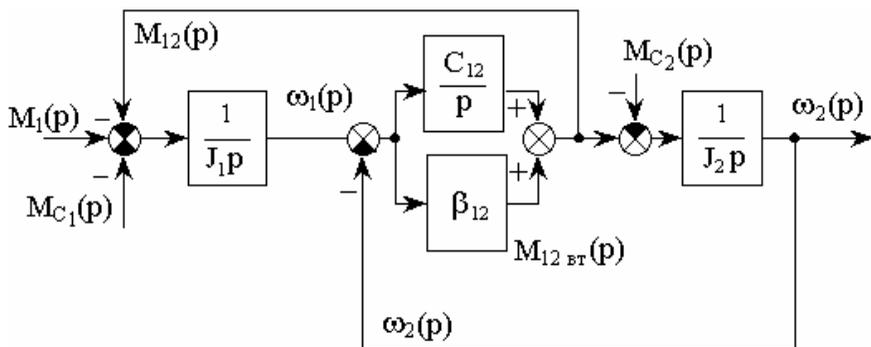


А.В. Романов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Курс лекций



Воронеж 2006

Воронежский государственный технический
университет

А.В. Романов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2006

УДК 62-83(075.8)

Романов А.В. Электрический привод: Курс лекций. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2006. 143 с.

В курсе лекций рассматриваются вопросы построения электрических приводов постоянного и переменного тока, анализа электромеханических и механических характеристик электрических машин, принципы управления в электроприводе. Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". Курс лекций предназначен для студентов второго курса специальности 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" очной формы обучения на базе среднего профессионального образования.

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

Табл. 3. Ил. 72. Библиогр.: 6 назв.

Научный редактор канд. техн. наук, проф. Ю.М. Фролов

Рецензенты: кафедра автоматизации технологических процессов Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.Д. Волков);
д-р техн. наук, проф. А.И. Шиянов

© Романов А.В., 2006

© Оформление.

ГОУВПО

«Воронежский

государственный технический университет», 2006

ВВЕДЕНИЕ

Электрический привод (ЭП) играет большую роль в реализации задач повышения производительности труда в разных отраслях народного хозяйства, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. Около 70 % вырабатываемой электроэнергии преобразуется в механическую энергию электродвигателями (ЭД), которые приводят в движение различные станки и механизмы. Современный ЭП отличается широким разнообразием применяемых средств управления – от обычной коммутационной аппаратуры до ЭВМ, большим диапазоном мощностей двигателей, диапазоном регулирования скоростей до 10000:1 и более, применением как тихоходных, так и сверхскоростных ЭД.

Электрический привод является единой электромеханической системой, электрическая часть которой состоит из электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств, а механическая часть включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма.

Широкое внедрение электрического привода во все отрасли промышленности и все возрастающие требования к статическим и динамическим характеристикам электроприводов предъявляют повышенные требования к профессиональной подготовке специалистов в области электрического привода.

Необходимо заметить, что, поскольку студентам очной формы обучения на базе среднего специального образования учебным планом отведено минимальное количество учебных часов для освоения специальности, то прогресс в профессиональных знаниях сильно зависит от самостоятельной работы студентов. В частности, в конце данного издания приведен библиографический список научно-технической литературы, рекомендуемой к изучению помимо предлагаемого конспекта лекций. Кроме этого, в дополнение к курсу лекций выпущен лабораторный практикум по электроприводу [4], в котором рассматриваются вопросы экспериментального исследования

электропривода постоянного и переменного тока. Для более успешного усвоения дисциплины студентам рекомендуется заранее изучать текст лекций и содержательную часть лабораторных работ.

Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования Российской Федерации регламентирует следующую обязательную тематику для учебного курса по дисциплине "Электрический привод".

