства **(В20)**	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов,	1. Организация научного подхода и чувства «Все в одной команде» через участие студентов в проведении круглых столов и семинаров. 2. Формирование вертикальных связей и формальных правил жизни при проведении студенческих конкурсов

		прохождение практик и подготовку ВКР. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.	

Структура и содержание учебной дисциплины

Дисциплина изучается студентами в 7-ом семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 ак. часа.

Календарный план

№ Раздела	№ Темы	Наименование раздела (темы) дисциплины	Виды учебной деятельности (час.)					Аттестация раздела (форма)	Максимальный балл за раздел
			Всего	Лекции	Лабораторные	Практические	СРС/КРС		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	3
1	1	Основы динамики электропривода	8	2	-		6	Тест1	30
	2	Двигатели постоянного тока	6	-	-		6		
	3	Асинхронные двигатели	8	-	-		8		
2	4	Управление электроприводами	30/2	2	8/2		20	Тест2	30
	5	Основы выбора мощности	20	-	-		20		

		электродвигателя							
Всего			**72/2**	**4**	**8/2**		**60**		**60**
Зачет									**40**
Итого									**100**

Содержание лекционного курса

№ темы	Всего часов	№ лекции	Тема лекции. Вопросы, отрабатываемые на лекции	Учебно-методическое обеспечение
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	2	1	Основные понятия и основные элементы электропривода (ЭП). Классификация типов ЭП. Основное уравнение электропривода.	[1, 2, 5, 6, 7]
4	2	2	Основные понятия регулирования. Показатели качества регулирования угловой скорости ЭП. Регулирование угловой скорости ЭП постоянного тока и асинхронного ЭП.	[1, 2, 3, 5, 6, 7]
Всего	**4**			

Перечень практических занятий не предусмотрен учебным планом

Перечень лабораторных работ

№ темы	Всего часов	Наименование лабораторной работы. Задания, вопросы, отрабатываемые на лабораторном занятии	Учебно-методическое обеспечение
1	**2**	**3**	**4**
4	4	Электропривод системы «Тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока независимого возбуждения с подчиненным регулированием по скорости»	[1, 5, 6]
4	4	Электропривод системы «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с регулированием по скорости»	[1, 2, 5, 6]
Всего	**8**		

Задания для самостоятельной работы студентов

№ темы	Всего часов	Вопросы для самостоятельного изучения (задания)	Учебно-методическое обеспечение
1	2	**3**	**4**
1	4	Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей. Время ускорения и замедления ЭП	[1, 2, 5, 6, 7-10]
1	2	Прикладное применение основного уравнения электропривода	[1, 2, 5, 6, 7-10]
2	4	Двигатели постоянного тока. Классификация электродвигателей постоянного тока по способу возбуждения. Механические и электромеханические характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ). Режимы работы двигателей постоянного тока.	1, 5, 6, 7-10
2	2	Способы регулирования скорости электродвигателей постоянного тока	[1, 5, 6, 7-10]
3	4	Асинхронные двигатели переменного тока. Схемы включения асинхронных двигателей. Механические характеристики асинхронных двигателей. Режимы асинхронных двигателей.	[1, 2, 5, 6, 7-10]
3	4	Способы регулирования скорости электродвигателей переменного тока	[1, 2, 5, 6, 7-10]
4	8	Современные разомкнутые и замкнутые системы	[1, 2, 3, 4, 5, 6,

		автоматизированных электроприводов.	7-10]
4	6	Электрические аппараты и элементы систем электропривода.	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-10]
4	6	Преобразователи для питания и управления электродвигателями.	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-10]
5	6	Задачи, решаемые при выборе мощности двигателя. Нагрев и охлаждение двигателей. Режимы работы двигателей. Выбор мощности двигателей. Формирование графика нагрузки двигателя. Выбор двигателя по условиям работы.	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-10]
5	14	Современные системы автоматизированных электроприводов типовых производственных механизмов	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-10]
Всего	**60**		

Расчетно-графическая работа не предусмотрена учебным планом

Курсовая работа не предусмотрена учебным планом

Курсовой проект не предусмотрен учебным планом

Образовательные технологии

При реализации учебного материала курса используются различные образовательные технологии, способствующие созданию атмосферы свободной и творческой дискуссии как между преподавателем и студентами, так и в студенческой группе. Целью при этом является выработка у студентов навыков и компетенций, позволяющих самостоятельно вести исследовательскую и научно-педагогическую работу.

Практическая подготовка при реализации учебной дисциплины организуется путем проведения лабораторных занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка также включает в себя занятия лекционного типа, которые предусматривают передачу учебной информации обучающимся, необходимой для последующего выполнения работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций, практических занятий с использованием ПК и компьютерного проектора. Самостоятельная работа студентов проводится под руководством преподавателей, с оказанием консультаций и помощи при подготовке к практическим занятиям.

Фонд оценочных средств

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

№ п/п	Наименование контролируемых разделов (темы)	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Наименование оценочного средства
Входной контроль			
1	Входной контроль		Вопросы входного контроля (письменно)
Аттестация разделов, текущий контроль успеваемости			
2	Раздел 1	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-7,1, У-ПК-7.1, В-ПК-7.1	Тестирование (письменно)
3	Раздел 2	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-7,1, У-ПК-7.1, В-ПК-7.1	Тестирование (письменно)
Промежуточная аттестация			

4	Зачет	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-7,1, У-ПК-7.1, В-ПК-7.1	Вопросы к зачету (устно)

Входной контроль предназначен для выявления пробелов в знаниях студентов и готовности их к получению новых знаний. Оценочные средства для входного контроля представляют собой вопросы, которые задаются студентам в письменной форме.

Перечень вопросов входного контроля

Вопросы входного контроля.

1) Что такое электродвигатель?
2) Какие типы электродвигателей существуют?
3) Что такое привод?
4) Какие виды приводов существуют?
5) Какие преимущества и недостатки свойственны электрическому приводу?
6) Что вы понимаете под управлением электроприводом?
7) Какими параметрами характеризуется электропривод?
8) От чего зависит скорость вращения электропривода?
9) Что такое коэффициент полезного действия?
10) Какова область применения привода?

Текущий контроль успеваемости – это непрерывно осуществляемый мониторинг уровня усвоения знаний и формирования умений и навыков в течение семестра. Текущий контроль знаний, умений и навыков студентов осуществляется в ходе учебных (аудиторных) занятий, проводимых по расписанию. Формами текущего контроля выступают опросы на лабораторных занятиях, проверка отчетов по выполненным лабораторным работам.

Лабораторные работы проводятся в лаборатории транспортных устройств. Рабочей программой предусмотрено выполнение шести лабораторных работ по следующим темам:

- Электропривод системы «Тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока независимого возбуждения с регулированием по скорости»;
- Электропривод системы «Тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока независимого возбуждения,с подчиненным регулированием по скорости»;
- Электропривод системы «Тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока независимого возбуждения с подчиненным регулированием по напряжению»;
- Электропривод системы «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с регулированием по скорости».

Для выполнения лабораторных работ студенты делятся на подгруппы по 3-4 человека, подгруппы выполняют разные лабораторные работы.

Выполнение лабораторной работы включает в себя следующие этапы: устный опрос по теоретическому материалу по теме лабораторной работы, выполнение эксперимента, статистическую обработку результатов эксперимента (при необходимости), подготовку и защиту письменного отчета по лабораторной работе.

Примерный перечень вопросов, задаваемых при устном отчете:

1. Опишите конструкцию устройства, рассматриваемого в лабораторной работе.
2. Раскройте классификацию и маркировку рассматриваемых в лабораторной работе устройств.
3. Опишите принцип действия устройства, рассматриваемого в лабораторной работе.
4. Опишите преимущества и недостатки рассматриваемого устройства.
5. Раскройте область применения рассматриваемого устройства.
6. Перечислите основные характеристики рассматриваемого устройства.
7. Раскройте, от каких параметров зависят основные характеристики устройства.
8. Опишите особенности настройки и технического обслуживания рассматриваемого устройства.
9. Опишите конструкцию лабораторного стенда (при наличии)
10. Раскройте последовательность выполнения эксперимента.
11. Раскройте требования безопасности, которые необходимо соблюдать при выполнении эксперимента.

Отчет по лабораторной работе оформляется на подгруппу. Отчет по лабораторной работе должен содержать название и цель лабораторной работы, фамилии и инициалы студентов,

выполнивших лабораторную работу, краткое изложение основных понятий, схему лабораторной установки, результаты эксперимента, их статистическую обработку (при необходимости), вывод. Вывод должен характеризовать результаты проведенного эксперимента, их соответствие теоретическим данным, при необходимости объяснение причин расхождения.

По результатам выполнения лабораторной работы студент может заработать от 3 до 5 баллов.

Шкала оценивания лабораторных работ

Оценка (стандартная)	Баллы рейтинговой оценки	Требования
5	5,0	выставляется студенту, если он демонстрирует свободное владение теоретическим материалом по теме лабораторной работы, самостоятельно провел эксперимент и выполнил обработку полученных результатов, грамотно сформулировал вывод по работе
4	4,0	выставляется студенту, если он демонстрирует владение теоретическим материалом по теме лабораторной работы, в большей части самостоятельно провел эксперимент и выполнил обработку полученных результатов, самостоятельно сформулировал вывод по работе
3	3,0	выставляется студенту, если он демонстрирует владение большей частью теоретического материала по теме лабораторной работы, провел эксперимент и выполнил обработку полученных результатов с помощью преподавателя, не смог самостоятельно сформулировать вывод по работе.
н/з	0	выставляется студенту, если он не демонстрирует владения большей частью теоретического материала по теме лабораторной работы, не смог провести экспериментальную часть работы или обработку полученных данных.

Контрольная работа является частью текущей успеваемости и выполняется студентом самостоятельно. При выполнении контрольной работы студент должен выполнить следующие задания:

Для технологического оборудования, оснащенного электроприводом с электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения, параметры которого указаны в таблице, требуется:

1. Рассчитать и построить диаграмму ступенчатого пуска электродвигателя с числом ступеней 3 или 4 по выбору студента. При расчете принять Uя =Uян = 220В и UB = $U_{ВН}$ = 220В. В таблице использованы следующие обозначения: $P_Н$ - номинальная мощность двигателя, кВт; $I_Н$ - номинальный ток якоря, А; р - число пар полюсов электродвигателя; $R_Я$ -сопротивление обмотки якоря, Ом; $R_{ДП}$ - сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом; $R_В$ - сопротивление обмотки возбуждения, Ом. Параметры приводного электродвигателя выбираются из таблицы в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки.

2. Определить величины дополнительных пусковых сопротивлений, включаемых в цепь якоря приводного электродвигателя.

Технические данные электродвигателей постоянного тока серии П с номинальной скоростью $П_Н$ = 1500 об/мин и номинальным напряжением $U_Н$ = 220 В (значения сопротивлений обмоток указаны при температуре 15 °С)

№ вар.	Тип	$P_Н$, кВт	$I_Н$, А	р	$R_Я$, Ом	$R_{ДП}$, Ом	$R_В$, Ом
0	П21	0.7	4.3	2	5.33	1.36	824
1	П22	1.0	5.9	2	2.97	0.79	440
2	П31	1.5	8.7	2	1.85	0.501	490
3	П32	2.2	12.0	2	1.06	0.3	412
4	П41	3.2	18.4	4	0.67	0.246	156
5	П42	4.5	25.4	4	0.403	0.17	109

6	П51	6.0	33.0	4	0.34	0.102	132
7	П52	8.0	43.0	4	0.198	0.068	101
8	П61	11.0	59.5	4	0.15	0.066	121
9	П62	14.0	73.5	4	0.0875	0.048	100

Аттестация раздела по дисциплине проводится в форме тестирования. Тест содержит 16 вопросов. На выполнение задания отводится 30 минут. Тест – это форма контроля, направленная на проверку уровня освоения контролируемого теоретического и практического материала по дидактическим единицам дисциплины (терминологический аппарат, основные методы).

Примерный перечень тестовых заданий:

Тест - 1

1. Если, один двигатель приводит в движение несколько рабочих органов то это:

1) Одиночный привод;
2) Многодвигательный привод;
3) Следящий привод;
4) Трансмиссионный привод.

2. Основное уравнение движения электропривода имеет вид:

1) $M_в = M_c + M_j = \frac{Mc \ .\partial .}{\eta} + J \frac{dw}{dt}$

2) $M_в = M_c + M_j = \frac{Mc \ .\partial .}{\eta} + J \frac{dI}{dt}$

3) $M_в = M_c + M_j = \frac{Mc \ .\partial .}{\eta} + \frac{dJ}{dt}$

4) $M_в = M_c + M_j = \frac{Mc \ .\partial .}{\eta} + \frac{dJ}{dw}$

3. Режиму разгона двигателя соответствует условие:

1) $\frac{dw}{dt} = 1$ 2) $\frac{dw}{dt} > 0$ 3) $\frac{dw}{dt} < 0$ 4) $\frac{dw}{dt} = 0$

4. Скоростной характеристикой электропривода называется зависимость вида:

1) $\omega = f(M)$ 2) $\omega = f(I)$ 3) $U = f(I)$ 4) $M = f(I)$

5. Для асинхронного двигателя жёсткость будет равна:

1) $\beta = \text{var} < 0$ 2) $\beta = \text{var} \gtrless 0$ 3) $\beta = \text{const} < 0$ 4) $\beta = \infty$

6. В двигателе постоянного тока жёсткость остаётся постоянной при:

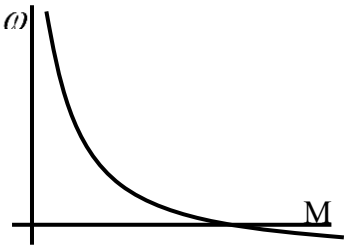
1) Изменении напряжения питания;
2) Изменении сопротивления якорной цепи;
3) Изменении потока возбуждения;
4) Для всех искусственных характеристик.

7. Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид:

1) $w = \frac{U}{к\Phi} - \frac{R_я + R_{п.я}}{к\Phi} M$ 2) $w = \frac{U}{(к\Phi)^2} - \frac{R_я + R_{п.я}}{(к\Phi)^2} M$

3) $w = \frac{U}{к\Phi} - \frac{R_я + R_{п.я}}{(к\Phi)^2} M$ 4) $w = \frac{I}{к\Phi} - \frac{R_я + R_{п.я}}{(к\Phi)^2} M$

8. Механическую характеристику вида имеет:



1) Электропривод с двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением;

2) Электропривод с двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением;

3) Электропривод с асинхронным двигателем

4) Электропривод с шаговым двигателем

9. **Режим короткого замыкания соответствует условию:**

1) $M_{нагр.} = M_{ном.}$ 2) $M_{нагр.} = 0$ 3) $M_{нагр.} < 0$ 4) $M_{нагр.} = M_{двиг.}$

10. Двигатель с возбуждением от постоянных магнитов является частным случаем:

1). Двигателя с независимым возбуждением;

2). Асинхронного двигателя;

3). Двигателя с последовательным возбуждением;

4) Двигателя со смешанным возбуждением.

11. Рекуперативное торможение не реализуется для:

1) В электроприводе с двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением;

2) В электроприводе с двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением;

3) В электроприводе с асинхронным двигателем;

4) В электроприводе с синхронным двигателем.

12. Граничная характеристика представляют собой:

1) Естественную характеристику идеализированного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, последовательная цепь которого не имеет сопротивления;

2) Естественную характеристику идеализированного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, цепь якоря которого не имеет сопротивления;

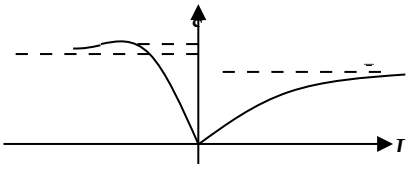
3) Естественную характеристику идеализированного асинхронного двигателя, цепь ротора которого не имеет сопротивления;

3) Естественную характеристику идеализированного асинхронного двигателя, цепь статора которого не имеет сопротивления.

13. Скольжение асинхронного двигателя определяется как:

1) $\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ 2) $\frac{\omega_0 + \omega}{\omega_0}$ 3) $\frac{\omega_0 - \omega}{\omega}$ 4) $\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$

14. На рис. представлены:



1) Скоростные характеристики асинхронного двигателя;

2) Универсальные характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением;

3) Переходные характеристики асинхронного двигателя;

4) Переходные характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением;

15. В режиме рекуперативного торможения асинхронного двигателя скольжению соответствует условие:

1)$s=0$ 2)$s<0$ 3)$s>0$ 4)$s=1$

16. В асинхронном двигателе жёсткость остаётся постоянной при:

1) Изменении напряжения питания;

2) Изменении сопротивления ротора;
3) Изменении частоты;
4) Изменении сопротивления статора.

Тест- 2

1. Датчиком скорости является:
1) Сельсин; 2) Микросин; 3) Тахогенератор; 4) Емкостной датчик.

2. Сельсин предназначен для:
1) Контроля скорости;
2) Контроля тока;
3) Контроля мощности;
4) Контроля угла поворота

3. Система «Генератор-Двигатель» осуществляет регулирование путём изменения
1) Сопротивления главной цепи;
2) Магнитного потока;
3) Частоты питания;
4) Питающего напряжения.

4. В асинхронном двигателе скорость холостого хода меняется при:
1) Изменении напряжения питания;
2) Изменении сопротивления ротора;
3) Изменении частоты;
4) Изменении сопротивления статора.

5. Величина $\frac{U}{k\Phi}$ в уравнении механической характеристики двигателя постоянного тока - это:
1) частота вращения идеального холостого хода двигателя
2) номинальная частота вращения двигателя
3) минимальная частота вращения двигателя
4) максимальная частота вращения двигателя

6. Регулирование скорости АД изменением числа полюсов используется
1) только для двигателей с фазным ротором
2) только для двигателей с короткозамкнутым ротором
3) и для двигателей с фазным ротором, и с короткозамнутым ротором

7. Регулирование скорости синхронного двигателя осуществляется:
1) Изменением активного сопротивления цепи;
2) Изменением питающего напряжения;
3) Изменением реактивного сопротивления цепи;
4) Изменением частоты.

8. Периодическим переключением двигателя с двигательного режима в генераторный реализуется:
1) Реостатное регулирование;
2) Регулирование в системе «Генератор - Двигатель»;
3) Регулирование с помощью магнитного усилителя;
4) Импульсное регулирование.

9. Регулирование с помощью шунтирующего сопротивления реализуется для:
1) Двигателей постоянного тока;
2) Асинхронного двигателя;
3) Синхронного двигателя;

4) Всех типов двигателей.

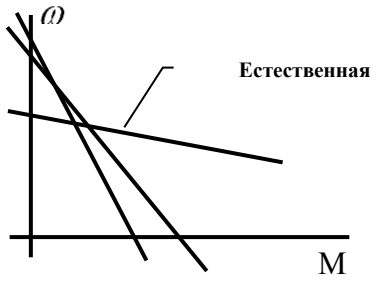
10. Регулирование скорости переключением числа пар полюсов реализуется для:
1) Двигателей постоянного тока;
2) Двигателя постоянного тока с независимым возбуждением;
3) Асинхронного двигателя;
4) Синхронного двигателя.

11. Коэффициентом относительности продолжительности рабочего периода характеризуется:
1) Повторно – кратковременный режим;
2) Кратковременный режим;
3) Длительный режим;
4) Все режимы.

12. Коэффициент относительности продолжительности рабочего периода равен:

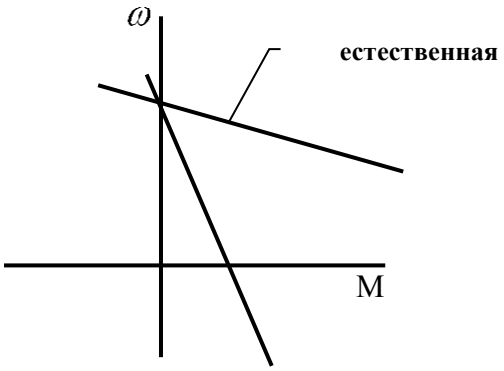
1) $\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0}$; 2) $\varepsilon = \frac{t_p + t_0}{t_p}$; 3) $\varepsilon = \frac{t_p}{t_p - t_0}$; 4) $\varepsilon = \frac{t_p + t_0}{t_0}$.