ВЫПИСКА

из Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования государственных требований к минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного инженера по направлению 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии", по специальности 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов"

ОПД.Ф.09. "Электрический привод"

Электропривод как система; структурная схема электропривода; механическая часть силового канала электропривода; физические процессы в электроприводах с машинами постоянного тока, асинхронными и синхронными машинами; электрическая часть силового канала электропривода; принципы управления в электроприводе; элементная база информационного канала; синтез структур и параметров информационного канала; элементы проектирования электропривода.

Материал данного курса лекций полностью соответствует указанной тематике.

ЛЕКЦИЯ 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАК ОТРАСЛИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Краткая историческая справка о развитии электроприводов постоянного и переменного тока.
2. Работы отечественных и зарубежных ученых.
3. Роль электропривода в народном хозяйстве.
4. Структура и основные элементы современного автоматизированного электропривода.

Электрический привод – сравнительно молодая отрасль науки и техники, насчитывающая немногим более столетия с момента практического применения. Появление ЭП обусловлено трудами многих отечественных и зарубежных ученых-электротехников. В этом блистательном ряду имена таких крупных ученых как датчанин Х. Эрстед, показавший возможность взаимодействия магнитного поля и проводника с током (1820 г.), француз А. Ампер, математически оформивший это взаимодействие в том же 1820 г., англичанин М. Фарадей, построивший в 1821 году экспериментальную установку, доказавшую возможность построения электродвигателя. Это отечественные ученые-академики Б.С. Якоби и Э.Х. Ленц, которым впервые удалось создать в 1834 году электродвигатель постоянного тока. Работа Б.С. Якоби по созданию двигателя получила широкую мировую известность, и многие последующие работы в этой области были вариацией или развитием его идей, например, в 1837 году американец Девенпорт построил свой электродвигатель с более простым коммутатором. В 1838 г. Б.С. Якоби усовершенствовал конструкцию ЭД, привнеся в него практически все элементы современной электрической машины. Этот электродвигатель, мощностью в 1 л.с., был использован для привода лодки, которая с 12 пассажирами совершила движение со скоростью до 5 км/ч против течения Не-

вы. Поэтому 1838 год считается годом рождения электропривода. Уже на этой первой, еще несовершенной модели электропривода обнаружались весьма значительные преимущества его по сравнению с господствовавшим в то время паровыми механизмами – это отсутствие парового котла, запасов топлива и воды, т.е. существенно лучшие массогабаритные показатели.

Однако несовершенство первого ЭД, а главное неэкономичность источника электроэнергии – гальванической батареи, которая была разработана итальянцем Л. Гальвани (1737-1798), явились причиной того что, работы Б.С. Якоби и его последователей сразу не получили практического применения. Требовался простой, надежный и экономичный источник электрической энергии. И выход был найден.

Еще в 1833 году академик Э.Х. Ленц открыл принцип обратимости электрических машин, объединивший впоследствии пути развития двигателей и генераторов. И вот в 1870 г. сотрудник французской фирмы «Альянс» З. Грамм создал промышленный тип электрического генератора постоянного тока, давший новый импульс в развитие электропривода и внедрению его в промышленность. Вот некоторые примеры. Наш соотечественник электротехник В.Н. Чиколев (1845-1898) создает в 1879 году ЭП для дуговых ламп, электроприводы швейной машины (1882) и вентилятора (1886), отмеченные золотыми медалями на всероссийских выставках. Происходит внедрение ЭП постоянного тока в военно-морском флоте: подъемник боезапасов на броненосце "Сисой Великий" (1890-1894), первый рулевой привод на броненосце "12 Апостолов" (1892). В 1895 году А.В. Шубин разработал систему «инжектор-двигатель» для рулевого управления, установленный в дальнейшем на броненосцах "Князь Суворов", "Слава" и др.

Электропривод проникает в ткацкое производство на подмосковные текстильные фабрики Морозова, Лингардта, Прохоровскую мануфактуру, где уже к 1896 году работало значительное число двигателей постоянного тока.

Отмечаются случаи использования электропривода в городском транспорте – трамвайные линии в городах Киеве, Казани и Нижнем Новгороде (1892) и – несколько позже – в Москве (1903) и Петербурге (1907). Однако отмеченные успехи были незначительными. В 1890 году электропривод составлял всего лишь 5% от общей мощности используемых механизмов.

Появившийся практический опыт требовал анализа, систематизации и разработки теоретической базы для последующего освещения путей развития ЭП. Огромную роль здесь сыграл научный труд нашего соотечественника крупнейшего электротехника Д.А. Лачинова (1842-1903), опубликованный в 1880 году в журнале "Электричество" под названием "Электромеханическая работа", заложившей первые основы науки об электроприводе. Д.А. Лачинов убедительно доказал преимущества электрического распределения механической энергии, впервые дал выражение для механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, дал классификацию электрических машин по способу возбуждения, рассмотрел условия питания двигателя от генератора. Поэтому 1880 год – год опубликования научного труда "Электромеханическая работа" считается годом рождения науки об электроприводе.

Наряду с электроприводом постоянного тока пробивая себе дорогу в жизнь и электропривод переменного тока. В 1841 году англичанин Ч. Уитсон построил однофазный синхронный электродвигатель. Но он не нашел практического применения из-за трудностей при пуске. В 1876 году П.Н. Яблочков (1847-1894) разработал несколько конструкций синхронных генераторов для питания изобретенных им свечей, а также изобрел трансформатор. Следующим шагом на пути к ЭП переменного тока явилось открытие в 1888 году итальянцем Г. Феррарисом и югославом Н. Теслой явления вращающегося магнитного поля, что положило начало конструированию многофазных электродвигателей. Феррарисом и Теслой

были разработаны несколько моделей двухфазных двигателей переменного тока. Однако двухфазный ток в Европе не получил широкого распространения. Причиной этого была разработка русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским (1862-1919) в 1889 году более совершенной *трехфазной* системы переменного тока. В этом же 1889 году 8 марта он запатентовал асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (АД КЗ), а несколько позднее – и с фазным ротором. Уже в 1891 году на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне М.О. Доливо-Добровольский продемонстрировал асинхронные электродвигатели мощностью 0,1 кВт (вентилятор); 1,5 кВт (генератор постоянного тока) и 75 кВт (насос). Доливо-Добровольским также были разработаны 3-х фазный синхронный генератор и 3-х фазный трансформатор, конструкции которых остаются практически неизменными и в наше время.

Марсель Депре в 1881 году обосновал возможность передачи электроэнергии на расстоянии, и в 1882 была построена первая линия электропередачи протяженностью 57 км и мощность 3 кВт.

В результате вышеперечисленных работ были устранены последние принципиальные технические препятствия к распространению электрической передачи энергии и был создан наиболее надежный, простой и дешевый электрический двигатель, пользующийся в настоящее время исключительным распространением. Более 50 % всей электроэнергии преобразуется в механическую посредством самого массового электропривода на основе АД КЗ.

Первые в России 3-х фазные ЭП переменного тока были установлены в 1893 году в Шепетовке и на Коломенском заводе, где к 1895 году было установлено 209 электродвигателей общей мощностью 1507 кВт. И все же темпы внедрения электропривода в промышленность оставались низкими из-за отсталости России в области электротехнического производства

(2,5 % от мировой продукции) и выработки электроэнергии (15 место в мире) даже в пору расцвета царской России (1913).

После победы Великой Октябрьской революции в 1920 г. был поставлен вопрос о коренной реорганизации всего народного хозяйства. Был разработан план ГОЭЛРО (государственный план электрификации России), предусматривающий в течение 10-15 лет создание 30 тепловых и гидроэлектростанций общей мощностью 1 млн. 750 тыс. кВт (к 1935 году было введено около 4,5 млн. кВт). Работая над планом ГОЭЛРО, В.И. Ленин отметил, что "электрический привод как раз наиболее надежно обеспечивает и любую быстроту и автоматическую связанность операций на самом обширном поле труда".