13. Представленное семейство характеристик соответствует:
1) Реостатному регулированию скорости электропривода
2) Регулированию скорости электропривода изменением магнитного потока
3) Частотному регулированию скорости электропривода
4) Регулированию скорости электропривода изменением питающего напряжения



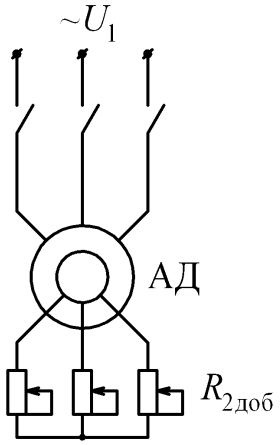
14. Представленная характеристика соответствует:
1) Режиму рекуперативного торможения;
2) Торможению изменением полярности;
3) Динамическому торможению с использованием добавочного сопротивления;
4) Динамическому торможению при условии $M_{нагр.} > M_{к.з.}$

15.



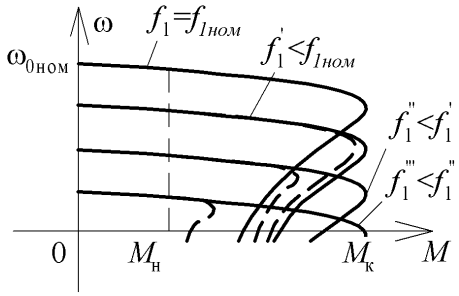
На рисунке представлена схема включения двигателя при
1) Регулирование угловой скорости АД изменением напряжения на статоре
2) реостатном способе регулирования угловой скорости АД
3) Регулирование угловой скорости Изменением числа пар полюсов АД

4) Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя



16. Представленное семейство характеристик соответствует:

1) Реостатному регулированию скорости электропривода
2) Регулированию скорости электропривода изменением магнитного потока
3) Частотному регулированию скорости электропривода
4) Регулированию скорости электропривода изменением питающего напряжения



Баллы за тестирование начисляются в соответствии со следующей таблицей
Промежуточная аттестация осуществляется в форме зачета.

Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету:

Код	**Вид оценочного средства**	**Критерии**	**Балл**	**Максимальный балл – минимальный балл**
1	2	3	4	5
Тест 1, Тест 2	Тестирование 1, Тестирование 2	выставляется студенту, если он ответил правильно на 16 вопросов	10	**10 - 6**
		выставляется студенту, если он ответил правильно на 14-15 вопросов	9	
		выставляется студенту, если он ответил правильно на 12-13 вопросов	8	
		выставляется студенту, если он ответил правильно на 10-11 вопросов	7	
		выставляется студенту, если он ответил правильно на 9 вопросов	6	
		выставляется студенту, если он ответил правильно менее, чем на 9 вопросов	н/з	

1. Классификация электроприводов по характеристике движения, по количеству двигателей, по степени управляемости.

По роду тока

Электропривод постоянного и переменного тока.

По способу распределения механической энергии

1) *Групповой* ЭП обеспечивает движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины. Передача механической энергии от одного двигателя к нескольким рабочим машинам и её распределение между ними производится с помощью одной или нескольких трансмиссий.

2) *Индивидуальный* привод по сравнению с групповым обладает рядом преимуществ: производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями и передаточными устройствами; улучшаются условия работы и повышается производительность труда вследствие облегчения управления отдельными механизмами. Индивидуальный электропривод отличается более лучшими энергетическими показателями. Значительно упрощаются механические передачи, повышается точность работы привода. При использовании индивидуального ЭП создаются наиболее благоприятные условия для автоматизации работы машин и технологических процессов. Такой ЭП широко применяется в сложных металлорежущих станках, прокатных станах, экскаваторах, подъемно-транспортных машинах, роботах и др.

3) *Взаимосвязанный* ЭП имеет два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателей. Примером взаимосвязанного ЭП может служить привод цепного конвейера большой протяженности. Исполнительным органом такого конвейера служит цепь, приводимая в движение несколькими двигателями, установленными по длине конвейера. Взаимосвязанный ЭП широко применяется в транспортных установках, бумагоделательных машинах, текстильных агрегатах, прокатных станах металлургического производства и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является многодвигательный привод – это электропривод, в котором несколько двигателей работают на общий вал.

По виду движения различают реверсивный и нереверсивный ЭП поступательного либо вращательного движения.

По степени управляемости

1) нерегулируемый – для приведения в действие исполнительного органа рабочей машины с одной скоростью, параметры привода меняются только в результате возмущающих воздействий;

2) регулируемый - скорость рабочего органа может изменяться в указанных пределах, параметры привода могут меняться под воздействием управляющего устройства;

3) программно-управляемый – скорость вращения изменяется согласно некоторой программе;

4) следящий – автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа рабочей машины с определённой точностью в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

5) адаптивный – автоматически избирающий структуру или параметры системы управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

По роду передаточного устройства

1) Редукторный, в котором электродвигатель передает вращательное движение рабочему органу машины через редуктор

2) Безредукторный – передача движения осуществляется непосредственно к рабочему органу, либо через передаточное устройство, не содержащее редуктор.

По уровню автоматизации

1) Неавтоматизированный. Управление осуществляется в ручную. Применяется в установках малой мощности, бытовой и медицинской технике.

2) Автоматизированный. Регулирование параметров происходит автоматически, управляющие команды задаются вручную.

3) Автоматический. Управляющие воздействия вырабатываются автоматически, без участия оператора.

2. Основное уравнение движения электропривода одномассовой системы для постоянного момента инерции.

Простейшая механическая система состоит из ротора двигателя и непосредственно связанной с ним нагрузки - рабочего органа машины.

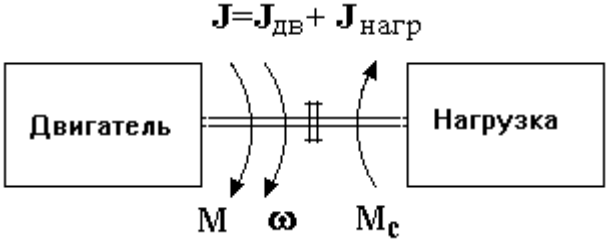


Рис. 1. Модель механической части

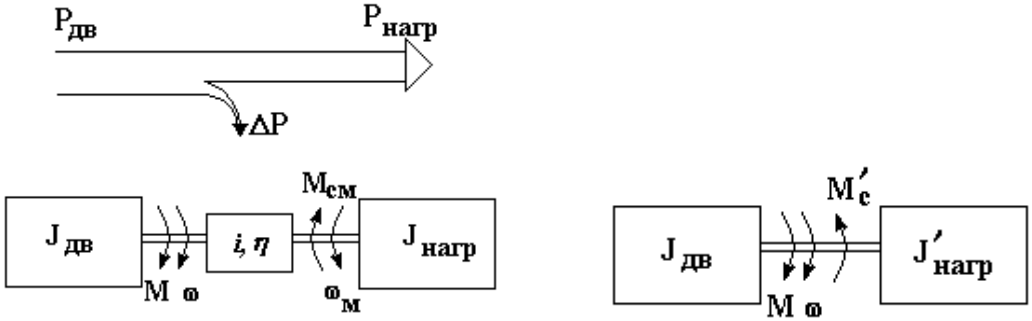
К системе на рис.1 приложены два момента - электромагнитный момент M, развиваемый двигателем, и момент M_c, создаваемый нагрузкой, а также потерями механической части (трение); каждый момент имеет свою величину и направление. Движение системы определяется вторым законом Ньютона:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \qquad (1)$$

где ω - угловая скорость, J- суммарный момент инерции

3. Приведение моментов статической нагрузки, моментов инерции и жесткостей.

Обычно между двигателем и нагрузкой находится какая-либо механическая передача, т.е. имеется несколько различных валов со своими моментами и скоростями. Для сведения любой реальной системы к простейшей модели на рис. 2 нужно выполнить ряд операций, называемых *приведением* моментов и моментов инерции к некоторому выбранному в качестве основного валу, обычно - к валу двигателя. Иными словами, некоторую реальную механическую систему, например, показанную на рис. 2,а, нужно заметить эквивалентной системой (рис. 2,б), такой, чтобы эта замена не отразилась на поведении части системы, оставленной неизменной (двигателя).



а) б)

Рис. 2. К приведению $M_{см}$ и $J_{нагр}$ к валу двигателя

Примем следующие допущения: система жесткая, без зазоров; моменты инерции, относящиеся к основным валам, неизменны, относящиеся к промежуточным валам, если такие есть, равны нулю; отношение $i = \frac{\omega}{\omega_м}$ и КПД передачи η - постоянны.

В реальной и приведенной системах должны остаться неизменной мощность, развиваемая двигателем $M\omega$, т.е. в нашем случае, когда потери покрываются двигателем (M и ω направлены согласно):

$$\frac{M_{см}\omega_м}{\eta} = M'_c\omega, \quad \text{откуда} \quad M'_c = \frac{M_{см}}{i\eta}. \qquad (2)$$

Потери всегда покрываются той частью системы, которая создает движение, поэтому при обратном потоке мощности - от нагрузки к двигателю

$$M'_c = \frac{M_{см}\eta}{i}.$$

В реальной и приведенной системах должны быть одинаковы запасы кинетической энергии, т.е.

$$\frac{J_{дв}\omega^2}{2} + \frac{J_{нагр}\omega_M^2}{2} = \frac{J_{дв}\omega^2}{2} + \frac{J'_{нагр}\omega^2}{2} \quad \text{или} \quad J'_{нагр} = \frac{J_{нагр}}{i^2}. \qquad (3)$$

Здесь в целях упрощения мы не учли потери в передачах; это обычно не приводит к большим погрешностям, если динамические режимы не играют определяющую роль в работе привода.

4. Механические характеристики

Моменты M и M_c могут зависеть от времени, от положения, от скорости. Наиболее интересна и важна связь моментов M и M_c со скоростью ω . Зависимости $\omega(M)$ и $\omega(M_C)$ называют *механическими характеристиками* соответственно *двигателя* и *нагрузки (механизма).*
Механические характеристики будут служить очень удобным и полезным инструментом при анализе статических и динамических режимов электропривода

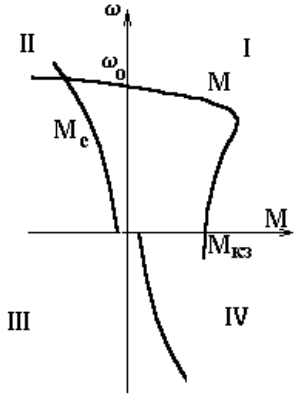


Рис. 3. Пример механических характеристик

Поскольку как моменты, так и скорость могут иметь различные знаки, механические характеристики могут располагаться в четырех квадрантах плоскости $\omega - M$. На рис. 2.3 в качестве примера показаныхарактеристики асинхронного двигателя (M) и центробежной машины (M_c). Знаки величин определяют, приняв одно из направлений движения за положительное, например: по часовой стрелке- + или вверх- + и т.п.

Моменты, направленные по движению (движущие), имеют знак, совпадающий со знаком скорости (участок ω_0 - $M_{к.з}$ характеристики двигателя); *моменты, направленные против движения (тормозящие), имеют знак, противоположный знаку скорости* (остальные участки характеристик

5**.** Виды моментов, действующих в электроприводе: движущие и тормозные. Типовые статические нагрузки: активные – нагрузки грузоподъемных механизмов, упругих тел; реактивные – нагрузки сухого, вязкого и смешанного трения, а также вентиляторная нагрузка.

Моменты принято делить на активные и реактивные.

Активные моменты могут быть как движущими, так и тормозящими, их направление не зависит от направления движения: момент, созданный электрической машиной (M на рис. 3), момент, созданный грузом, пружиной и т.п. Соответствующие механические характеристики могут располагаться в любом из четырех квадрантов.

Реактивные моменты - реакция на движение, они всегда направлены против движения, т.е. всегда тормозящие: момент от сил трения, момент, создаваемый центробежной машиной (M_c на рис. 3) и т.п. Механические характеристики всегда располагаются во втором и четвертом квадрантах.

Механические характеристики принято оценивать их *жесткостью* $\beta = \frac{dM}{d\omega}$. Они бывают (рис. 4) абсолютно жесткими $\beta = \infty$ (1), абсолютно мягкими $\beta = 0$ (2) могут иметь отрицательную $\beta < 0$(3) или положительную (4) жесткость.

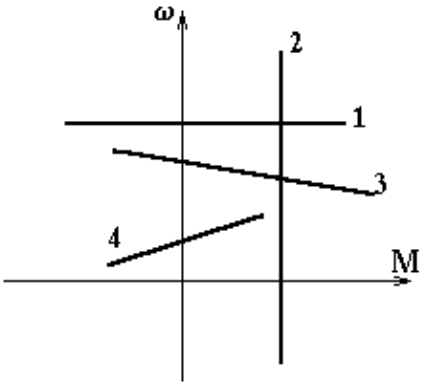
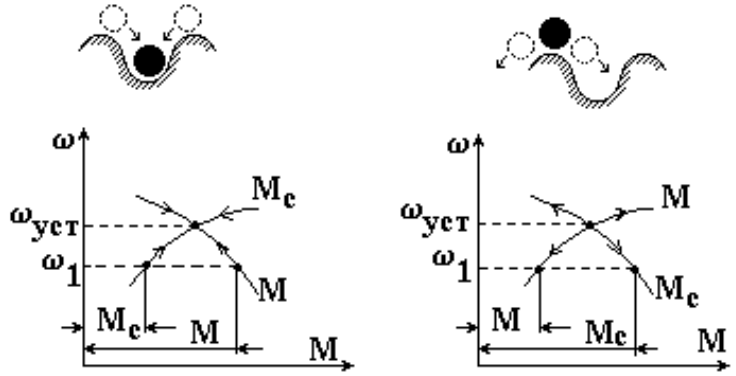


Рис. 4. Механические характеристики с различной жесткостью

6. Установившееся движение. Понятие об устойчивости установившегося движения. Графический и аналитический методы определения устойчивости.

Механические характеристики двигателя и нагрузки позволяют определить, будет ли статически устойчив установившийся режим, т.е. вернется ли система после действия любого случайного возмущения к исходному статическому состоянию - рис. 5а, или не вернется - рис. 5,б.



а) б)

Рис. 5. К определению статической устойчивости

В первом случае (рис. 5а) показано, что любое случайное, например снижение скорости ($\omega_1 < \omega_{уст}$) сопровождается преобладанием движущего момента M над тормозящим M_c, и равновесие восстанавливается, система возвращается в исходное состояние. Во втором случае (рис. 5,б) такое же случайное изменение скорости приводит к преобладанию тормозящего момента, и равновесие не восстанавливается - система статически неустойчива.

7. Уравнение движения электропривода для двухмассовой системы. Преобразование двухмассовой системы к одномассовой системе.

Во многих случаях кинематическая схема рабочей машины содержит упругие элементы: длинные валы, торсионы, упругие муфты, текстропные, канатные передачи и др.).

В реальных схемах иногда приходится учитывать люфты и зазоры в зубчатых передачах и соединениях. В этих случаях кинематическую схему нельзя рассматривать как жесткую одномассовую систему. В особенности это касается высокоточных электроприводов и электроприводов, работающих в интенсивных динамических режимах.

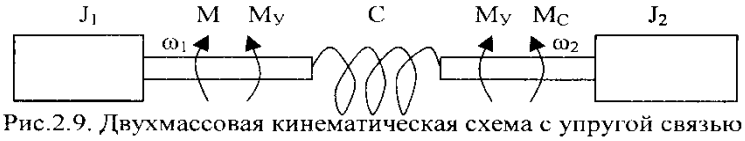


Рис.2.9. Двухмассовая кинематическая схема с упругой связью

Механические системы, в которых присутствуют явно выраженные упругие звенья, обычно приводят к двухмассовым или трехмассовым механическим системам. Рассмотрим двухмассовую электромеханическую схему (рис.2.9). В неразветвленной кинематической схеме обычно выделяют ротор двигателя и жестко связанные с нем элементы кинематической цепи. Приводя моменты инерции этих звеньев к скорости вала двигателя, получим первую массу J_1. Эта масса связана посредством упругого элемента, имеющего жесткостьС, со второй массойJ_2, которую образуют моменты инерции рабочего органа и жестко связанных с ним остальных элементов кинематической цепи.

Описание двухмассовой механической системы с упругим звеном на основе уравнения :

$$L = \frac{J_1\omega_1^2}{2} + \frac{J_2\omega_2^2}{2} - \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2}.$$

8. Общие сведения о регулировании

Регулированием скорости называется принудительное изменение скорости электропривода в зависимости от требований технологического процесса. Понятие регулирования скорости не следует смешивать с естественным изменением скорости, возникающим в электроприводах в силу изменения нагрузки на валу работающей машины. Регулирование скорости осуществляется дополнительным воздействием на приводной двигатель.

Наиболее эффективным с точки зрения затрат и возможностей является электрическое регулирование, которое сегодня доминирует над другими типами регулирования потока мощности к рабочему органу исполнительного механизма.

Кроме регулирования скорости от электропривода в общем случае также требуется обеспечить регулирование момента (тока) и положения. Задача регулирование координат электропривода решается при проектировании систем управления электроприводом (СУЭП).

Регулирование делят обычно на две группы: в разомкнутых системах и в замкнутых системах.

Разомкнутые системы, как правило, не требуют датчиков обратных связей и сложных управляющих устройств (например, программируемые логические контроллеры). Недостатком разомкнутого регулирования является низкая точность поддержания регулируемой координаты, что часто не может обеспечить выполнение необходимых требований технологий производства.

В *замкнутых* системах различают два вида регулирования: по отклонению и по возмущению. Регулирование по возмущению предполагает компенсацию влияния возмущения на регулируемую координату с помощью положительной обратной связи. В электроприводе применяется первый тип регулирования – по отклонению. Использование положительных обратных связей часто приводит к возникновению явления неустойчивости, что делает систему неработоспособной, поэтому регулирование по возмущению в электроприводе не применяется.

Реализация регулирования требует введения в ЭМС дополнительных управляющих устройств. В разомкнутой системе вводятся контакторы, реле, резисторы, реакторы и п.т.

Для осуществления автоматического регулирования предусматриваются управляемые преобразователи и регуляторы, позволяющие автоматически под воздействием обратным связей изменять параметры системы. Наиболее широко используются электромашинные и вентильные управляемые преобразователи и соответствующие системы электропривода: система генератор – двигатель (Г-Д); система тиристорный (или транзисторный) преобразователь – двигатель (ТП-Д); система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

9. Показатели качества регулирования угловой скорости электроприводов

К показателям регулирования относятся точность регулирования, плавность, стабильность скорости, допустимая нагрузка при различных скоростях, динамические показатели качества и экономичность регулирования.

Точность регулирования переменной определяется возможными отклонениями её от заданного значения под действием возмущающих факторов (изменений нагрузки, колебания напряжения мети и др.). При регулировании в разомкнутой системе может быть принято среднее значение координаты при известных пределах изменения всех возмущающих воздействий. При этом оценкой точности регулирования может служить отношение наибольшего отклонения $\Delta\omega_{max}$ к среднему значению $\Delta\omega_{ñð}$

$$\Delta\omega_{max*} = \Delta\omega_{max} / \omega_{ñð} = (\omega_{max} - \omega_{min})/(\omega_{max} + \omega_{min}),$$

где ω_{max} и ω_{min} – максимальное и минимальное значение переменной при данных значениях параметра или задающего сигнала и пределов изменения возмущений.