Почему уделялось такое большое внимание электроприводу и электрификации? Дело очевидно в том, что ЭП является силовой основой выполнения механической работы и автоматизации производственных процессов с высоким КПД, при этом электропривод создает все условия для высокопроизводительного труда. Вот простой пример. Известно, что в течение рабочего дня один человек может при помощи мускульной энергии выработать около 1 кВт/ч, стоимость производства которой составляет (условно) 1 коп. В высокоэлектрифицированных отраслях промышленности установленная мощность электродвигателей на одного рабочего составляет 4-5 кВт (этот показатель называется *электровооруженность* труда). При восьмичасовом рабочем дне получаем потребление 32-40 кВт/ч. Это значит, что рабочий управляет механизмами, работа которых за смену эквивалентна работе 32-40 человек.

Еще большая эффективность ЭП наблюдается в горнодобывающей промышленности. Например, на шагающем экскаваторе типа ЭШ-125/125, имеющим стрелу 125 метров и ковш емкостью 125 кубических метров, мощностью одного асинхронного двигателя составляет 28,2 МВт. На прокатных станах

установленная мощность ЭД составляет более 60 МВт, а скорость прокатки – 126 км/ч.

Именно поэтому было так важно обеспечить широкое внедрение электропривода в народное хозяйство. Количественно это характеризуется *коэффициентом электрификации*, равным отношению мощности электродвигателей к мощности всех установленных двигателей, в том числе и неэлектрических. Динамику роста коэффициента электрификации в России можно проследить по табл. 1.1.

Таблица 1.1

значение коэффициента электрификации, %	год
5	1890
40	1913
51	1928
69	1932
80	1935
около 100	1987

В результате выполнения плана ГОЭЛРО СССР в 1928 году по коэффициенту электрификации обогнал Англию, в 1936 г. перегнал Германию и догнал США, тем самым ликвидировав отсталость России от ведущих мировых держав.

В настоящее время ЭП занял господствующее положение в народном хозяйстве и потребляет порядка 2/3 всей производимой электрической энергии в стране (около 1,5 трл. кВт/ч).

Так что же такое электропривод? Согласно ГОСТ Р 50369-92 *электрическим приводом* называется электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих *преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения* с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение *исполнительных органов (ИО) рабочей машины*

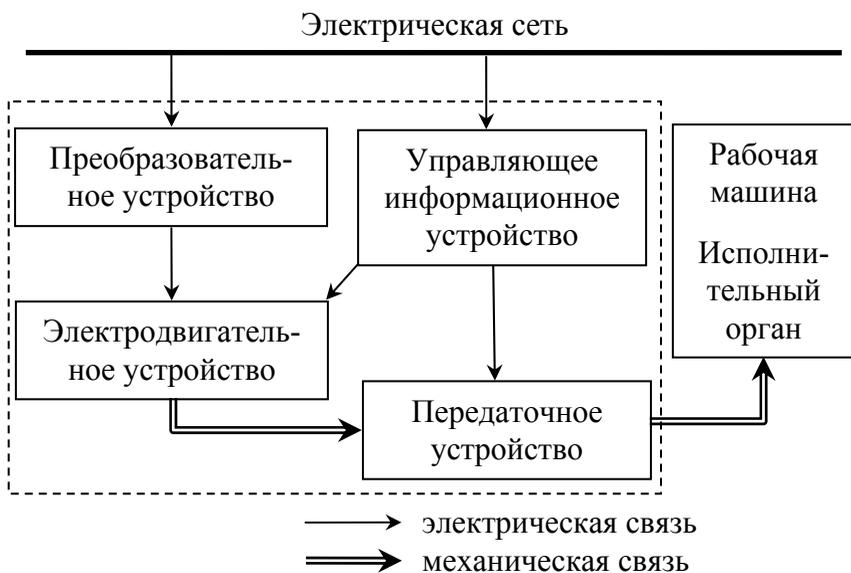


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

(РМ) и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса [1]. Данное определение проиллюстрировано на рис. 1.1.

Расшифруем составные части [1].

Преобразовательное устройство (преобразователь электроэнергии) – электротехническое устройство, преобразующее электрическую энергию с одними значениями параметров и/или показателей качества в электрическую энергию с другими значениями параметров и/или показателей качества. (Отметим, что преобразование параметров может осуществляться по роду тока, напряжению, частоте, числу фаз, фазе напряжения, согласно ГОСТ 18311).

Преобразователи классифицируют по току (постоянного и переменного тока), а также по элементной базе – тиристорные и транзисторные преобразователи.

Электродвигательное устройство (электромеханический преобразователь) – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механической в электрическую.

Применяемые в электроприводе электродвигатели могут быть *переменного* и *постоянного* тока. По мощности электрические машины можно условно разделить на:

- микромашины – до 0,6 кВт.
- машины малой мощности – до 100 кВт.
- машины средней мощности – до 1000 кВт.
- большой мощности – свыше 1000 кВт.

По скорости вращения:

- тихоходные – до 500 об/мин.
- средней скорости – до 1500 об/мин.
- быстроходные – до 3000 об/мин.
- сверхбыстроходные – до 150000 об/мин.

По номинальному напряжению бывают низковольтные двигатели (до 1000 В) и высоковольтные (выше 1000 В).

Управляющее информационное устройство. Управляющее устройство предназначено для формирования управляющих воздействий в электроприводе и представляет собой совокупность функционально связанных между собой электромагнитных, электромеханических, полупроводниковых элементов. В простейшем случае управляющее устройство может сводиться к обычному рубильнику, включающему ЭД в сеть. Высокоточные ЭП содержат в управляющем устройстве микропроцессоры и ЭВМ. *Информационное устройство* предназначено для получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации о переменных ЭП, технологического процесса и сопредельных систем для использования в *системе управления электропривода* и внешних информационных системах.

Передающее устройство состоит из механической передачи и устройства сопряжения. *Механическая передача* – это механический преобразователь, предназначенный для переда-

чи механической энергии от ЭД к исполнительному органу рабочей машины и согласованию вида и скоростей их движения. *Устройство сопряжения* – совокупность электрических и механических элементов, обеспечивающих взаимодействие электропривода с сопредельными системами и отдельных частей электропривода между собой. В качестве передаточного устройства могут выступать редукторы, клиноременные и цепные передачи, электромагнитные муфты скольжения и т.п.

Рабочая машина – машина, осуществляющая изменение формы, свойств, состояния и положения предмета труда. *Исполнительный орган рабочей машины* – движущийся элемент рабочей машины, выполняющий технологическую операцию.

Данные определения необходимо дополнить.

Система управления электропривода – совокупность управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения ЭП, предназначенных для управления электромеханическим преобразованием энергии с целью обеспечения заданного движения исполнительного органа рабочей машины.

Система управления электроприводом – внешняя по отношению к электроприводу система управления более высокого уровня, поставляющая необходимую для функционирования электропривода информацию.

ЛЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД – ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Структурная эволюция электроприводов.
2. Различные типы электроприводов, используемые в промышленности и сельском хозяйстве.
3. Основные тенденции развития электроприводов.
4. Структура ЭП с позиций "Теории электропривода".

За годы своего существования электропривод претерпел коренные изменения. В первую очередь, совершенствовались способы передачи механической энергии от двигателей к рабочим машинам. Например, в нашей стране до начала первой пятилетки (1928) господствовал *групповой* электропривод – "электропривод с одним электродвигателем, обеспечивающий движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких ИО одной рабочей машины" [1], но уже к концу первой пятилетки (1932) он был изъят из промышленности.