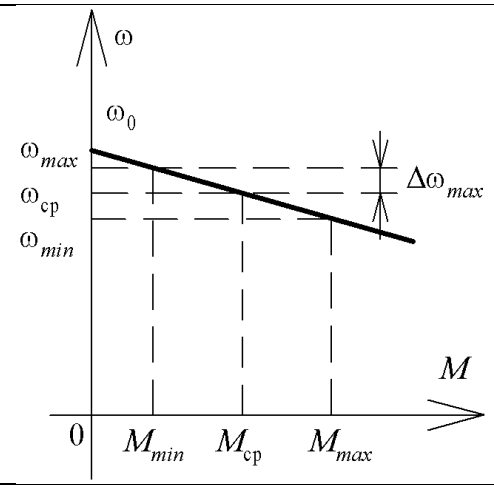


Рис. 7.1. К определению понятия точности регулирования

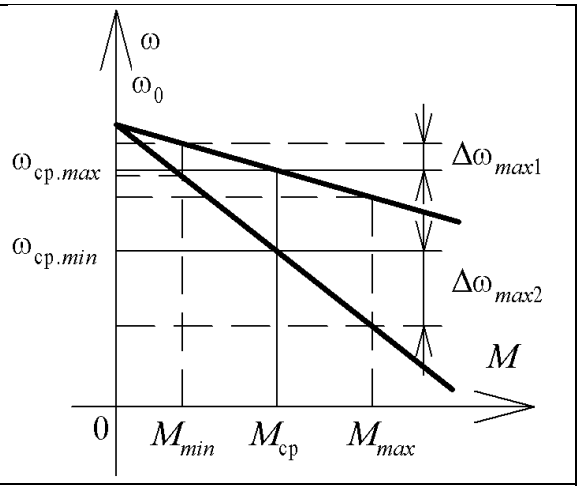


Рис. 7.2. К определению понятия диапазона регулирования

Диапазон регулирования угловой скорости определяется отношением возможных установившихся скоростей: максимальной ω_{max} к минимальной ω_{min}

$$D_\omega = \omega_{max} / \omega_{min} .$$

Плавность регулирования характеризует скачок скорости при переходе от данной скорости к ближайшей возможной. Плавность тем выше, чем меньше этот скачек. Её можно оценить коэффициентом плавности регулирования, который определяется как отношение двух соседних значений угловых скоростей при регулировании

$$\varphi_{ïë} = \omega_i / \omega_{i-1},$$

где ω_i и ω_{i-1} соответственно угловые скорости на *i*-той и (*i*-1) ступенях регулирования.

Экономичность регулирования характеризуется затратами на сооружение и эксплуатацию электропривода. Применение регулируемого электропривода связано с дополнительными первоначальными затратами и эксплуатационными расходами, которые должны окупаться повышением производительности и надежности работы установки, а также улучшением качества продукции. При сравнении различных способов регулирования ориентировочное суждение о затратах можно составить, оценивая массогабаритные показатели дополнительного оборудования, а эксплуатационные затраты по энергии – КПД, характеризующим потери энергии

$$\eta = P_2 / P_1,$$

где P_1 – мощность, потребляемая из сети; P_2 – мощность на валу двигателя

Стабильность угловой скорости характеризуется изменением угловой скорости при заданном отклонении момента нагрузки и тесно связан с понятием жесткости механической характеристики. Чем больше жесткость механической характеристики двигателя, тем выше стабильность скорости электропривода. Самой высокой стабильностью обладают синхронные двигатели, так как у них жесткость МХ $\beta \to \infty$.

Направление регулирования скорости- определяет возможность уменьшение или увеличение её по отношению к номинальному значению зависит от способов регулирования. Для приводов постоянного тока различают одно- и двухзонное регулирование.

В первом случае регулирование осуществляется при постоянстве магнитного потока путем изменения напряжения на якоре вниз от номинального значения. Такое регулирование называют регулированием с постоянством момента ($M = k\Ô I_{ÿ}$, $\Ô = const$).

Для перевода привода во вторую зону уменьшают магнитный поток двигателя (изменяют напряжение на обмотке возбуждения ниже номинального), при этом уменьшается перегрузочная способность двигателя по моменту ($\lambda_M \downarrow = k\Ô \downarrow \lambda_I$) и увеличивается скорость. Такое регулирование называют регулированием с постоянством мощности:

$$P = \omega \cdot M = \frac{U_{ÿ} - I R_{ÿ\Sigma}}{k\Ô} \cdot k\Ô I = (U_{ÿ} - I R_{ÿ\Sigma})\mathrm{I}, \Ô = \mathrm{var}).$$

Характеристики двух зон регулирования ДПТ с НВ представлены на рис. 7.3.

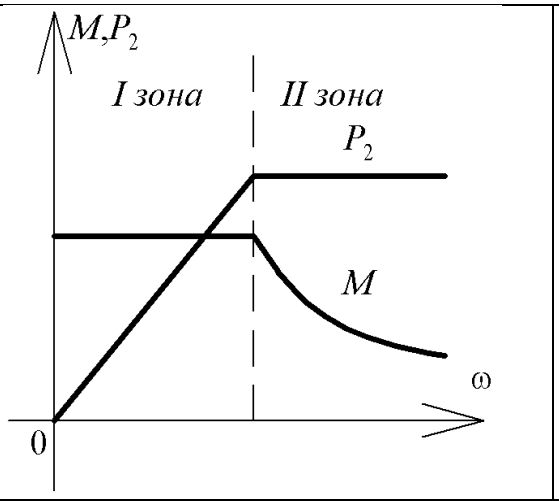


Рис. 7.3. Характеристики двух зон регулирования ДПТ с НВ

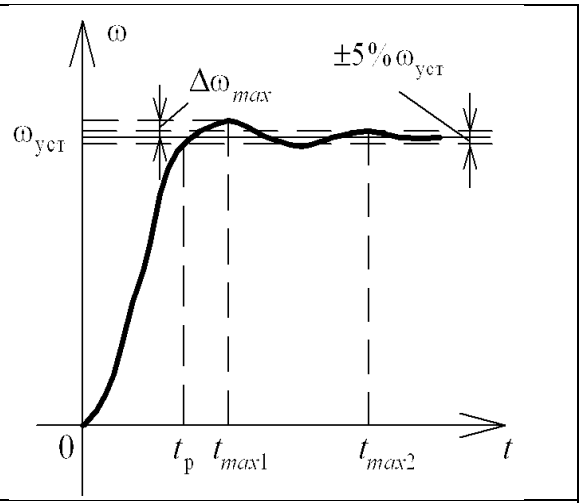


Рис. 7.4. Динамические показатели качества регулирования

Допустимая нагрузка двигателяэто наибольшее значение момента, который двигатель способен длительно развивать при работе на регулировочных характеристиках. Определяется нагревом двигателя и различается в зависимости от способа регулирования. Изменение статического момента от скорости в зависимости от механизма может быть различным.

Динамические качества электропривода во многих случаях определяют производительность установки, износ механического оборудования, качество выпускаемой продукции. Качество переходного процесса можно оценить быстродействием, величиной перерегулирования и колебательностью процесса.

Быстродействие определяет быстроту реакции электропривода на изменения воздействий. Главным показателем быстродействия, непосредственно влияющим на производительность механизмов, является время переходного процесса или время регулирования. В автоматических системах регулирования быстродействие характеризуют показателями переходного процесса при отработке единичного скачкообразного управляющего воздействия. Обычно под временем регулирования понимают время, которое требуется привода для того, чтобы отклонение регулируемой координаты не превышало 5% от заданного значения.

Перерегулирование представляет собой динамическую ошибку и характеризуется максимальным отклонением ω_{max} от установившегося значения $\omega_{óñò}$. Как правило, перерегулирование σ выражают в относительных единицах или процентах:

$$\Delta\omega^{*}_{1\,max} = \frac{\Delta\omega_{1\,max}}{\omega_{óñò}} \cdot 100\ \% .$$

Колебательность электропривода является фактором, влияющим на точность, динамические нагрузки и качество технологического процесса. Её общим показателем служит значение логарифмического декремента затухания

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2},$$

где A_1, A_2 - величина амплитуд первого и следующего за ним максимума.

На рис. 7.4. представлен вид переходного процесса и указаны величина быстродействия $t_ð$ и перерегулирование σ.

10. Классификация электродвигателей постоянного тока (ЭПТ) по способу возбуждения

ДПТ конструктивно состоит из двух основных частей: подвижной части (якоря) и неподвижной части (статора), в которой находится обмотка возбуждения двигателя. Двигатель питается постоянным напряжением. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения различают 4 основных типа электродвигателей.

1. ДПТ с независимым возбуждением (рис. 8.1, а). В данном случае источники питания цепи якоря двигателя и цепи обмотки возбуждения (ОВ) являются разными, иногда с разным уровнем напряжения. В связи с этим поведение тока возбуждения не зависит от цепи якоря (при пренебрежении влиянием реакции якоря), что при неизменности тока возбуждения делает характеристики двигателя линейными.

2. При параллельном способе включения обмотки возбуждения и якоря включают в одну сеть параллельно друг другу (рис. 8.1, б). При условии наличия сети бесконечной мощности напряжение на зажимах обмоток остаётся постоянным и характеристики ДПТ с ПВ аналогичны характеристикам ДПТ с НВ. Поэтому часто ограничиваются рассмотрением ДПТ с независимым возбуждением.

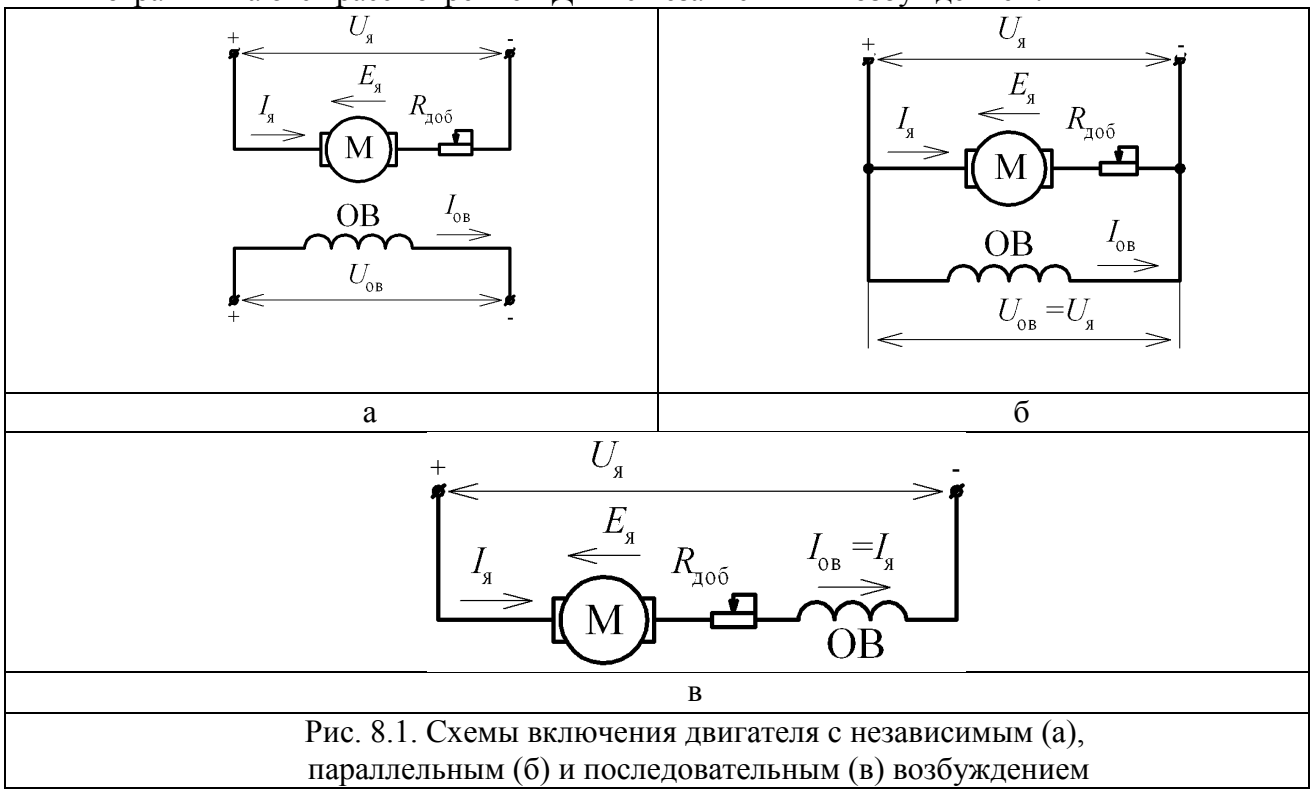


Рис. 8.1. Схемы включения двигателя с независимым (а), параллельным (б) и последовательным (в) возбуждением

3. У ДПТ с последовательным возбуждением имеется последовательная (сериесная) обмотка, которая включается последовательно с обмоткой якоря двигателя (рис. 8.1, в). Такое включение приводит к тому, что поток, создаваемый ОВ, зависит от тока двигателя, который в процессе работы и переходных процессов подвергается значительным изменениям. Данный тип двигателя обладает нелинейной механической характеристикой.

4. ДПТ со смешанным возбуждением. В этом случае двигатель имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную, и результирующий магнитный поток складывается из двух составляющих. Подключение цепи якоря выполняется так же, как на рис. 8.1, в, а обмотки возбуждения, как на рис. 8.1, а, б.

11. Механическая и электромеханическая характеристики ДПТ с НВ

Общее выражения для механической характеристики ДПТ с НВ

$$\omega = \frac{U_{я}}{k\Phi} - \frac{M\,R_{я\Sigma}}{(k\Phi)^2} + \frac{L_{я\Sigma}}{(k\Phi)^2}\frac{dM}{dt}.$$

Если момент двигателя постоянный, то $dM/dt = dI_{я}/dt = 0$, и уравнение механической характеристики двигателя будет иметь следующий вид:

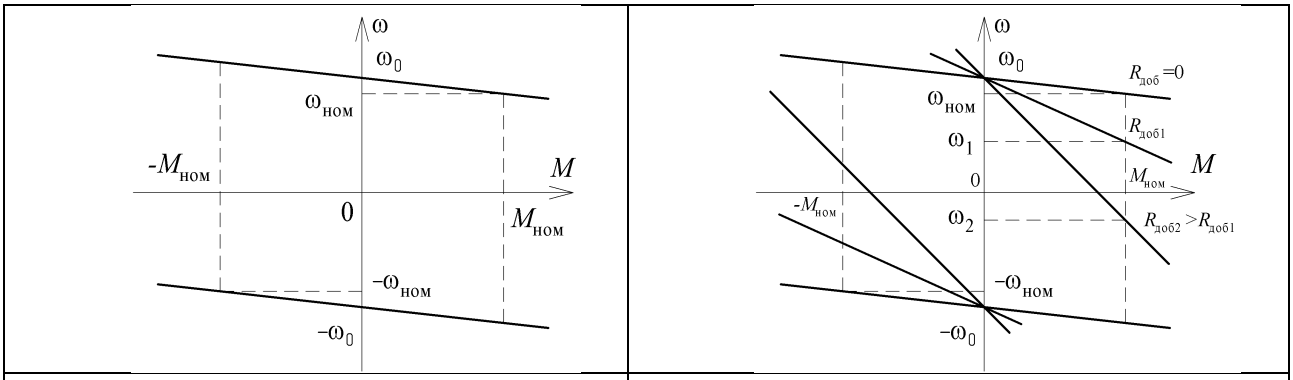
$$\omega = \frac{U_{я}}{k\Phi} - \frac{M\,R_{я\Sigma}}{(k\Phi)^2}.$$

Или в другом виде

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

где $\omega_0 = \frac{U_{я}}{k\Phi}$ – скорость идеального холостого хода.

Вид характеристики показан на рис. 9, а.



а б

Рис. 9. Естественные (а) и искусственные (б) механические характеристики ДПТ с НВ

Электромеханическую механическую характеристику можно получить, подставив в механическую характеристику двигателя выражение для момента $M = k\hat{O} I$:

$$\omega = \frac{U_{\ddot{y}} - I R_{\ddot{y}\Sigma}}{k\hat{O}}.$$

Каждой характеристики может быть охарактеризовано двумя точками: точкой идеального холостого хода ($I_{\ddot{y}} = M = 0$; $\omega = \omega_0$) и точкой короткого замыкания($I_{\ddot{y}} = I_{\hat{e}.\c.}$; $M = M_{\hat{e}.\c.}$; $\omega = 0$.)

12. Тормозные режимы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Тормозной режим характеризуется тем, что скорость вращения и момент двигателя имеют разные знаки. Быстрота и точность, с какой будут протекать переходные процессы остановки или реверса во многом определяют производительность механизма, а иногда и качество вырабатываемого продукта. Возможны три варианта электрического торможения:

1) рекуперативное торможение;
2) динамическое торможение;
3) торможение противовключением.

Рекуперативное торможение

Такой режим возникает, когда скорость двигателя больше скорость идеального холостого хода двигателя, то есть выполняется условие $\omega > \omega_0$. При этом ЭДС двигателя становится больше напряжения сети ($E_{\ddot{y}} > U_{\tilde{n}}$), и ток двигателя меняет направление. При этом двигатель работает генератором и отдает энергию в сеть. Электромагнитный момент двигателя при этом противодействует внешнему вращающему моменту.

Данный вид торможения является наиболее экономичным, так как энергия возвращается в сеть. Применение этого способа является эффективным энергосберегающим средством. Этот режим целесообразен, когда привод работает с частыми пусками и остановками. Например, электротранспорт. При движении под уклон также возникают благоприятные условия для возникновения этого режима торможения.

Схема включения двигателя для данного режима показана на рис. 10, а, а характеристики представлены на рис. 11 (характеристика 1).

Динамическое торможение

Необходимость в таком торможении возникает, когда после отключения двигателя от сети его якорь продолжает вращаться под действием запаса кинетической энергии. Если по технологии требуется более быстрый останов двигателя, чем время остановки на выбеге, используется динамическое торможение.

При данном способе торможения якорь двигателя замыкается на тормозное сопротивление, а обмотка возбуждения остаётся подключенной в сеть для создания тормозного момента. Вырабатываемая при этом энергия переходит в тепловую и рассеивается в окружающее пространство. В этом режиме ток двигателя меняет знак, так как он начинает протекать под действием ЭДС двигателя, которая направлена всегда встречно напряжению сети

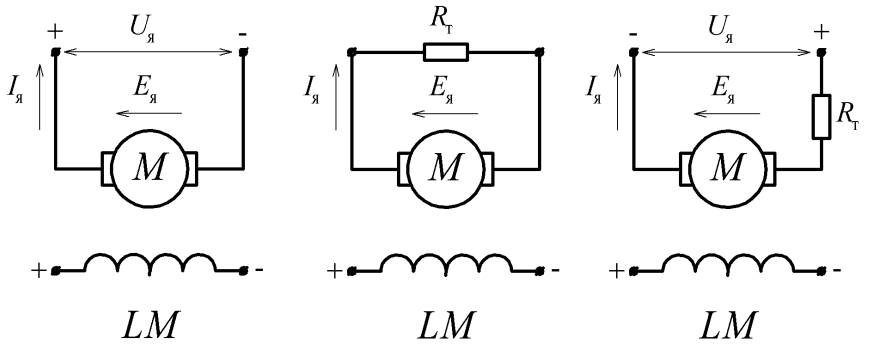
$$I_{\ddot{y}} = (U_{\ddot{y}} - E_{\ddot{y}}) / R_{\ddot{y}\Sigma} = -E_{\ddot{y}} /(R_{\ddot{y}} + R_{\ddot{a}.\grave{o}.}) .$$

Величину тормозного сопротивления можно определить из формулы

$$R_{д.т.} = \frac{\omega_{т.ф÷}}{(1{,}1 \div 1{,}8)\ M_{т}} - R_{я}.$$

При этом слишком малое значение тормозного момента ведет к затягивания процесса торможения, а слишком большой ток отрицательно сказывается на работе щеточно-коллекторного аппарата двигателя.