На рис. 2.1 показана функциональная схема *группового электропривода предприятия*. Особенность данной схемы в механическом распределении энергии по всему предприятию и, соответственно, в механическом управлении процессом, т.е. управлении работой исполнительных органов рабочих машин. На рис. 2.2 показана другая схема группового ЭП – *группового электропривода рабочих машин*. В отличие от предыдущей схемы электрическая энергия здесь подводится непосредственно к РМ, а уже в них происходит ее механическое распределение. Сохраняется механическое управление работой.

К числу общих недостатков группового электропривода можно отнести:

- ступенчатое регулирование скорости;

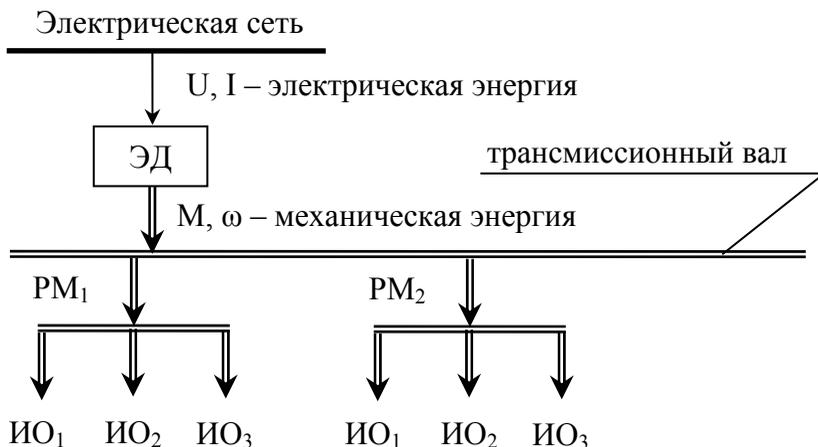


Рис. 2.1. Групповой электропривод предприятия

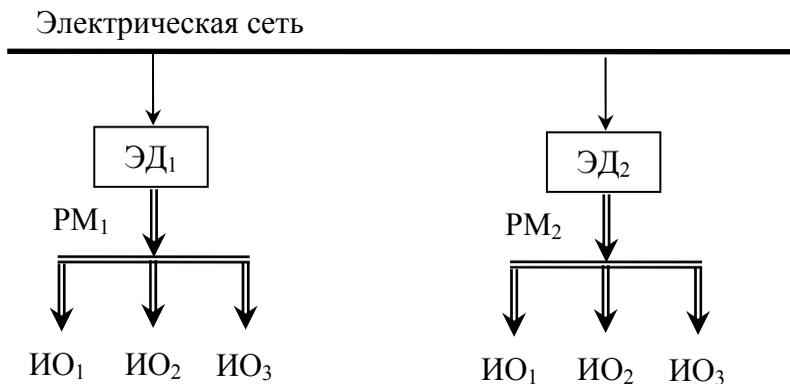


Рис. 2.2. Групповой электропривод рабочих машин

- малый диапазон регулирования;
- опасные условия труда;
- малая производительность.

Групповой электропривод был заменен более перспективным и экономичным *индивидуальным электроприводом* – это "ЭП, обеспечивающий движение одного исполнительного органа рабочей машины" [1], функциональная схема показана

на рис. 2.3. В таком варианте электропривода распределение электрической энергии происходит вплоть до рабочих органов. Также появляется возможность управления механической энергией электрическим способом. Кроме этого, индивидуальный привод позволяет в ряде случаев упростить конструкции РМ, т.к. ЭД нередко конструктивно является рабочим органом (вентилятор, электродрель и т.п.).

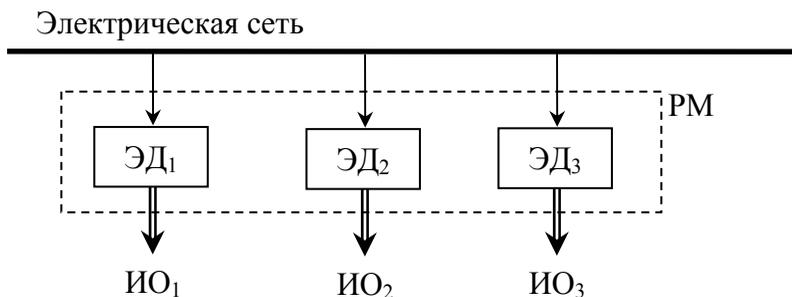


Рис. 2.3. Индивидуальный электропривод

В настоящее время индивидуальный ЭП – это основной тип промышленно используемого электропривода. Но не единственный. В ряде производственных механизмов находит применение *взаимосвязанный* электропривод – это [1] "два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей и (или) нагрузок и (или) положения исполнительных органов рабочих машин".

Этот тип электропривода объединяет два вида электроприводов – *многодвигательный ЭП* и *электрический вал*.

Многодвигательный электропривод (рис. 2.4) – "электропривод, содержащий несколько электродвигателей, механическая связь между которыми осуществляется через исполнительный орган рабочей машины" [1]. Подобный электропривод в ряде случаев позволяет снизить усилия в рабочем органе, распределить их в механизме более равномерно и без перекосов, повысить надежность и производительность установки.

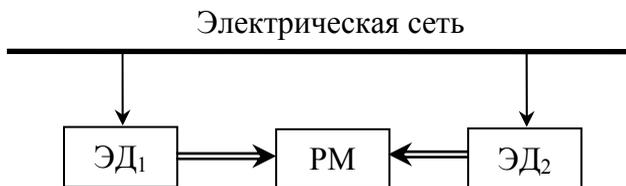


Рис. 2.4. Многодвигательный электропривод

Многодвигательный электропривод применяется в шахтных подъемниках, в частности впервые был использован в Шепетовке в конце XIX века.

Электрический вал – "взаимосвязанный электропривод, обеспечивающий синхронное движение двух или более исполнительных органов рабочей машины, не имеющих механической связи" [1]. В качестве примера можно привести приводы шлюзов и длинные конвейерные линии. На рис. 2.5 приведена схема конвейера на асинхронных ЭД с фазным ротором, поясняющая принцип работы электрического вала. Частоты вращения ω_1 и ω_2 , благодаря электрическому соединению роторов электродвигателей, будут одинаковыми или *синхронными*.

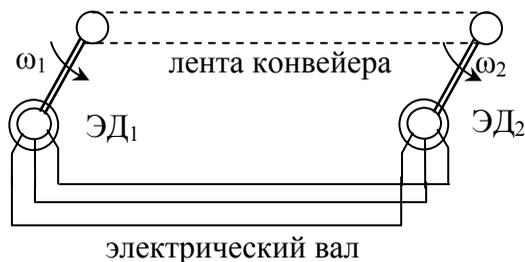


Рис. 2.5. Иллюстрация работы электрического вала

Современный электропривод отличается широким разнообразием применяемых средств управления от обычной коммутационной аппаратуры до управляющих ЭВМ, большем

диапазоном мощностей ЭД – от долей ватта до 50000 кВт, диапазоном регулирования скоростей до 10000:1 и более, применением как тихоходных двигателей (сотни об/мин), так и сверхскоростных (до 200000 об/мин). ЭП является основой автоматизации технологических объектов в промышленности, сельском хозяйстве, космосе; реализуя важнейшую задачу современности – повышение производительности труда.