Схема включения двигателя для данного режима показана на рис. 10, б, а характеристики на рис. 11 (характеристика 2).



а	б	в

Рис. 10. Схемы включения двигателя в тормозных режимах работы (а-рекуперативное, б-динамическое, в-противовключение)

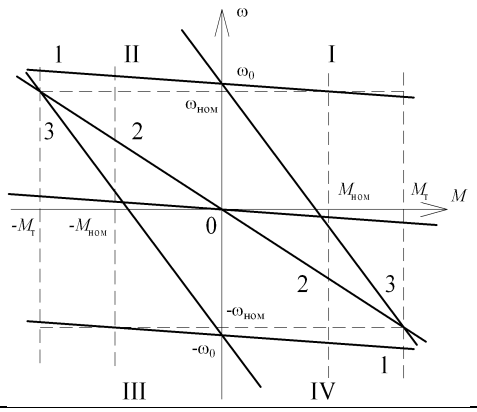


Рис. 11. Механические характеристики ДПТ с НВ в тормозных режимах

Торможение противовключением

Для уменьшения времени торможения или реверса иногда применяют данный режим. Реализация этого режима возможна на работающем двигателе при смене полярности питающего напряжения. В этом случае направления ЭДС двигателя и напряжения сети совпадает

$$I_{я} = (-U_{я} - E_{я}) / R_{яΣ},$$

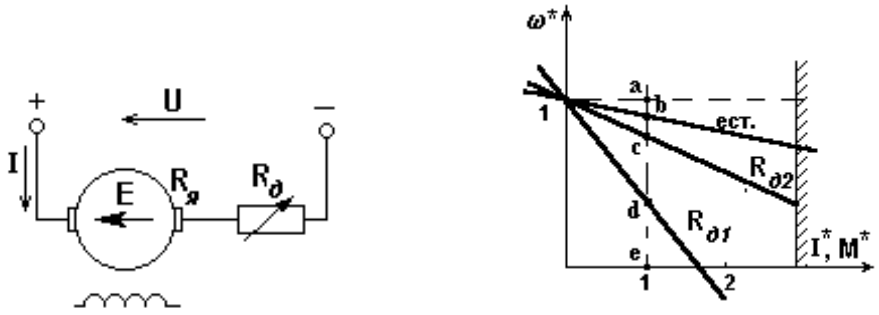
Величина тормозного сопротивления выбирается по формуле

$$R_{т.п.} = \frac{\omega_{т.ф÷} + \omega_0}{(1{,}1 \div 1{,}8)\ M_{т}} - R_{я}.$$

Торможение противовключением применяется в основном для реверса двигателя. Для точного останова двигателя данным режим не удобен, так как требуется довольно точная настройка аппаратуры для того, чтобы остановить двигатель в точке нулевой скорости. Если же двигатель не отключить от сети, то он перейдет в двигательный режим, и в дальнейшем разгонится до номинальной скорости при наличии номинального момента на валу двигателя. Для точной остановки двигателя используется режим динамического торможения.

13. Реостатное регулирование угловой скоростью двигателей постоянного тока

Реостатное регулирование - самый простой и самый неблагоприятный способ регулирования скорости и (или) момента. В якорную цепь последовательно, если питание осуществляется от источника напряжения (рис. 12,а), включаются дополнительные резисторы.



а) б)

Рис. 12. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя независимого возбуждения

Скорость идеального холостого хода при $U_н$ и $Ф_н$ и включении $R_д$ не изменится:

$$\omega_0 = \frac{U_н}{k Ф_н},$$

а наклон характеристик $\Delta\omega = \frac{IR}{k Ф_н} = \frac{M R}{(k Ф_н)^2}$ будет увеличиваться пропорционально

$R = R_я + R_д$.

$$\omega_e = \frac{U_н - I(R_я + R_в)}{k Ф}$$

В электроприводе с двигателем последовательного возбуждения при $U=U_н$ (рис. 13,а)

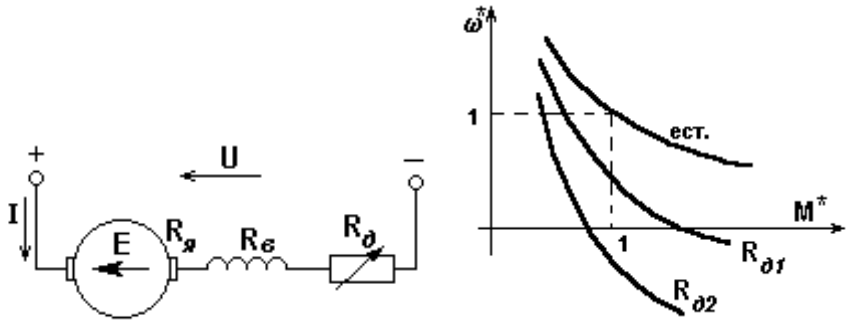


Рис. 13. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя последовательного возбуждения

14. Регулирование координат изменением магнитного потока.

Схема включения двигателя для регулирования скорости изменением магнитного потока приведены на рис. 14. Якорная цепь двигателя без каких-либо добавочных резисторов подключена к источнику с напряжением $U = U_н$, а цепь возбуждения питается от усилителя - возбудителя B.

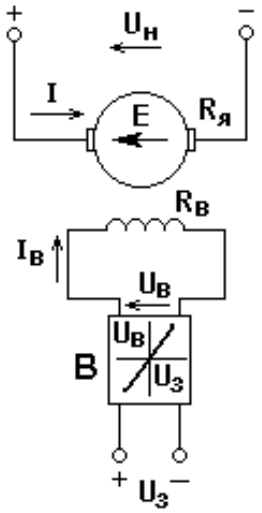
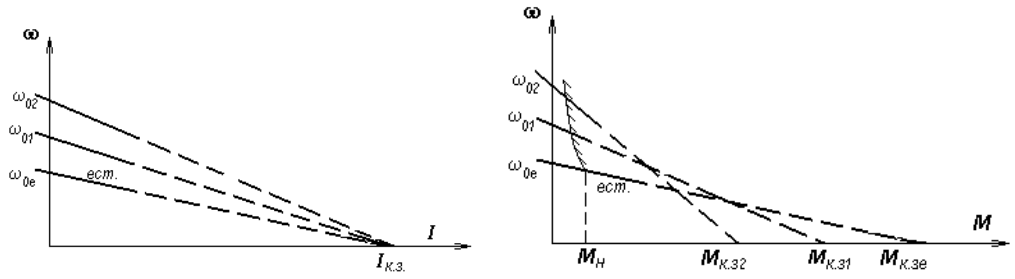


Рис. 14. Схема электропривода с регулированием скорости изменением магнитного потока

Электромеханические и механические характеристики двигателя при ослаблении поля показаны на рис. 15. Скорость идеального холостого хода $\omega_0 = \frac{U_н}{k\Phi}$ растет с уменьшением потока. Так как ток короткого замыкания не зависит от степени ослабления поля, все электромеханические характеристики пересекаются в одной точке $I_{к.з.} = \frac{U_н}{R_я}$ (следует помнить, что ток короткого замыкания для нормальных машин может во много раз превосходить допустимый). Момент короткого замыкания $M_{к.з} = k I_{к.з} \Phi$ уменьшается с уменьшением потока (рис. 15,б).



а) б)

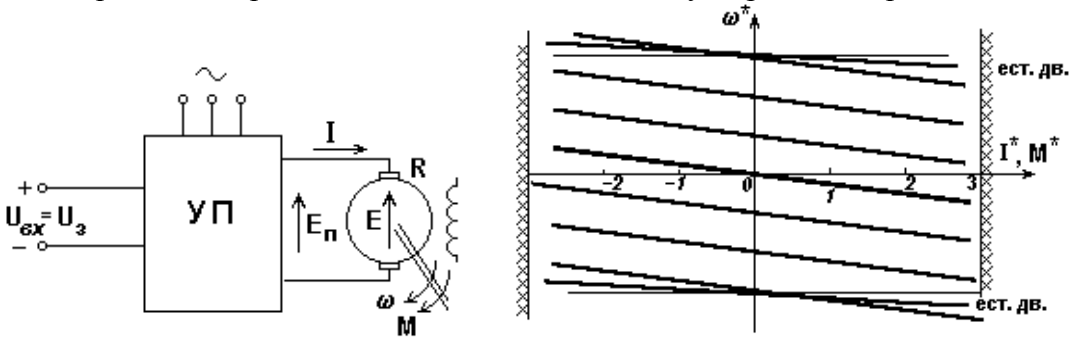
Рис. 15. Характеристики двигателя постоянного тока при ослаблении поля

При питании якорной цепи от источника тока изменение магнитного потока позволяет регулировать момент от $-M_н$ до $+M_н$ при вертикальных механических характеристиках.

15. Регулирование скорости изменением напряжения на якоре

Схема электропривода, обеспечивающая регулирование напряжения на якоре, показана на рис. 16,а. Этот способ регулирования предполагает использование силового управляемого преобразователя, установленная мощность которого превышает мощность двигателя.

При изменении U (в данном случае $E_п$) пропорционально изменяется лишь ω_0, а $\Delta\omega$ не зависит от U, т.е. семейство искусственных характеристик при $k\Phi = k\Phi_н = c$ - параллельные прямые с наклоном несколько большим чем у естественной характеристики двигателя, поскольку $R = R_я + R_п$ - рис. 16,б; предполагается, что УП имеет двустороннюю проводимость.



а) б)

Рис. 16. Схема (а) и характеристики (б) при регулировании скорости двигателя постоянного тока изменением напряжения

Уравнения характеристик:

$$\omega = \frac{K U_{вх}}{c} - \frac{I(R_я + R_п)}{c}$$

где $K = \frac{E_п}{U_{вх}}$ - коэффициент передачи УП.

Свойства УП оказывают влияние на вид характеристик. Так, при использовании преобразователей с односторонней проводимостью ($I>0$) характеристики располагаются лишь в I и IV квадрантах.

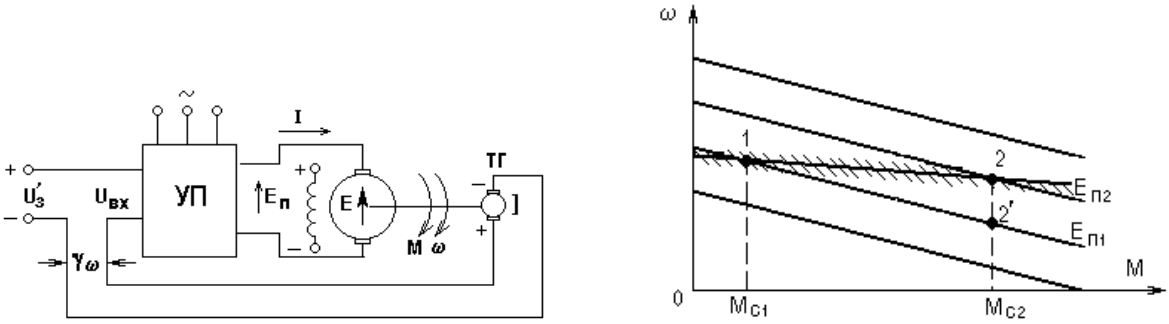
.

16. Система УП-Д, замкнутая по скорости

Наличие в электроприводе управляемого преобразователя, питающего якорную цепь или цепь возбуждения, имеющего один или несколько входов и достаточно высокий коэффициент

передачи, открывает широкие возможности формирования требуемых искусственных характеристик за счет *замыкания системы*, т.е. подачи на вход как *задающего сигнала*, так и сигнала обратной связи по координате, которая должна регулироваться.

Если жесткость характеристик в разомкнутой системе УП-Д оказывается недостаточной для какого-либо технологического процесса, она может быть повышена посредством замыкания системы по скорости, т.е. использования *отрицательной обратной связи* по скорости - рис. 17,а.



а) б)

Рис. 17. Схема (а) и характеристики (б) электропривода постоянного тока, замкнутого по скорости

К разомкнутой системе добавлен измерительный орган - тахогенератор ТГ, сигнал которого $E_{ТГ} = \gamma\omega$ сравнивается с задающим сигналом $U'_з$, а разность $U'_з - \gamma\omega$ подается на вход преобразователя (отрицательная обратная связь по скорости). Благодаря этому ЭДС преобразователя теперь определяется не только заданием, но и фактической скоростью вращения. Пусть привод работал в т. 1 (рис. 17,б) а затем момент сопротивления увеличился до значения $M_{с2}$. В разомкнутой схеме этому изменению соответствовала бы точка 2', так как изменение $M_с$ не приводило бы к изменению ЭДС преобразователя. В замкнутой системе уменьшение скорости повлечет за собой рост входного сигнала

$$U_{вх} = U'_з - \gamma\omega,$$

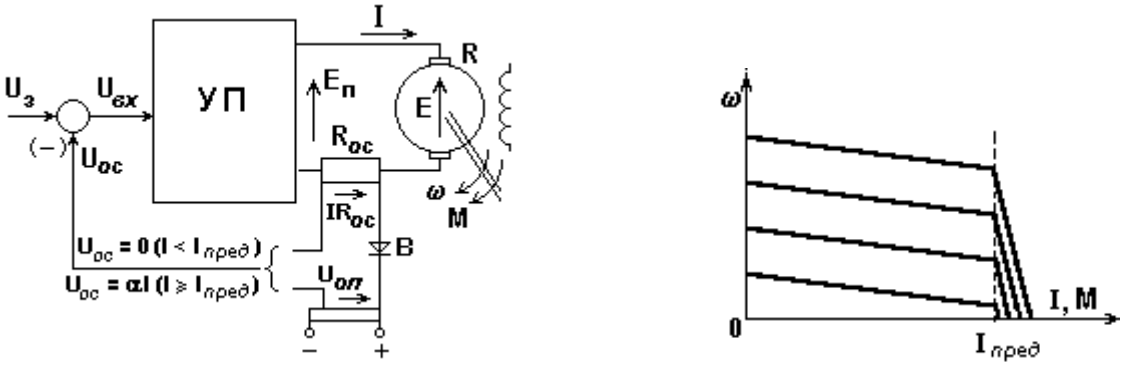
то есть $E_п$, следовательно, при $M_{с2}$ привод перейдет на характеристику, соответствующую $E_{п2} > E_{п1}$ и будет работать в точке 2. В рассматриваемой схеме $\omega_2 < \omega_1$, так как увеличение $U_{вх}$, а значит и $E_п$ возможно лишь за счет некоторого уменьшения ω. Такие системы называют статическими, в отличие от астатических, где $\Delta\omega = 0$.

Уравнение механической характеристики в замкнутой системе.

$$\omega = \frac{K U'_з}{c(1 + \frac{K\gamma}{c})} - \frac{M R_\Sigma}{c^2(1 + \frac{K\gamma}{c})}.$$

17. Система УП-Д с нелинейной обратной связью по моменту.

Пусть требуется ограничить момент, развиваемый двигателем, некоторой предельной величины $M_{пред}$. В системе УП-Д эту задачу можно решить, снижая ЭДС преобразователя при достижении моментом величины $M_{пред}$. Как уже было показано выше, эта операция выполняется автоматически, если использовать соответствующую обратную связь. В данном случае целесообразно использовать обратную связь по моменту или по току, который ему пропорционален ($\Phi = const$), причем эта связь должна вступать в действие лишь при достижении током некоторого заданного значения. Такие обратные связи называют нелинейными или связями с отсечкой. Простейшая схема системы УП-Д с отрицательной обратной связью по току с отсечкой показана на рис. 18,а.



а) б)

Рис. 18. Схема (а) и характеристики (б) электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по току с отсечкой

На вход управляемого преобразователя при $I < I_{пред}$ поступает лишь сигнал задания, поскольку сигнал обратной связи по току заперт вентилем В ($IR_{ос} < U_{оп}$). При достижении моментом величины $M_{пред}$ отрицательная обратная связь по току начинает действовать, т.е.

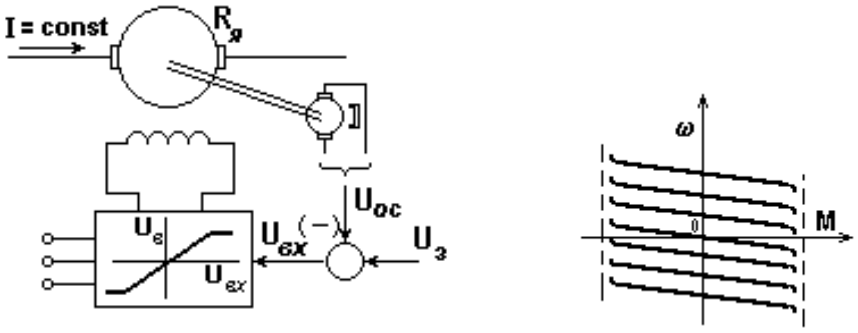
$$U_{вх} = U_з - \alpha I,$$

благодаря чему снижается $E_п$ и рост момента ограничивается. Изменением $U_з$ можно установить требуемую характеристику - рис. 18,б, а изменением $U_{оп}$ - задать нужный предельный момент.

18. Замкнутая система источник тока - двигатель

При питании якорной цепи от неуправляемого источника тока (I=*const*) электропривод, как отмечалось, обладает свойством управляемого по цепи возбуждения “источника момента”, т.е. имеет в разомкнутой структуре вертикальные механические характеристики. Это обстоятельство очень удобно для построения замкнутых структур: исключение действия ЭДС вращения позволяет просто формировать любые характеристики посредством использования соответствующих обратных связей. Покажем это на простых примерах. В схеме на рис. 19,а отрицательная обратная по скорости включена на возбудитель, имеющий характеристику с ограничением; напомним, что установленная мощность возбудителя много меньше мощности двигателя. В предположении, что характеристики $\Phi(U_в)$ и $U_в(U_{вх})$ на рабочих участках линейны, имеем:

$$M = KU_{вх},$$



а) б)

Рис. 19. Схема (а) и характеристики (б) системы источник тока – двигатель, замкнутой по скорости

$$U_{вх} = U_з - U_{ос} = U_з - \gamma\omega.$$

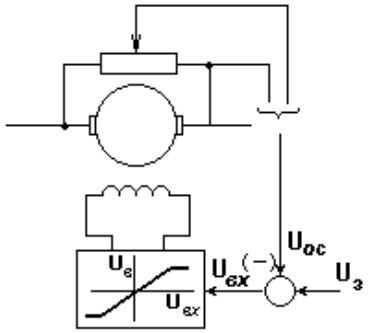
Решив уравнение относительно ω, получим:

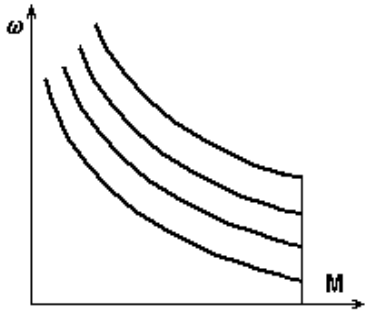
$$\omega = \frac{U_з}{\gamma} - \frac{M}{K\gamma},$$

т.е. будем иметь семейство параллельных характеристик (рис. 19,б), ограниченных посредством характеристики возбудителя заданной величиной момента.

Использовав *отрицательную обратную связь по напряжению* на якоре или в пренебрежении $R_я$ - по ЭДС вращения - рис. 20,а, получим

$$U_{вх} = U_з - \alpha E = U_з - \frac{\alpha M \omega}{I} = U_з - \alpha' M \omega,$$





а) б)

Рис. 20 Схема (а) и характеристики (б) системы источник тока – двигатель, замкнутой по напряжению на якоре

откуда, подставив в уравнение для момента, будем иметь:

$$\omega = \frac{U_з}{\alpha' M} - \frac{1}{K\alpha'}.$$

Таким образом, в этой структуре механические характеристики имеют вид гипербол - рис. 20,б, т.е. стабилизируется мощность, развиваемая двигателем.

Приведенные примеры иллюстрируют богатые возможности получения искусственных механических характеристик любой требуемой формы посредством использования соответствующих обратных связей.

Следует отметить, что в системе источник тока - двигатель замыкание системы позволяет распространить экономный способ регулирования изменением магнитного потока на всю область ω -M, т.е. сделать регулирование двухзонным, с широкими функциональными возможностями.

19. Система генератор-двигатель

Принципиальная схема системы Г-Д представлена на рис.21а. Она состоит из приводного двигателя Д (асинхронный или синхронный двигатель), который механически связан с генератором постоянного тока Г. Величина ЭДС генератора регулируется путем изменения напряжения на обмотке возбуждения генератора. Якоря генератора и двигателя электрически связаны друг с другом. Регулируемым параметром в данном случае выступает величина ЭДС двигателя. Для обеспечения магнитного потока в двигателе и генераторе используется возбудитель, который представляет собой ДПТ меньшей мощности $P_В = 0{,}05 \div 0{,}1\, P_Д$. В настоящее время в качестве возбудителей используются полупроводниковые преобразователи.

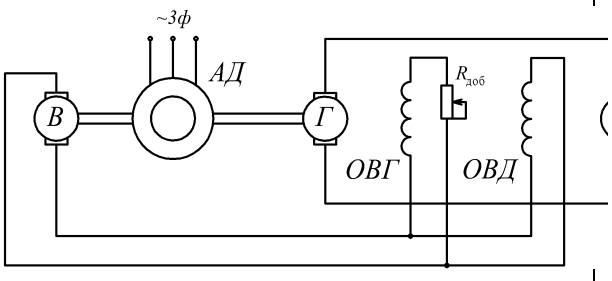


Рис. 21 а. Принципиальная схема системы Г-Д

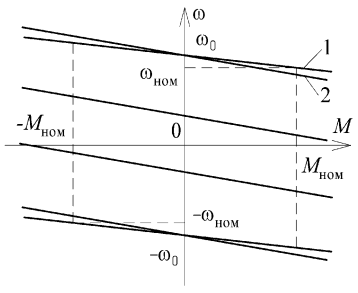


Рис. 21 б. Механические характеристики системы Г-Д

Из уравнения равновесия напряжений по второму закону Ома можно составить уравнение ЭДС $E_Г - E = I(R_Г + R_Я)$,

где $E_Г$ – ЭДС генератора, $R_Г$ – сопротивления якоря генератора.

Подставив в это уравнение значения ЭДС $E = k\Ф\omega$ и тока двигателя $I = M / k\Ф$, можно найти уравнение механической характеристики системы Г-Д:

$$\omega = \frac{E_Г}{k\Ф} - \frac{M(R_Г + R_Я)}{(k\Ф)^2}.$$

Вид механических характеристик представлен на рис. 21.6. Анализируя полученное уравнение МХ для системы ГД, можно заключить, что относительное падение напряжения в этой

системе в вдвое выше (прямая 2), чем у естественной характеристики двигателя (прямая 1). Обуславливается это наличием сопротивления генератора, которое примерно равно сопротивлению якоря двигателя, так как машины примерно одинаковой мощности.

Основным достоинством данного способа регулирования является высокая плавность регулирования скорости двигателя.

20. Система тиристорный преобразователь-двигатель

Развитие силовой электроники позволило создать и успешно развивать статические преобразователи, преобразующие переменное напряжение в регулируемое постоянное.

Изменение величины постоянного напряжения осуществляется регулированием угла открывания вентилей в проводящей части переменного напряжения. Выпрямленное напряжение содержит постоянную U_d и переменную составляющие. Наличие пульсаций выпрямленного напряжения ухудшает условия коммутации двигателей и увеличивает потери в них, поэтому на выходе выпрямителя часто устанавливают фильтр, представляющий собой реактор, включаемый последовательно с цепью якоря и обладающий таким реактивным сопротивлением, которое позволяет обеспечить допустимый уровень пульсаций тока в якоре двигателя. Другим средством уменьшения пульсаций является использование схем повышенной пульсности, что позволяет значительно уменьшить пульсации тока выпрямленного напряжения и тока, однако требует больших затрат на оборудование. Схема реверсивного ТП представлена на рис. 5.7.

Уравнение электромеханической характеристики для системы ТП-Д имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{U_{d0}\cos\alpha - IR_{э}}{k\Ф},$$

где $U_{d0} = \frac{m}{\pi}\sqrt{2}U\sin\frac{\pi}{m}$ – среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе выпрямителя и полностью открытых тиристорах ($\alpha = 0$); U – действующее значений переменного напряжения; m – число фаз выпрямителя; $R_{э} = X_{т}m/2\pi + R_{т} + R_L + R_{я}$ - эквивалентное сопротивление якорной цепи; $R_{т}$, $X_{т}$ – активное и реактивное сопротивления трансформатора; R_L - активное сопротивление сглаживающего реактора.

Механическую характеристику системы ТП-Д можно получить из электромеханической, выразив значение тока через момент двигателя,

$$\omega = \frac{U_{d0}\cos\alpha}{k\Ф} - \frac{MR_{э}}{(k\Ф)^2}.$$

Вид МХ представлен на рис. 22б. Характеристики имеют меньшую жесткость по сравнению с естественной МХ за счет дополнительных сопротивлений в якорной цепи. При различных углах включения наклон характеристик остаётся неизменным.

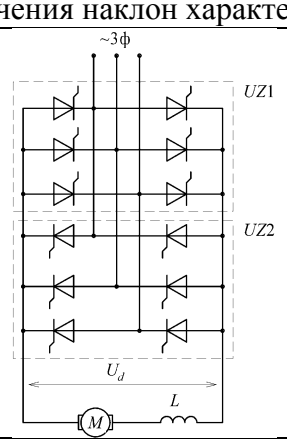


Рис. 22а. Схема реверсивного ЭП системы ТП-Д

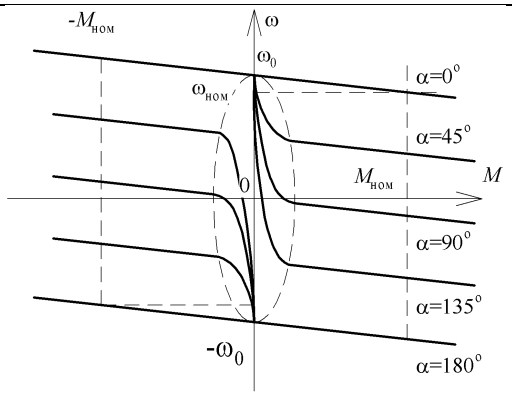


Рис. 22 б. Механические характеристики системы ТП-Д

21. Асинхронный электродвигатели. Принцип работы

Трехфазные асинхронные двигатели составляют основу современного электропривода. От ДПТ их отличает простота конструкции, надежность, высокие технико-экономические показатели.

В настоящее время частотные преобразователи позволили сделать регулировочные свойства АД более лучшими, чем у ДПТ с НВ.

По конструкции ротора АД разделяются на двигатели и короткозамкнутым ротором (КЗР) и двигатели с фазным ротором (ФР). Наиболее простая конструкция у АД с КЗР. Ротор такого двигателя не имеет выводов, так как его обмотка выполнена в виде короткозамкнутой клетки (беличья клетка). Его обмотка выполнена в виде ряда медных или алюминиевых стержней, расположенных по периметру сердечника ротора, замкнутые в двух сторон короткозамыкающими кольцами. Простота конструкции обеспечивает им высокую надежность, простоту обслуживания и невысокую стоимость. Схема включения АД СС КЗР представлена на рис. 23, а.

Фазный ротор имеет трехфазную обмотку, выполненную по типу обмотки статора (рис. 23, б). Одни концы катушек соединены в нулевую точку («звезда»), а другие – подключены к контактным кольцам. На кольца наложены щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой ротора. При такой конструкции возможно подсоединение к обмотке ротора пускового или регулировочного реостата, позволяющего менять электрическое сопротивление в цепи ротора. Такие двигатели более сложны в изготовлении и эксплуатации, поэтому применяются только там, где применение АД с КЗР не обеспечит требованиям в приводу механизма.

Ротор АД отстаёт от вращающегося магнитного поля статора, которое создается обмоткой статора, то есть вращение происходит асинхронно. В этих условиях вращающееся поле статора индуцирует ЭДС в обмотке роторе, под действием которого в роторе протекает ток, который взаимодействует с вращающимся магнитным полем (ВМП), создавая вращающий момент двигателя. В рабочих режимах разница частот вращения статора и ротора не велика и составляет несколько процентов. При рассмотрение рабочих процессов АД обычно используют понятие скольжения s

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Скорость асинхронного двигателя в рабочих режимах

$$\omega = \omega_0 (1 - s),$$

где синхронная частота вращения магнитного поля $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$; f_1 – частота питающего напряжения U_1; p – число пар полюсов.

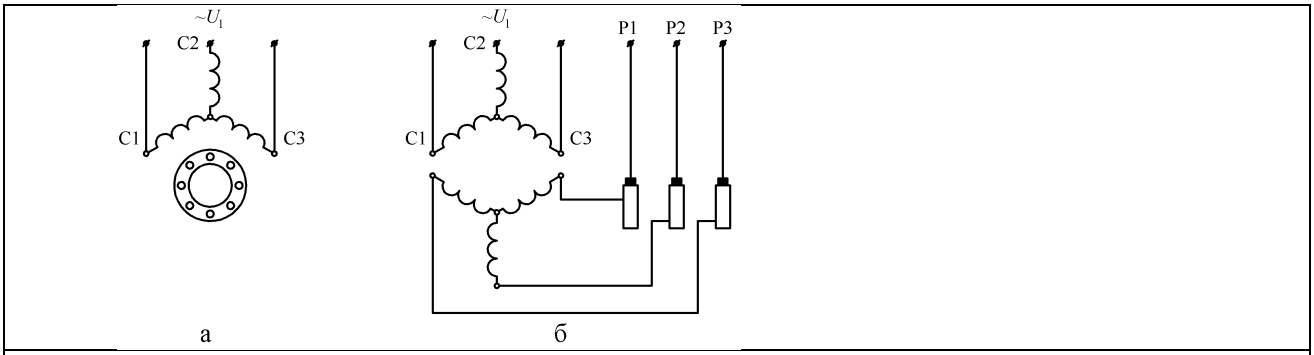


Рис. 23. Схема включения асинхронных двигателей с КЗР (а) и ФР (б)

22. Механические характеристики асинхронного двигателя

Для вывода уравнения механической характеристики АД можно воспользоваться упрощенной схемой замещения двигателя, приведенной на рис. 4.5. На схеме приняты следующие обозначения: U_1 - первичное фазное напряжение; I_1 - фазный ток статора; $I_2^{'}$-приведенный ток ротора; X_1 и X_2 - первичное и вторичное приведенное реактивные сопротивления рассеяния; R_0 и X_0 - активное и реактивное сопротивление контура намагничивания.

Уравнение механической характеристики

$$M = \frac{2 M_к (1 + a s_к)}{s / s_к + s_к / s + 2 a s_к},$$

где $a = R_1 / R_{2\Sigma}^{'}$.

Вид механической характеристики показан на рис. 24.

При $s \ll s_{\hat{e}}$ механическая характеристика близка к линейной зависимости $M \approx 2M_{\hat{e}} s / s_{\hat{e}}$, а в области больших скольжений ($s \gg s_{\hat{e}}$) имеет гиперболический характер: $M \approx 2M_{\hat{e}} s_{\hat{e}} / s$. При $s = s_{\hat{e}}$ момент принимает максимальное значение, причем в двигательном режиме соответствующее значение критического момента меньше, чем в генераторном.

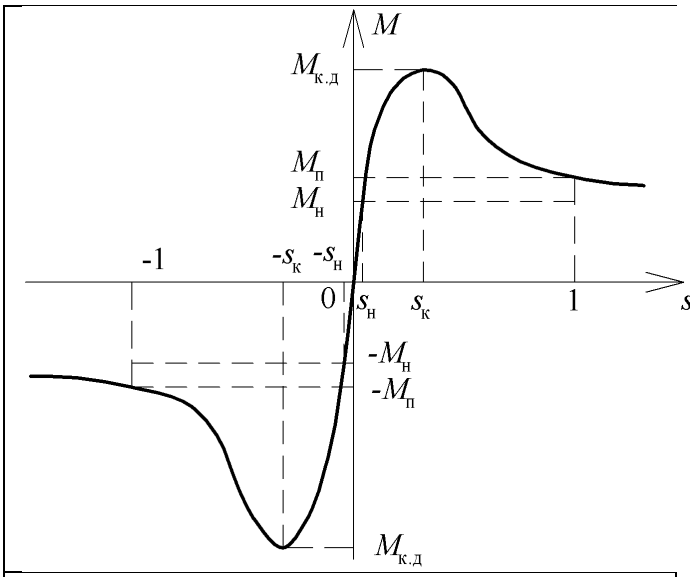


Рис. 24. Механическая характеристика АД

Характерные точки МХ АД:

1) $s = 0; M = 0$, при этом скорость двигателя равна синхронной скорости;

2) $s = s_{\text{í}}$; $M = M_{\text{í}}$, что соответствует номинальному режиму работы двигателя;

3) $s = s_{\hat{e}}$; $M = M_{\hat{e}.\ddot{a}}$ - экстремум механической характеристики в двигательном режиме;

4) $s = 1; M = M_{\ddot{i}}$ - пуск. В этот момент времени двигатель развивает пусковой момент;

5) $s = -s_{\hat{e}}$; $M = -M_{\hat{e}.\tilde{a}}$ – экстремум механической характеристики в генераторном режиме.

При $s > 1$ двигатель работает в режиме торможения противовключением, при $s < 0$ имеет место генераторный режим работы параллельно с сетью.

23. Влияние параметров на вид механической характеристики асинхронного двигателя.

Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя

$\omega = 2\pi f_1 (1 - s) / p$

следует, что при постоянном статическом нагрузочном моменте M_c на валу двигателя частота вращения ротора зависит от частоты питающей сети f_1, числа пар полюсов p и величины скольжения s. Кроме того в номинальных режимах работы величина ЭДС двигателя слабо отличается от величины питающего напряжения, поэтому

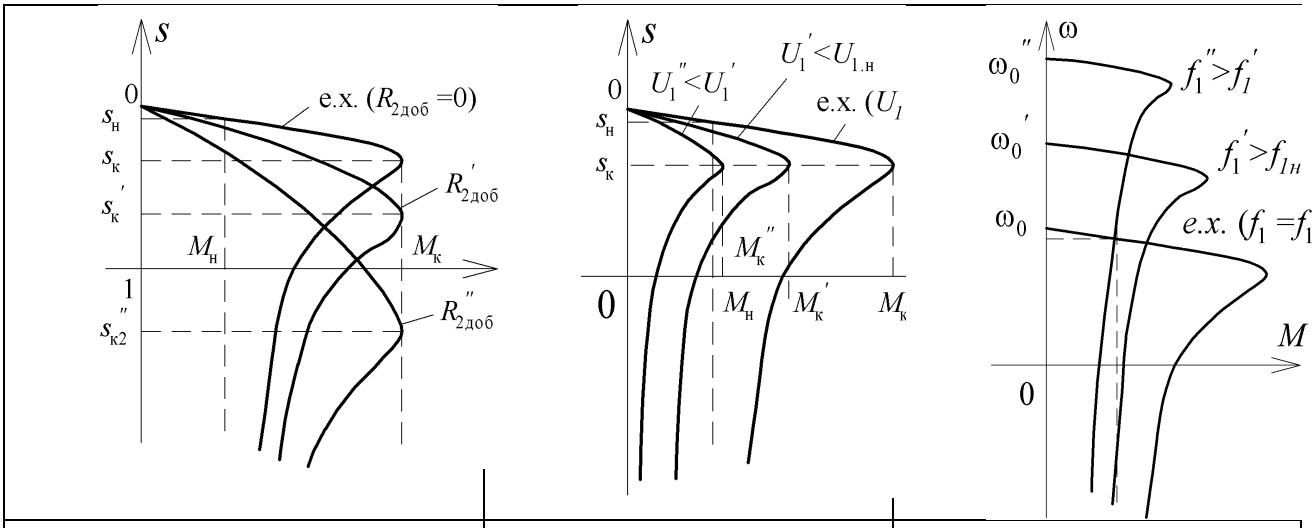
$U_1 \cong E_1 = 4.44\ f_1 w_1 \hat{O}_0$.

Изменение сопротивления ротора

Данный способ регулирования скорости возможен только для двигателей с фазным ротором, где имеется возможность изменения величины добавочного сопротивления ротора $R'_{2\ \ddot{a}\tilde{a}}$. При этом, как следует из выражений для критических момента и скольжения, при вариациях данного параметра будет изменяться величина скольжения, а величина критического момента остаётся неизменной. Данный способ регулирования скорости называют *реостатным*. Вид искусственных характеристик показан на рис. 25, а.

Величина критического момента при изменении сопротивления ротора остаётся неизменной, а величина критического скольжения изменяется.

При данном способе регулирования увеличивается значение пускового момента, двигатель не перегревается, однако суммарные потери возрастают, что снижает общий КПД.



а	б	в

Рис. 25. Искусственные МХ АД при $R_{2\Sigma}^{'} = var$ (а), $U_1 = var$ (б), $f_1 = var$ (в)

Изменение напряжения на статоре

При данном способе изменяется величина первой гармоники напряжения статора двигателя $U_1 = var$. При этом, величина критического скольжения не изменяется, то есть $s_{\hat{e}} = const$ (рис. 25 б). Изменяется величина критического момента, причем существенным является тот факт, что величина момента изменяется пропорционально квадрату напряжения статора. Регулирование, при котором изменяется величина U_1 называют *фазовым*. Изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения, так как при увеличении напряжения при постоянстве частоты f_1 будет возрастать величина магнитного потока. Это в свою очередь приведет к существенному росту тока намагничивания, который может достигать и превосходить номинальное значение тока двигателя вследствие явления насыщения машины.

Изменение частоты питающей сети.

Согласно формуле, для синхронной частоты $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$, при изменении частоты питающего напряжения на статоре $f_1 = var$ будет изменяться частота вращения вращающегося магнитного поля ω_0 . При уменьшении частоты при $U_1 = const$ происходит возрастание магнитного потока, что приводит к насыщению машины и большому возрастания тока намагничивания I_0 . Поэтому изменение частоты возможно только выше номинальной. При увеличении f_1 происходит возрастание величин индуктивных сопротивлений $X_{\hat{e}} = (L_1 + L_2^{'})\omega_{\acute{y}\ddot{e}} = (L_1 + L_2^{'})2\pi f_1$, что в свою очередь ведет к уменьшению критических скольжения и момента (рис. 4.7, в).

Перепишем формулу для ЭДС двигателя, оставив в левой части магнитный поток

$$\hat{O}_0 = \frac{U_1}{4.44\, w_1 f_1}.$$

Так как число витков обмотки w_1 постоянно, становится очевидным, что для обеспечения постоянного значения магнитного потока $\hat{O}_0$ необходимо поддерживать постоянным отношение U_1 / f_1, то есть необходимо обеспечить выполнение закона $U_1 / f_1 = const$.

24. Тормозные режимы асинхронного двигателя.

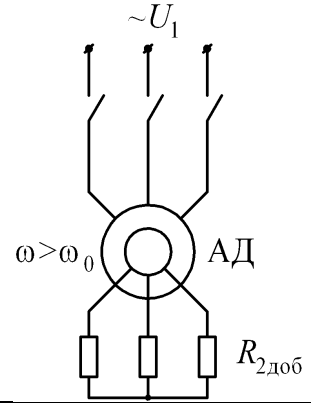
Режим рекуперативного торможения

Данный режим возникает при превышении частоты вращения ротора относительно синхронной частоты вращения магнитного поля статора ($\omega > \omega_0$). В этих условиях электромагнитный момент двигателя становится отрицательным, а вырабатываемая энергия отдаётся в сеть. Практически этот режим можно получить уменьшив синхронную частоту вращения в работающем двигателе. Из формулы для частоты вращения ВМП ($\omega_0 = 2\pi f_1 / p$) видно, что сделать это можно двумя способами: либо изменением числа пар полюсов в обмотке

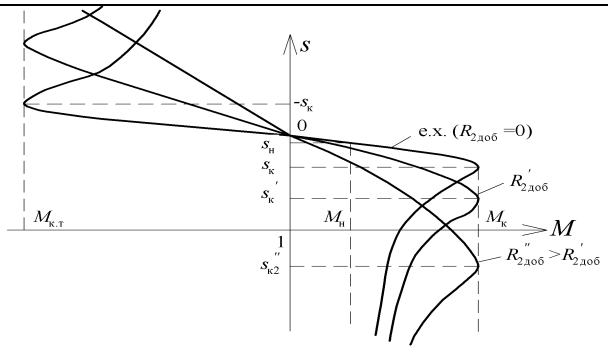
статора в сторону увеличения p, либо уменьшением частоты питающего напряжение f_1. Этот режим применяют для уменьшения частоты вращения перед полной остановкой двигателя в лифтах, либо в тех случаях, когда двигатель работает на активный момент (например, в подъемно-транспортных машинах). Схема включения и механические характеристики двигателя в режиме рекуперативного торможения представлены на рис. 26, а, б соответственно.

Режим торможения противовключением

Режим получается, когда активный статический момент больше, чем пусковой либо при изменении чередования фаз на обратное, при этом частота вращения магнитного поля изменяет направление вращения на притивоположное. Данный режим позволяет получать большие моменты, благодаря чему время торможения существенно уменьшается. Если при переключении чередования фаз двигатель включить при скорости близкой к нулю, то двигатель перейдет в двигательный режим работы другого направления вращения. При таком способе торможения в двигателе возникают большие токи, поэтому данный режим применяется для двигателей с ФР и введением дополнительного сопротивления в цепь ротора для ограничения максимального тока двигателя.

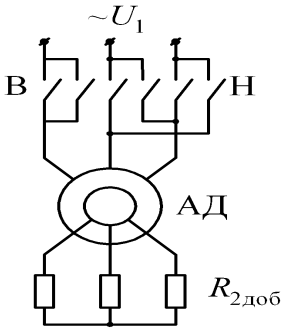


а

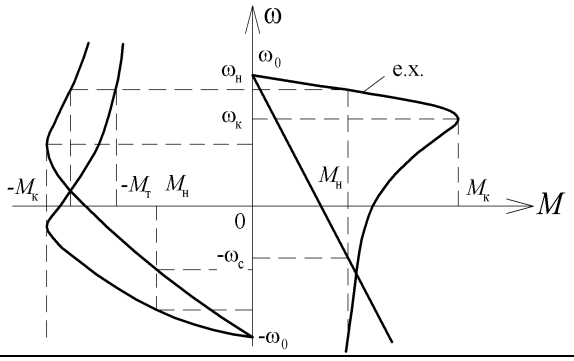


б

Рис. 26. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при рекуперативном торможении



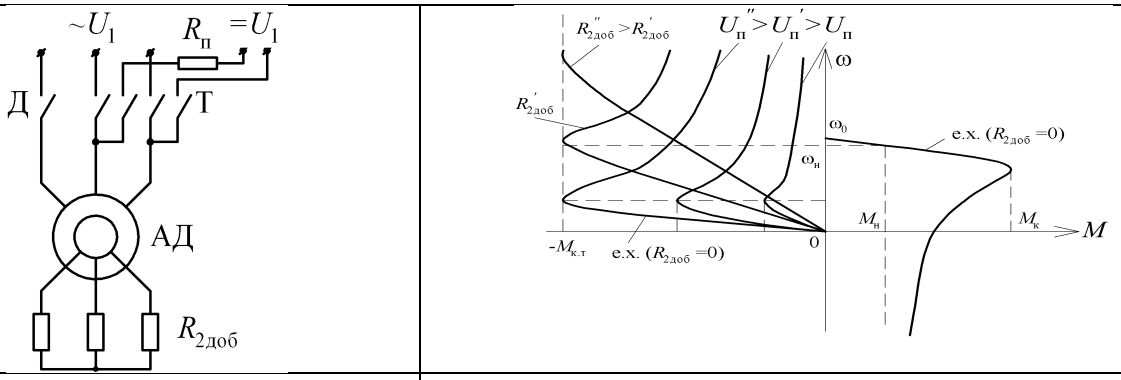
а



б

Рис. 27. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при торможении противовключением

В асинхронном двигателе с ФР момент и ток двигателя можно регулировать введением в цепь ротора дополнительного сопротивления. При этом изменяется жесткость механических характеристик в режиме торможения. При торможении вся энергия выделяется на сопротивлении ротора и дополнительном сопротивлении, поэтому этот режим является неэкономичным.



а б

Рис. 28. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при динамическом торможении

Динамическое торможение

Этот вид торможения наступает в трехфазном АД при отключении его от сети переменного тока и подключении его к источнику постоянного тока. При этом постоянный ток создаст неподвижное магнитное поле статора. В этих условиях в роторе, вращающемся по инерцией, наводится ЭДС, возникает ток в обмотке ротора, взаимодействие которого с магнитным полем приводит к созданию тормозного момента на валу двигателя. В процессе динамического торможения механическая энергия вращающихся масс электропривода преобразуется в электрическую энергию, которая расходуется на нагрев обмотки ротора и дополнительных резисторов, включенных в цепь ротора. При скорости близкой к нулю, ЭДС становится равной нулю, ток прекращается, и тормозной момент пропадает.

Данный режим применяют для точной остановки двигателя. Постоянный ток преодолевает лишь активное сопротивление обмотки статора, поэтому напряжение постоянного тока, подводимое к обмотке статора при динамическом торможении, должно быть ниже напряжения переменного тока, соответствующего работе двигателя, так, чтобы ток в обмотке статора не превышал номинального значения. Схема включения и механические характеристики динамического торможения показаны на рис. 28 а, б.

25. *Реостатное регулирование* скорости асинхронного двигателя

Схема включения АД при этом способе регулирования представлена на рис. 29. Реостатные характеристики получаются путем введения в цепь ротора добавочного сопротивления. При этом с ростом сопротивления падает жесткость МХ.

Допустимый диапазон регулирования скорости при данном способе

$$D = (1 - s_{\text{ìí}})(\Delta\omega^{*}_{\text{ä}}/\Delta M^{*}_{\text{c}} + 1) .$$

Так как $s_{\text{ìí}} << 1$, то приближенно

$$D = \Delta\omega^{*}_{\text{ä}}/\Delta M^{*}_{\text{c}} + 1 ,$$

где $\Delta\omega^{*}_{\text{ä}}$ – относительная величина изменения скорости; ΔM^{*}_{c} – относительная величина изменения момента.

Из полученной формулы видно, что при равных относительных отклонениях угловой скорости и момента нагрузки диапазон регулирования $D = 2:1$. При более низком допустимом отклонении угловой скорости диапазон оказывается ещё меньше.

Потери мощности при реостатном регулировании складываются из переменных потерь, включающих потери в меди статора и ротора и во внешних резисторах роторной цепи, и постоянных – не зависящих от нагрузки. Суммарные постоянные потери в двигателе остаются примерно одинаковыми независимо от нагрузки и скорости двигателя.

Электромагнитная и механическая мощности для АД

$$P_{12} = P_{\text{ýì}} = M\omega_{\text{ñèíõð}} \; ; \; P_{\text{ìåõ}} = M\omega ,$$

отсюда можно определить потери в роторе

$$\Delta P_2 = P_{12} - P_{\text{ìåõ}} = M(\omega_{\text{c}} - \omega)\left|\frac{\omega_{\text{c}}}{\omega_{\text{c}}} = M\omega_{\text{c}}s .\right.$$

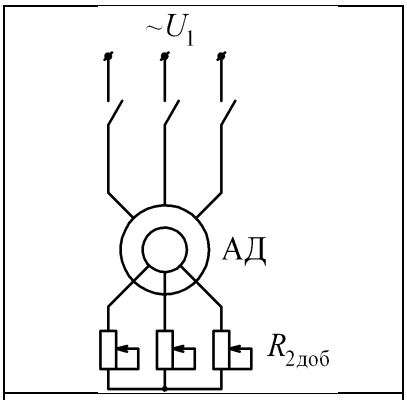


Рис. 29. Схема включения двигателя при реостатном способе регулирования

Видно, что потери пропорциональны величине скольжения и распределяются пропорционально отношению сопротивлений ротора двигателя и добавочного сопротивления в цепи ротора, поэтому двигатель при реостатном регулировании может развивать момент, равный номинальному.

Недостатками реостатного регулирования скорости являются ступенчатое регулирование скорости и использование дополнительной аппаратуры, невысокое быстродействие и большие потери энергии при регулировании.

26. Регулирование угловой скорости АД изменением напряжения на статоре

При изменении величины первой гармоники изменяется величина критического момента при постоянстве критического скольжения (рис. 2.28). Такое изменение достигается использованием тиристорного преобразователя напряжения (ТПН).

Максимальный момент при уменьшении напряжения снижается пропорционально квадрату напряжения:

$$M_{\text{ê.è}} = M_{\hat{e}} \left(\frac{U_{\text{è}}}{U_{\text{ì}}} \right)^2 ,$$

где $M_{\text{ê.è}}$ – критический момент при сниженном напряжении; $U_{\text{è}}$ – пониженное напряжение.

Из рис. 30 видно, что пределы регулирования скорости весьма ограничены, даже при вентиляторной нагрузке.

Для расширения диапазона используют замкнутые по скорости САР, структурная схема которой представлена на рис. 30. В состав такой САР сходит датчик скорости (BR) и регулятор скорости, на который поступает разность между заданным ω^* и текущим ω значением скоростей. На выходе регулятора скорости вырабатывается сигнал, подающийся на вход системы импульсно-фазного управления, которая вырабатывает управляющие импульсы для ТПН. Особенность такого регулирования заключается в том, что все характеристики сходятся в точке синхронной скорости ω_0, поэтому, чем меньше скорость, тем выше скольжение и больше потери в двигателе. Механические характеристики двигателя при фазовом управлении в замкнутой САР скорости представлены на рис. 31.

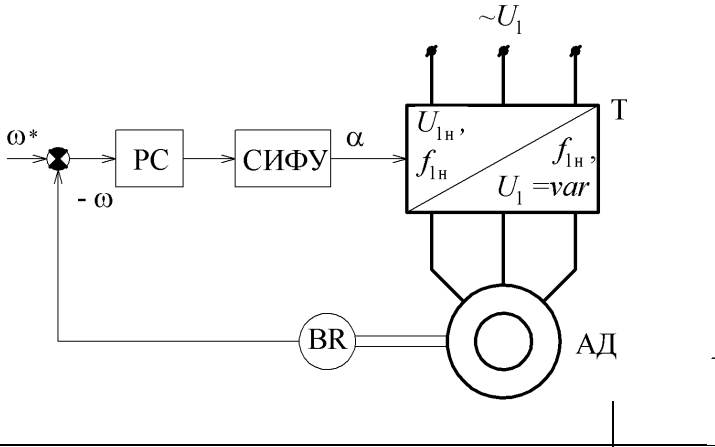


Рис. 30. Структурная схема замкнутой САР скорости АД при фазовом управлении

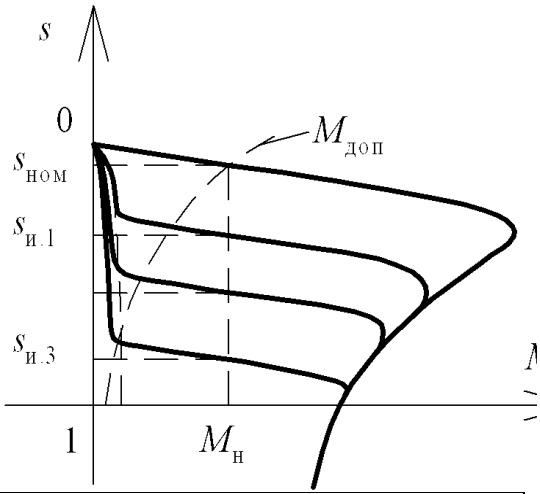


Рис. 31. Механические характеристики САР скорости АД при фазовом управлении

Двигатель при таком способе регулирования может работать продолжительное время при условии

$$\Delta P_2 \le \Delta P_{2\text{ì}} \quad .$$

Допустимый момент можно найти, приравнивая допустимые потери к номинальным

$$M_{\text{äîï}}\ \omega_0 s = M_{\text{íîì}}\ \omega_0 s_{\text{íîì}}\ ,$$

откуда

$$M_{\text{äîï}}\ \le M_{\text{íîì}}\ \frac{s_{\text{íîì}}}{s}.$$

Кривая допустимого момента по нагреву представлена на рис.5.11.

Данный способ регулирования нельзя применять для механизмов, работающих в продолжительном режиме работе с постоянной нагрузкой. Эффективным оказывается использование фазового регулирования для механизмов, у которых статический момент зависит от скорости двигателя $M_{\text{ñ}} = f(\omega)$, например, для приводов вентиляторов, насосов, компрессоров. Этот способ также применим, когда двигатель работает на пониженных скоростях малое время относительно всего цикла работы, например, лифты. В этом случае завышение установленной мощности двигателя невелико.

Достоинством фазового управления является более низкая стоимость преобразователя (ТПН) в сравнении с преобразователем частоты (ПЧ) равной мощности, что позволяет для указанных механизмов обеспечить приемлемое качество технологического процесса без дополнительных затрат.

27. Изменение числа пар полюсов асинхронного двигателя

Из выражения для угловой скорости АД:

$$\omega = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s)\ ,$$

видно, что регулирование скорости можно осуществлять изменением числа пар полюсов *p* обмотки статора двигателя. Так как данная величина может быть только целым числом, регулирование скорости оказывается ступенчатым.

Для данного вида регулирования изготавливаются многоскоростные АД с КЗР. В пазах сердечника статора размещают либо две независимые обмотки, либо одну полюснопереключаемую.

Различают две основные схемы переключения. Схема «звезда/двойная звезда» (рис. 32, I-II) обеспечивает регулирование с постоянством момента. Такую схему целесообразно применять в электроприводе с постоянно действующим моментом нагрузки при изменении частоты вращения. Схема «звезда/звезда» (рис.32, I-III) также даёт двукратное изменение числа пар полюсов, однако регулирование происходит при постоянстве мощности, то есть при переключении на повышенную скорость момент уменьшается в два раза. Такие схемы разумно применять в приводах, где момент сопротивления обратно пропорционален частоте вращения. Механические характеристики АД при регулировании скорости изменением числа пар плюсов представлены на рис. 33.

Многоскоростные АД широко применялись в электроприводах, допускающих ступенчатое регулирование частоты вращения (привода лифтов, вентиляторов, станков). Достоинством такого способа является сохранение высоких экономических показателей при переходе с одной частоты вращения на другую, так как на всех ступенях переключения обмотки статора КПД и коэффициент мощности двигателя остаются практически неизменными

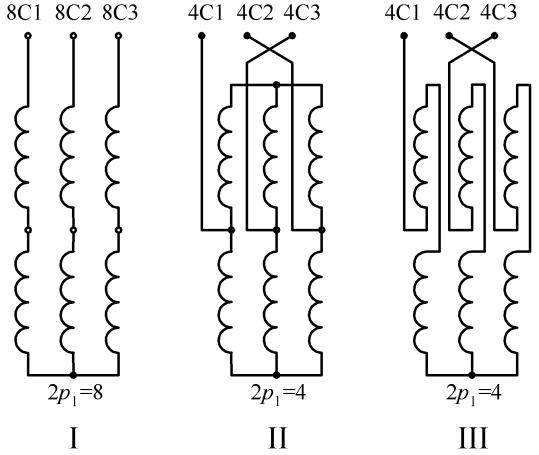


Рис. 32. Схемы соединения катушечных групп обмоток статора

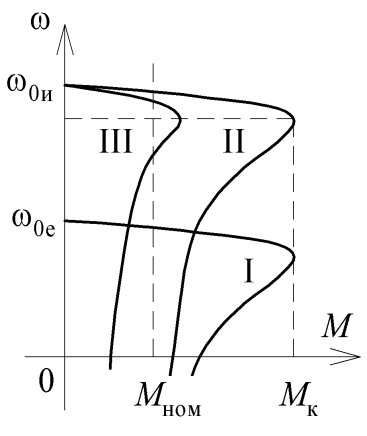


Рис. 33. Механические характеристики АД при переключении числа пар полюсов

28. Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя

Существуют системы скалярного, векторного управления и системы прямого управления моментом. Выбор способа и принципа управления определяется совокупностью статических, динамических и энергетических требований к асинхронному электроприводу.

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода основан на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитного потока, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Этот принцип является наиболее распространённым в связи с тем, что ему свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных АД, а так же возможность построения разомкнутых систем управления скоростью. Основной недостаток заключается в трудности реализации желаемых законов регулирования скорости и момента АД в динамических режимах.

Принцип векторного управления связан как с изменением частоты и текущих значений переменных АД, так и с взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат. Благодаря контролю положения углов переменных такой способ обеспечивает полное управление АД как в статических, так и в динамических режимах, что даёт заметное улучшение качества переходных процессов по сравнению со скалярным управлением.

Системы прямого управления моментом являются продолжением и развитием систем векторного управления. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента двигателя на управляющее воздействие. В отличие от векторного управления, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора.

Преобразователи частоты, предназначенные для частотно-регулируемых АД, подразделяются по типу связи с питающей сетью на непосредственные ПЧ (НПЧ) и двухзвенные ПЧ (ДПЧ) с промежуточным звеном постоянного или переменного тока.

Момент АД пропорционален магнитному потоку Ô и активной составляющей вторичного тока $I_2^{'}$:

$$M = k\hat{O} I_2^{'} \cos \varphi_2,$$

где k – конструктивная постоянная АД; φ_2 – угол сдвига между ЭДС и током ротора;

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2^{'}}{\sqrt{\left(R_2^{'}\right)^2 + \left(X_2^{'}\right)^2 s^2}}.$$

Из формулы для момента видно, что уменьшение магнитного потока, являющееся следствием увеличения частоты f_1, приведет к возрастанию $I_2^{'}$, а следовательно и потерь в роторе ΔP_2 и одновременному уменьшению допустимого момента двигателя по условиям охлаждения двигателя. Уменьшение частоты при постоянстве амплитуды напряжения U_1, также не допустимо по условиям насыщения магнитной системы машины. поэтому регулирование скорости двигателя изменением частоты питающего напряжения при условии постоянства момента двигателя приемлемо только при одновременном изменении амплитуды питающего напряжения, то есть выполнении закона $U_1 / f_1 = const$, что обеспечивает практически постоянный магнитный поток в двигателе.

Для реализации указанного закона управления между сетью и двигателем включается преобразователь частоты (ПЧ), обеспечивающий одновременное изменение частоты и амплитуды напряжения на двигателе. При пониженных скоростях у самовентилируемых двигателей уменьшается отвод тепла в окружающую среду, поэтому в таких случаях необходимо снижать допустимый момент на двигателе.

При частотном регулировании по причинам, обусловленными механической прочностью подшипников и элементами ротора, поднимать частоту выше $(1{,}5 \div 2{,}0)\, f_{1\hat{i}}$. Поэтому основной способ регулирования скорости заключается в уменьшении частоты напряжения.

Для построения примерного вида механических характеристик примем, что $R_1 \cong 0$, тогда уравнение для критического момента можно переписать следующим образом:

$$M_{\hat{e}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_{\hat{e}}} = \frac{3U_1^2}{2\frac{2\pi f_1}{p} f_1 2\pi (L_1 + L_2')} = \frac{3U_1^2}{\frac{8\pi^2 f_1^2}{p}(L_1 + L_2')} = K_A \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 .$$

Из формулы видно, что критический момент при выполнении закона $U_1 / f_1 = const$ остаётся постоянным. Условие пренебрежения активного сопротивления статора корректно при высоких скоростях двигателя, когда $U_1 \cong E_1$. При низких скоростях падение напряжения на активном сопротивлении статора R_1 становится сопоставимо с величиной напряжения на зажимах статора, что приводит к падению перегрузочной способности двигателя λ_M. Для того, чтобы реализовать одинаковую перегрузочную способность при частотном регулировании в области низких частот вращения используют так называемую «*IR-компенсацию*», которая заключается в том, что на малых скоростях делается добавка напряжения на статоре, компенсирующая $\Delta U_{R1} = I_1^2 R_1$.

Диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет $D_\omega = 15 \div 20$. В замкнутых системах диапазон может быть существенно расширен.

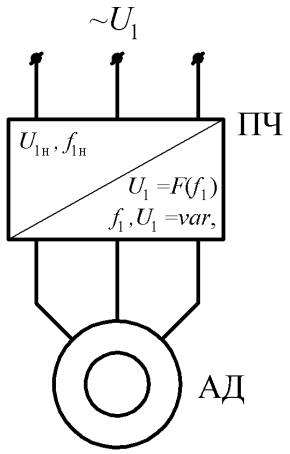


Рис. 34. Схема включения АД при частотном регулировании

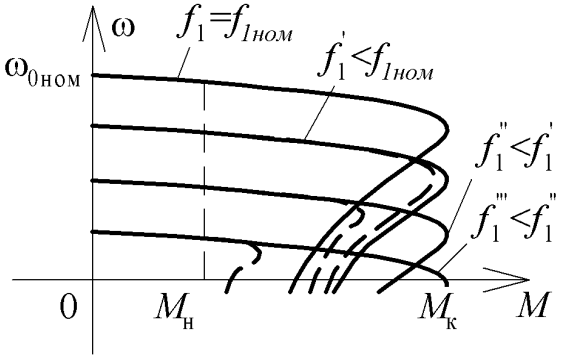


Рис. 35. Механические характеристики системы ПЧ-АД

Основные сложности, возникающие при реализации частотного управления заключаются в следующем:

1) для получения в системах ПЧ-АД свойств аналогичных (или даже превосходящих) свойства систем ТП- ДПТ необходимо получение информации о различных параметрах АД;

2) системы являются сильно нелинейными и для получения высококачественных систем необходимо вводить звенья, компенсирующие нелинейность объекта регулирования;

3) закон $U_1 / f_1 = const$ не является оптимальным, и требуется корректировка закона, учитывающая $M_{\tilde{n}}$ на валу двигателя;

4) в АД входят параметры X_0, X_1, X_2', величина которых зависит от степени насыщения машины нелинейно. Кроме этого изменяются значения активных сопротивлений статора и ротора при изменении температуры обмоток двигателя, что также необходимо учитывать.

Несмотря на указанные сложности, современные частотные приводы успешно функционируют, обеспечивая высокое качество процесса регулирования скорости.

29 . Потери энергии в электродвигателе

Для правильной оценки теплового режима двигателей важнейшим является нахождение потерь энергии, обусловливающих нагрев, на различных этапах рабочего периода.

Суммарные потери в двигателе ΔP_Σ состоят из двух составляющих: постоянных ΔP_{const}, не зависящих от нагрузки, и переменных ΔP_{var}, зависящих от нагрузки. В этом случае для двигателя постоянного тока

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{const} + \Delta P_{var} = \Delta P_{\tilde{n}\grave{o}} + \Delta P_{\grave{i}\hat{a}\tilde{o}} + I_{\ddot{y}}^2 R_{\ddot{y}\Sigma},$$

где $\Delta P_{\tilde{n}\grave{o}}$ – потери в стали; $\Delta P_{\grave{i}\hat{a}\tilde{o}}$ – механические потери; $I_{\ddot{y}}^2 R_{\ddot{y}\Sigma}$ – потери в цепи якоря.

Для асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ñò}} + \Delta P_{\text{ìåõ}} + 3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'),$$

где $3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2')$ - потери в обмотках статора и ротора соответственно.

Переменные потери также можно выразить через электромагнитный момент и относительную скорость (или скольжение). Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения

$$\Delta P_{var} = P_{\text{ýì}} - P_{\text{ìåõ}} = M(\omega_0 - \omega),$$

где $P_{\text{ýë}}$ – электромагнитная мощность, потребляемая из сети; $P_{\text{ìåõ}}$ – механическая мощность на валу двигателя.

Для асинхронного двигателя

$\Delta P_{var} = M\omega_0 s(1 + R_1 / R_2')$, где s – скольжение двигателя.

30. Нагрев и охлаждение двигателей

Процесс электромеханического преобразования энергии сопровождается одновременной потерей части энергии в самой машине, которая, преобразуясь в тепловую энергию, определяет нагрев её элементов. Мощность тепловых потерь $\Delta P_{\text{Ò}}$ определяется разностью между потреблённой двигателем электрической энергией $P_{\text{ýë}}$ и отдаваемой механической энергией на валу двигателя $P_{\text{ìåõ}}$ и зависит от конкретного режима преобразования энергии. Поэтому определение функции $\Delta P_{\text{Ò}}(t)$ является одной из задач при оценке теплового состояния машины в конкретном режиме; второй задачей является оценка температуры двигателя $\Theta_{\text{âä}}$.

Теория нагрева при решении задач электропривода базируется на следующих допущениях:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечную теплопроводность;
- теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- температура охлаждающей среды постоянна.

При указанных допущениях уравнение баланса тепловой энергии в двигателе будет иметь следующий вид:

$$\Delta P_{\text{Ò}}(t)dt = A\tau dt + Cdt,$$

где $\Delta P_{\text{Ò}}(t)$ – мощность тепловых потерь; А – теплоотдача; С – теплоёмкость двигателя; τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды, $\tau = \Theta_{\text{âä}} - \Theta_{\text{ñ}}$.

Переписав (6.1) в операторной форме

$$\Delta P_{\text{ò}}(p) = A\tau(p) + Cp\,\tau(p),$$

получим передаточную функцию, описывающую динамический характер изменения температуры двигателя:

$$W_{\tau}(p) = \frac{\tau(p)}{\Delta P_{\text{ò}}(p)} = \frac{k_{\tau}}{T_{\text{í}}\,p + 1},$$

где $k_{\tau} = 1/A$ – коэффициент передачи; $T_{\text{í}} = C/A$ - постоянная времени нагрева.

На рис. 36 представлены кривые нагрева и охлаждения двигателя.

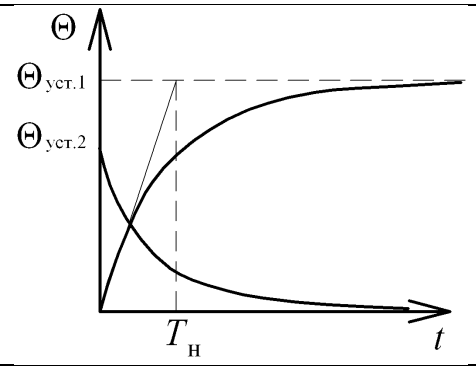


Рис. 36. Графики процессов нагрева и охлаждения двигателя

Значение постоянной времени нагрева в пределах одной серии может меняться от 10 мин до 2-3 часов в зависимости от габаритов двигателя.

Передаточная функция (6.2) справедлива, если параметры A и C остаются неизменными. У самовентилируемых двигателей теплоотдача зависит от скорости ротора и её характеризуют коэффициентом ухудшения теплоотдачи $\beta_{Ai} = A_i / A$.

31. Классификация режимов работы двигателей по нагреву

Возможные режимы работы электроприводов отличаются многообразием по характеру и длительности циклов, значениям нагрузок, условиям охлаждения и т.д., поэтому изготовление двигателей для каждого из режимов не целесообразно. На основании анализа реальных режимов выделен специальный класс режимов – номинальные режимы, для которых проектируются и изготовляются серийные двигатели.

ГОСТ 183-74 (2001) предусматривает 8 номинальных режимов, которые имеют обозначения *S*1-*S*8. Ниже дана краткая характеристика часто встречающихся режимов.

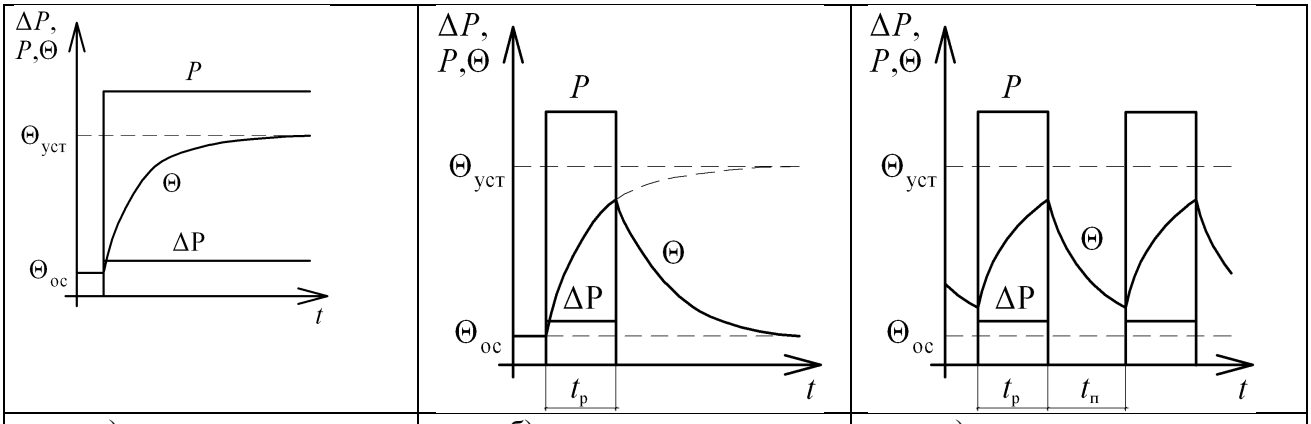
1. *Продолжительный* номинальный режим (*S*1) – это режим работы при неизменной нагрузке, продолжающийся до тех пор, пока превышения температур всех частей электрической машины не достигнут установившихся значений (рис. 37,а).

2. *Кратковременный* номинальный режим (*S*2) работы – это такой режим, при котором период неизменной номинальной нагрузки $t_д$ чередуется с периодом отключения машины, при этом за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы охлаждается до температуры окружающей среды (рис.37,б). Продолжительность периода включения *N* должна составлять 10, 30, 60 или 90 минут.

3. *Повторно-кратковременный* номинальный режим (*S*3) работы – это такой режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами пауз, при чём во время работы температура не достигает установившейся, а за время пауз двигатель не успевает остыть до температуры окружающей среды (рис. 37,в). Этот режим работы принято характеризовать продолжительность включений ε

$$\varepsilon = \frac{t_д}{t_д + t_п}.$$

Продолжительность одного цикла составляет 10 мин. Стандартные значения ε могут составлять 0,15; 0,25; 0,40 и 0,60.



а) б) в)

Рис. 37. Графики мощности и температуры для номинальных режимов (а – длительный, б – кратковременный, в – повторно-кратковременный)

Режимы *S*1- *S*3 являются основными номинальные данные для которых включаются в паспорт машины и каталоги. Режимы *S*4- *S*8 призваны упростить задачу эквивалентирования произвольного режима номинальному.

4. *Повторно-кратковременный* номинальный режим работы *с частыми пусками* (*S*4). В этом режиме, в отличие от *S*3, пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины.

5. *Повторно-кратковременный* номинальный режим работы *с частыми пусками и электрическим торможением*. То же, что и *S*4. Дополнительно к потерям при пусках учитываются потери при торможениях.

6. *Перемежающийся* режим работы (*S*6). Отличается от *S*3 тем, что во время пауз двигатель не отключается, а продолжает работать вхолостую.

7. *Перемежающийся* режим *с частыми реверсами* (*S*7) *при электрическом торможении*. То же что и *S*6 с учётом потерь при частых реверсах двигателя, которые оказывают существенное влияние на нагрев машины.

8. *Перемежающийся* режим *с двумя и более частотами вращения* (*S*8). То же что и *S*7, только двигатель работает на двух и более установившихся скоростях.

32. Расчёт мощности и проверка по нагреву двигателя для *продолжительного режима работы*

В соответствии с уравнением движения электропривода для одномассовой системы момент двигателя на различных этапах работы определяется текущими значениями статической и динамической нагрузки электропривода:

$$M(t) = M_c(t) + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}.$$

Зависимость момента двигателя от времени $M(t)$ называется нагрузочной диаграммой двигателя и является главной характеристикой, используемой при расчётах, связанных с выбором мощности электродвигателя. Основой для расчёта нагрузочных диаграмм являются информация о статическом моменте на каждом этапе работы $M_c(t)$, называемую нагрузочной диаграммой механизма, и сведения о характере движения электропривода в технологическом процессе, задаваемые тахограммой электропривода $\omega(t)$.

Производственных механизмов с точки зрения режимов работы электропривода разделяют на две группы: механизмы непрерывного и механизмы циклического действия. Соответственно имеют особенности и методики выбора и проверки двигателя на нагрев.

33. *Расчёт мощности двигателя при неизменной нагрузке*

Особенностью механизмов непрерывного действия является продолжительный режим работы двигателя при неизменной средней скорости $\omega_{ñð} = const$. При этом время динамических режимов (пуск, торможение, реверс) настолько мало по сравнению с общим временем работы на каждом включении, что существенного влияния на нагрев двигателя динамические режимы не оказывают и при построении нагрузочных диаграмм их можно не учитывать.

Расчётный момент двигателя можно найти по соотношению

$$M_ð \geq k_ç M_{ñ.ý},$$

где $k_ç = 1{,}1 \div 1{,}3$ – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя; $M_{ñ.ý}$ – эквивалентный момент нагрузки.

Тогда расчётную мощность двигателя $P_ð$ можно определить по формуле

$$P_ð = M_ð \omega_ð.$$

По полученному значения по каталогу выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости, после чего выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности. Для этого на нагрузочной диаграмме определяют участок максимального динамического момента $M_{ä.max}$ и сравнивают его с допустимым моментом двигателя

$$M_{ä.max} < M_{äâ.äîï} = \lambda_ì M_{íì},$$

где $\lambda_ì$ – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту, указывается в паспортных данных на двигатель.

Для ДПТ обычного исполнения и синхронных двигателей $\lambda_ì = 1{,}5 \div 2{,}5$, для АД максимальный момент двигателя может быть принят равным критическому. При выбора АД с КЗР также необходимо проверить двигатель по условиям пуска:

$$M_{äâ.ï} > M_{ñ.ï}.$$

34. *Проверка двигателя по нагреву при переменной нагрузке*

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{\text{ðàá}} < \tau_{\text{äîï}},$$

где $\tau_{\text{ðàá}}$ – перегрев двигателя при работе; $\tau_{\text{äîï}}$ – допустимый перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции.

Проверка двигателя по нагреву может быть выполнена прямым или косвенным методами. Использование прямого метода предполагает расчёт и построение кривой перегрева $\tau(t)$ за цикл работы двигателя. Применение прямого метода требует наличия математической модели теплового режима двигателя, что является трудоёмкой задачей, так как точное описание процессов нагрева и охлаждения двигателя довольно сложное. Поэтому обычно используют косвенные методы проверки, не требующие построения графика $\tau(t)$.

35. Метод средних потерь

Метод является наиболее точным и универсальным. Суть метода заключается в определении средних потерь мощности $\Delta P_{\text{ñð}}$ за цикл работы двигателя и сопоставление их с номинальными потерями мощности $\Delta P_{\text{íì}}$. Для получения конечного соотношения составим закон сохранения энергии за цикл работы в квазиустановившемся режиме. Всё выделенное за цикл тепло отводится в окружающую среду, т.е.

$$A\tau_{\text{ñð}} t_{\text{ö}} = \int_0^{t_{\text{ö}}} \Delta P(t)dt.$$

Тогда средний перегрев двигателя за время цикла $t_{\text{ö}}$ составляет

$$\tau_{\text{ñð}} = \int_0^{t_{\text{ö}}} \frac{\Delta P}{At_{\text{ö}}} dt = \frac{\Delta P_{\text{ñð}}}{A}.$$

По аналогии номинальные потери мощности в двигателе определяют его допустимый нагрев

$$\tau_{\text{äîï}} = \frac{\Delta P_{\text{íì}}}{A}.$$

Подставив (6.4) и (6.5) в (6.3) получим основное расчётное соотношение метода средних потерь:

$$\Delta P_{\text{ñð}} \le \Delta P_{\text{íì}}.$$

С учетом (6.2) и (6.5) можно получить формулировку метода средних потерь: если средняя за цикл мощность потерь не превосходит номинальную мощность потерь, то среднее превышение температуры не превышает допустимое превышение температуры.

Если на отдельных участках цикла нагрузка постоянна, то средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{ñð}} = \sum_1^n \Delta P_i t_i / t_{\text{ö}}.$$

Номинальные потери мощности двигателя определяются по каталожным данным по формуле

$$\Delta P_{\text{íì}} = P_{\text{íì}} (1 - \eta_{\text{íì}}) / \eta_{\text{íì}}.$$

Метод средних потерь позволяет оценить тепловой режим работы двигателя по среднему превышению температуры. В этом заключается определённая погрешность метода, так как максимальный перегрев двигателя на отдельных участках цикла может превышать $\tau_{\text{ñð}}$. Точность оценки нагрева этим методом тем выше, чем больше разница между величинами постоянной времени нагрева $T_{\text{í}}$ и длительностью наиболее продолжительного участка цикла работы двигателя $t_{\text{ìàõ}}$, то есть метод возможно использовать только при выполнении условия

$$t_{\text{ö}} \ll T_{\text{í}}.$$

Метод средних потерь требует знания кривой КПД двигателя в функции его нагрузки и предварительного определения потерь на каждом из участков нагрузочной диаграммы, что усложняет расчёт.

Часто оказывается приемлемым использование методов эквивалентных величин, позволяющих провести проверку двигателя по нагреву более просто. К таким методам относят метод эквивалентного тока, момента и мощности.

36. Методы эквивалентных величин: тока, момента, мощности

Если в результате построения нагрузочной диаграммы есть данные о кривых тока в функции времени, то при некоторых условиях можно провести проверку двигателя по нагреву без вычисления потерь, воспользовавшись методом эквивалентного тока.

Потери в двигателе можно рассматривать как сумму постоянных потерь, не зависящих от нагрузки, и переменных потерь, определяемых нагрузкой.

Эквивалентный ток – это такой неизменяющийся ток, при работе с которым в электрическом двигателе выделяются потери, равные средним потерям при переменном графике нагрузки, то есть

$$\Delta P_{\text{ñð}} = \Delta P_{\text{const}} + I_{\text{ýêâ}}^2 R \ .$$

Средняя мощность потерь за цикл при переменном графике нагрузки двигателя и продолжительном режиме работы

$$\Delta P_{\text{ñð}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + ... + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 ... + t_n} \ .$$

Подставив (6.5) в (6.6) после преобразований получим формулу для определения эквивалентного тока:

$$I_{\text{ýêâ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + ... + I_n^2 t_n}{t_{\text{ö}}}}$$

или в общем случае

$$I_{\text{ýêâ}} = \frac{1}{t_{\text{ö}}} \sqrt{\int_0^{t_{\text{ö}}} i^2(t)\,dt} \ .$$

Двигатель проходит по условиям нагрева, если выполняется условие

$$I_{\text{ýêâ}} \le I_{\text{íì}} \ .$$

Метод эквивалентного тока исходит из предположения независимости потерь в стали и механических от нагрузки и предполагает постоянство сопротивления главной цепи двигателя на всех участках заданного графика нагрузки. Следовательно, когда постоянные потери не являются таковыми (изменение напряжения на АД) или сопротивление не остаётся постоянной величиной (АД с глубоким пазом в режиме переменного скольжения), метод эквивалентного тока может привести к существенным погрешностям.

В ряде случаев оказывается удобно использовать для проверки по нагреву график момента, развиваемого двигателем, в функции времени. Если поток двигателя постоянен, то между моментом и током существует пропорциональная связь. Поэтому оказывается возможным проверка двигателя *методом эквивалентного момента*, который для ступенчатого графика вычисляется по формуле

$$M_{\text{ýêâ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + ... + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_i^2 t_i) / t_{\text{ö}}} \ .$$

где M_i, t_i – соответственно момент и длительность *i*-ого участка нагрузочной диаграммы.

Двигатель проходит по условиям нагрева, если выполняется условие

$$M_{\text{ýêâ}} \le M_{\text{íì}} \ .$$

Метод применяется для проверки по нагреву всех двигателей при условии работы с постоянством потока.

Если нагрузочная диаграмма двигателя задана в виде графика мощности, то проверка двигателя по нагреву может быть выполнена непосредственно по графику мощности, но лишь тогда, когда между мощностью и током существует прямая пропорциональность, что имеет место при работе двигателя с постоянством потока и скорости.

Для ступенчатого графика нагрузки эквивалентная мощность вычисляется по формуле

$$P_{\text{эквив}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}.$$

37. Проверка двигателя по нагреву для повторно-кратковременного режима работы

В случае, когда двигатель работает в повторно-кратковременном режиме проверку по нагреву можно выполнять указанными выше методами после приведения продолжительности включения ε для конкретного режима к стандартной $\varepsilon_{\text{ст}}$. Эквивалентные значения величин вычисляются по формулам

$$I_{\text{эквив}} = I_{\text{эквив.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}}(\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}) + \varepsilon_{\text{ст}}}};$$

$$M_{\text{эквив}} = M_{\text{эквив.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}}(\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}) + \varepsilon_{\text{ст}}}};$$

$$P_{\text{эквив}} = P_{\text{эквив.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}}(\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}}) + \varepsilon_{\text{ст}}}},$$

где $k_{\text{п}} = \Delta P_{const} / \Delta P_{var}$ – коэффициент потерь.

Если величина постоянных потерь существенно меньше переменных, то слагаемым $k_{\text{п}}(\varepsilon - \varepsilon_{\text{ст}})$ можно пренебречь, при этом формулы для эквивалентных величин упрощаются.

При пренебрежении постоянными потерями ($k_{\text{п}} << 1$) и использовании двигателя, предназначенного для продолжительного режима работы ($\varepsilon_{\text{ст}} = 1$), получим

$$I_{\text{эквив}} = I_{\text{эквив.}\varepsilon}\sqrt{\varepsilon}; M_{\text{эквив}} = M_{\text{эквив.}\varepsilon}\sqrt{\varepsilon}; P_{\text{эквив}} = P_{\text{эквив.}\varepsilon}\sqrt{\varepsilon}.$$

Формулы справедливы при условии постоянства теплоотдачи в период пауз (например, двигатели с принудительным охлаждением).

На зачете студент может заработать от 24 до 40 баллов.

Шкалы оценки образовательных достижений

Оценка по 5-балльной шкале	Сумма баллов	Требования к знаниям на зачете
«Зачтено»	36 ÷ 40	выставляется студенту, если он полно, грамотно и без ошибок ответил на все вопросы, в том числе и дополнительные
	29 ÷ 35	выставляется студенту, если он без существенных ошибок ответил на все вопросы, однако допускал отдельные неточности или не демонстрировал достаточно глубокого знания материала
	24 ÷ 28	выставляется студенту, если он в ответах на вопросы продемонстрировал только знание основного материала, допускал существенные неточности в ответах, недостаточно технически грамотно формулировал ответы
«Не зачтено»	менее 24	выставляется студенту, если допускал неправильные ответы на поставленные вопросы или не смог ответить на часть вопросов, не смог подтвердить знание значительной части материала.

Итоговая оценка представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего, рубежного (по разделам) и промежуточного контроля и

выставляется в соответствии с Положением о кредитно-модульной системе в соответствии со следующей шкалой:

Оценка по 5-балльной шкале	Сумма баллов за разделы и зачет	Оценка ECTS
«Зачтено»	90-100	A
	85-89	B
	75-84	C
	70-74	D
	65-69	
	60-64	E
«Не зачтено»	Менее 60	F

Учебно-методическое и информационное обеспечение учебной дисциплины

Основная литература

1. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства : учебник / Б. Ю. Васильев. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 144 с. — ISBN 978-5-8114-4420-5. — Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/139295

2. Фролов, Ю. М. Регулируемый асинхронный электропривод : учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 464 с. — ISBN 978-5-8114-2177-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/102251

3. Фурсов, В.Б. Моделирование электропривода: учебное пособие / В.Б. Фурсов. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 220 с. — ISBN 978-5-8114-3566-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: https://e.lanbook.com/book/121467

Дополнительная литература

4. Фролов, Ю.М. Проектирование электропривода промышленных механизмов : учебное пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — Санкт-Петербург: Лань, 2014. — 448 с. — ISBN 978-5-8114-1571-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: https://e.lanbook.com/book/44766

5. Епифанов, А.П. Электропривод: учебник / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гущинский. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 400 с. — ISBN 978-5-8114-1234-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: https://e.lanbook.com/book/3812

6. Никитенко, Г.В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Г.В. Никитенко. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2013. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-1468-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: https://e.lanbook.com/book/5845

7. Фролов, Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу : учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 368 с. — ISBN 978-5-8114-1141-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/3185

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

8. http://www.elecab.ru/dvig.shtml. Справочник электрика и энергетика.
9. https://docplan.ru/list0.htm. Государственные стандарты. База ГОСТ от ФГУП "Стандартинформ"
10. https://docplan.ru/list2.htm. База нормативно-технических документов.

Материально-техническое обеспечение учебной дисциплины

Занятия проводятся в учебной аудитории, предназначенной для проведения занятий лекционного и практического типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Аудитория оснащена необходимым оборудованием. Лабораторные занятия проводятся в специализированных лабораториях, оснащенных необходимым оборудованием.

В распоряжении обучающихся студентов имеются электронно-библиотечные системы.

Учебно-методические рекомендации для студентов

1. Указания для прослушивания лекций

Перед началом занятий внимательно ознакомиться с учебным планом проведения лекций и списком рекомендованной литературы.

Перед посещением очередной лекции освежить в памяти основные концепции пройденного ранее материала. Подготовить при необходимости вопросы преподавателю. Не надо опасаться, что вопросы могут быть простыми.

На лекции основное внимание следует уделять не формулам и математическим выкладкам, а содержанию изучаемых вопросов, определениям и постановкам задач.

В процессе изучения лекционного курса необходимо по возможности часто возвращаться к основным понятиям и методам решения задач (здесь возможен выборочный контроль знаний студентов).

Желательно использовать конспекты лекций, в которых используется принятая преподавателем система обозначений.

Для более подробного изучения курса следует работать с рекомендованными литературными источниками и вновь появляющимися источниками.

2. Указания для участия на лабораторных занятиях.

Перед посещением уяснить тему лабораторного занятия и самостоятельно изучить связанные с ней понятия и методику проведения испытания по методическому указанию.

Перед испытанием активно участвовать в обсуждении с преподавателем основных понятий, связанных с темой занятия.

В процессе испытания строго соблюдать правила техники безопасности.

После испытания по возможности самостоятельно проводить обработку результатов эксперимента до окончательного итога и сделать вывод по работе.

В конце занятия при необходимости выяснить у преподавателя неясные вопросы.

Подготовить письменный отчет о проделанной работе.

3. Самостоятельная работа студентов обычно складывается из нескольких составляющих:

- работа с текстами: учебниками, историческими первоисточниками, дополнительной литературой, в том числе материалами интернета, а также проработка конспектов лекций;
- написание докладов, рефератов;
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к зачету непосредственно перед ним.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является необходимым компонентом получения полноценного высшего образования.

Методические рекомендации для преподавателей

Методические указания к проведению лекций

Лекция – играет важнейшую роль в организации учебного процесса, однако, она не может оставаться в современных условиях неизменной, ни по содержанию, ни по направленности, ни по форме.

В связи с расширением и углублением содержания лекций изменяется методика их проведения, основанная на использовании различного рода структурно-логических схем, каждая из которых имеет свою содержательную суть и назначение в построении вузовской лекции. Так, функциональные схемы, раскрывающие логику того или иного педагогического процесса, явления, позволяют придать лекции демонстрационно-развивающий или установочно-нацеливающий характер. Принципиальные схемы, отражающие блочное построение материала, способствуют превращению лекции из информационно-репродуктивной в структурно-нацеливающую (или проблемно-поисковую, или обзорно-тематическую – в зависимости от темы). Мнемознаки придают лекции четкость, конкретность, краткость во введении понятийного аппарата.

Лекция – весьма экономный способ изложения основ знаний, закладывает основы понимания студентами сущности этих знаний, эмоциональное отношение к знаниям, направляет пути и способы приобретения этих знаний.

Основная дидактическая цель лекции – формирование ориентировочной основы для последующего усвоения студентами учебного материала.

Лекция, как форма преподавания в высшем учебном заведении, обладает рядом функций: обучающая; воспитывающая; развивающая; информативная.

Можно выделить и преимущества лекции:

- творческое общение лектора с аудиторией, сотворчество, эмоциональное взаимодействие;
- лекция весьма экономный способ получения в общем виде основ знаний; лекция активизирует мысленную деятельность, если хорошо понята и внимательно прослушана, поэтому задача лектора – развивать активное внимание студентов, вызывать движение их мысли вслед за мыслью лектора.

От мастерства преподавателя зависит максимальное использование потенциальных возможностей этой ведущей формы вузовского обучения. Но процесс обучения, начинаясь на лекции, продолжается на практических занятиях и углубляется самостоятельной работой.

В зависимости от места в лекционном или предметном учебном курсе выделяют вводную лекцию. Она знакомит студентов с целью и назначением курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин. Далее дается краткий обзор курса (вехи развития данной науки, имена известных ученых). В такой лекции ставятся научные проблемы, выдвигаются гипотезы, намечаются перспективы развития науки и ее вклада в практику. Во вводной лекции важно связать теоретический материал с практикой будущей работы специалистов. Далее целесообразно рассказать об общей методике работы над курсом, дать характеристику учебника и учебных пособий, ознакомить слушателей с обязательным списком литературы, рассказать об экзаменационных требованиях. Подобное введение помогает студентам получить общее представление о предмете, ориентирует их на систематическую работу над конспектами и литературой, знакомит с методикой работы над курсом.

При подготовке указанной лекций целесообразно учесть пробелы в знаниях студентов, выявленные на практических занятиях, в процессе фронтальных опросов и, как минимум, дать им установку на пути устранения пробелов, а также дальнейшее усовершенствование своей подготовки в данной области. На итоговой лекции преподаватель выделяет основные идеи курса, показывает, каким образом можно использовать полученные знания на практике и при изучении других дисциплин. Подводятся итоги изучения дисциплины, показывается ее значение в формировании научного мировоззрения, обсуждаются особенности зачета или экзамена по предмету.

Лекция-визуализация возникла как результат поиска новых возможностей реализации принципа наглядности. Психолого-педагогические исследования показывают, что наглядность не только способствует более успешному восприятию и запоминанию учебного материала, но и позволяет проникнуть глубже в существо познаваемых явлений. Это происходит за счет работы обоих полушарий, а не одного левого, логического, привычно работающего при освоении точных наук. Правое полушарие, отвечающее за образно-эмоциональное восприятие предъявляемой информации, начинает активно работать именно при ее визуализации. Визуализованная лекция представляет собой устную информацию, преобразованную в визуальную форму. Видеоряд, будучи воспринятым и осознанным, сможет служить опорой адекватных мыслей и практических действий. Преподаватель должен выполнить такие демонстрационные материалы, такие формы наглядности, которые не только дополняют словесную информацию, но сами выступают носителями содержательной информации. Подготовка такой лекции состоит в реконструировании, перекодировании содержания лекции или ее части в визуальную форму для предъявления студентам через ТСО или вручную (слайды, пленки, планшеты, чертежи, рисунки, схемы и т.д.).

Лекция с заранее запланированными ошибками активизировать внимание студентов; развивать их мыслительную деятельность; формировать умения выступать в роли экспертов, рецензентов и т.д. Подготовка к лекции с заранее запланированными ошибками состоит в том, чтобы заложить в нее определенное количество ошибок содержательного, методического, поведенческого характера, их список преподаватель приносит на лекцию и предъявляет студентам в конце. Подбираются наиболее типичные ошибки, которые, обычно, не выпячиваются, а, как бы, затушевываются. Задача студентов состоит в том, чтобы по ходу лекции отмечать ошибки, фиксировать их на полях и называть их в конце. На разбор ошибок отводится 5–10 минут. При этом правильные ответы называют и студенты, и преподаватель. Такая лекция одновременно

выполняет стимулирующую, контрольную и диагностическую функцию, помогая диагностировать трудности усвоения предыдущего материала.

Структура зависит от особенностей учебного материала и дидактической цели; должна включать элемент целеполагания и подведения итогов. Структура лекции состоит из трех основных моментов: вводная часть, основная часть и заключительная.

Вводную часть лекции целесообразно начинать с формулировки ее темы и цели, чтобы избежать ее декларативности и неопределенности в изложении материала. Сообщение плана лекции обеспечивает на 10-12% более полное запоминание материала, чем на той же лекции, но без оглашения плана. Существует мнение, что лекция удается или проваливается в первые 10 минут. Поэтому умение овладеть вниманием слушателей уже во вводной части очень важно. Нередко, особенно в начале чтения курса, студенты настороженно встречают преподавателя, поэтому опытные лекторы начинают вводную часть с ярких, понятных фактов, связанных с содержанием предмета и способных пробу интерес к своей личности и читаемой дисциплине.

В основной части преподавателю необходимо излагать материал в соответствии со структурой лекции, учитывать психологические особенности восприятия лекции. Необходимо максимально использовать первые 15-20 минут – период «глубокого» внимания слушателей, далее наступают утомление и снижение внимания (максимальное падение работоспособности на 40-й минуте лекции). Наиболее, важный материал в лекции должен повторяться, создавая некоторую избыточность учебной информации, так как колебания внимания происходят каждые 2-3 мин у каждого слушателя. Целесообразно предварительно рассчитывать скорость подачи информации. Существуют правила подачи материала. Они опираются на психологическую особенность человека – восприятие. Во время основной части помогает удерживать внимание слушателей возвращение к стержневой идее. В арсенале лектора должны быть свои приемы: возможен переход на шутливый тон изложения; можно задать вопрос аудитории и попросить любого студента ответить на него; можно прочесть какую-либо цитату и в это время позволить слушателям сделать минутную гимнастику для пальцев и даже поговорить с соседом; привести интересный (или даже чаще анекдотичный) случай из практики, который вызывал бы дружный смех слушателей, моментально снимал у них усталость, давал разрядку, возможность и желание воспринимать лекционный материал дальше, но она должна быть короткой, тактичной и к месту.

Тщательно надо продумать заключительную часть лекции, повторить ее положения, а на следующей лекции начать именно с них. Заключительная часть лекции предполагает: подведение итогов; обобщение прочитанного и уже знакомого, из самостоятельно изученного студентами, материала, формулировку выводов и т.д. Здесь преследуется цель ориентировать студентов на самостоятельную работу. Для этого может быть рекомендована литература по изучаемой проблематике, разъяснено, какие вопросы выносятся на практические занятия, а какие необходимо изучить самостоятельно.

В самом конце лекции следует ответить на вопросы студентов, возможно поступившие в форме записок (о такой возможности надо предупредить студентов заранее). Со студентами, проявившими интерес к теме лекции, желательно побеседовать после ее окончания, пригласить их на консультацию для продолжения разговора. Отвечая на наивные или нелепые вопросы надо щадить самолюбие студента, малейшая бестактность при этом может привести к потере контакта с аудиторией.

Следует требовать, чтобы на лекцию в аудиторию студенты приходили за несколько минут до ее начала. Опаздывать на лекцию и входить в аудиторию после лектора большинство опытных преподавателей не разрешают. Начиная лекцию, не рекомендуется делать длительное вступление, не относящееся к теме лекции.

Методические указания к проведению лабораторных занятий

Лабораторные занятия интегрируют теоретико-методологические знания и практические навыки и умения студентов в едином процессе деятельности учебно-исследовательского характера. Практически все выпускники вуза должны быть подготовлены к исследовательской работе. Лабораторные работы имеют особенно ярко выраженную специфику в зависимости от конкретной специализации. На лабораторных занятиях одной из эффективных форм работы является совместная групповая работа. Такие практические занятия должны вести студентов к дальнейшей углубленной самостоятельной работе, активизировать их мыслительную деятельность, вооружать методами практической работы.

Проведением лабораторных занятий со студентами достигаются следующие цели:

- углубление и закрепление знания теоретического курса экспериментальной проверкой в лабораторных условиях изложенных в лекциях законов, положений и формул;

- приобретение навыков в научном экспериментировании, анализе полученных результатов;

- формирование первичных навыков организации, планирования и проведения научных исследований.

Формы организации лабораторного занятия зависят, прежде всего, от числа студентов, содержания и объема программного материала, числа лабораторных работ, а также от вместимости учебных помещений и наличия оборудования. В зависимости от этих условий применяют следующие формы проведения лабораторных занятий: фронтальную, по циклам, индивидуальную и смешанную (комбинированную). Фронтальная форма проведения лабораторных занятий предполагает одновременное выполнение работы всеми обучающимися. Ее применение способствует более глубокому усвоению учебного материала, поскольку график выполнения лабораторных работ поставлен в четкое соответствие с лекциями и упражнениями. При этом обеспечивается высокий методический уровень проведения работ, так как на каждом занятии внимание преподавателя сосредоточивается лишь на одной работе. Однако эта форма требует большого количества однотипного, иногда дорогостоящего оборудования и универсальных стендов, а для их размещения - значительных лабораторных площадей. Иногда в вузах используется организация лабораторных работ по циклам. При этом работы делятся на несколько циклов, соответствующих определенным разделам лекционного курса. В один цикл объединяются 3—5 работ, осуществляемых, как правило, на однотипных стендах. Обучающиеся выполняют работы по графику, переходя от одного цикла к другому. Применительно к цикловой форме организации создаются лабораторные практикумы по дисциплинам, имеющим в программах четко обозначенные разделы примерно одинаковой продолжительности по времени. Вузы, располагающие большими возможностями по лабораторной базе, внедряют индивидуальную форму организации работ, при которой каждый студент выполняет все намеченные программой работы в определенной последовательности, устанавливаемой графиком. В этом случае студенты одновременно могут работать над различными темами. Наиболее часто в вузах используется смешанная (комбинированная) форма организации лабораторных занятий, позволяющая использовать преимущества каждой из рассмотренных выше форм.

Лабораторные работы выполняются студентами самостоятельно. Это значит, что преподаватель и состав учебной лаборатории (кафедры) в ходе занятия должны не столько контролировать, сколько осуществлять научное и методическое руководство действиями обучающихся. Руководство действиями ведется так, чтобы, с одной стороны, обеспечить проявление инициативы и самостоятельности студентов, а с другой, — держать непрерывно в поле зрения работу каждого, лишь в самых необходимых случаях приходить на помощь.

3.Указания по контролю самостоятельной работы студентов

По усмотрению преподавателя задание на самостоятельную работу может быть индивидуальным или фронтальным.

При использовании индивидуальных заданий требовать от студента письменный отчет о проделанной работе.

При применении фронтальных заданий вести коллективные обсуждения со студентами основных теоретических положений.

С целью контроля качества выполнения самостоятельной работы требовать индивидуальные отчеты (допустимо вместо письменного отчета применять индивидуальные контрольные вопросы).

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ и учебным планом основной образовательной программы по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рабочую программу составил профессор Кобзев Р.А.

Рецензент: профессор Разуваев А.В.

Программа одобрена на заседании УМКН 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Председатель учебно-методической комиссии профессор Кобзев Р.А.