В настоящее время для электропривода характерна тенденция использования энергосберегающих технологий. К традиционным системам, позволяющим возвращать энергию в сеть (этот процесс называется *рекуперацией*), таким как *система генератор-двигатель* (система Г-Д), *электрический каскад* (регулируемый ЭП с АД с фазным ротором, в котором энергия скольжения возвращается в электрическую сеть), *электромеханический каскад* (регулируемый ЭП с АД с фазным ротором, в котором энергия скольжения преобразуется в механическую и передается на вал ЭД), происходит массовая замена нерегулируемого электропривода на регулируемый. Как следствие этого, конструкция ЭП становится безредукторной, что повышает общий КПД привода. Прогресс в области конструирования преобразовательной техники, в частности, для преобразователей частоты стимулирует замену двигателей постоянного тока и синхронных ЭД на более дешевые и надежные асинхронные ЭД с короткозамкнутым ротором.

Если рассматривать электродвигательные установки с позиций теории электропривода, то как объект изучения это *электромеханическая система, являющаяся совокупностью механических и электромеханических устройств, объединенных общими силовыми электрическими цепями и (или) цепями управления, предназначенная для осуществления механического движения объекта*. В электроприводе в единое целое объединяется три части (рис 2.6): механическая часть, электрический двигатель и система управления.

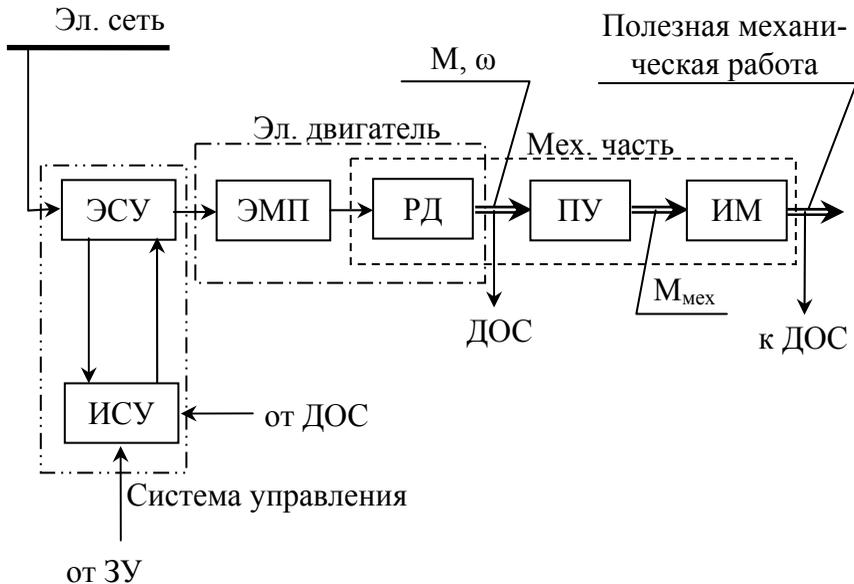


Рис. 2.6. Функциональная схема ЭП с позиций теории электропривода

Механическая часть включает все движущиеся элементы механизма – ротор двигателя РД, передаточное устройство ПУ, исполнительный механизм ИМ, на который передается полезный механический момент $M_{\text{мех}}$.

В *электродвигательное устройство* входят: электро-механический преобразователь энергии ЭМП, преобразующий электрическую мощность в механическую, и ротор двигателя РД, на который воздействует электромагнитный момент M двигателя при частоте вращения (угловой скорости) ω .

Система управления (СУ) включает в себя энергетическую часть ЭСУ и информационную часть ИСУ. На ИСУ поступают сигналы от задающих устройств ЗУ и датчиков обратной связи ДООС.

ЛЕКЦИЯ 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Назначение и основные механические узлы ЭП.
2. Активный и реактивный статические моменты.
3. Типовые нагрузки механической части электропривода.

Основной функцией электропривода является *приведение в движение рабочей машины в соответствии с требованиями технологического режима*. Движение это совершается *механической частью электропривода* (МЧ ЭП), в состав которой входит ротор электродвигателя, передаточное устройство и рабочая машина (рис. 3.1). Приведенные на рис. 3.1 параметры обозначают M_B , M_{PM} , M_{IO} – моменты на валу двигателя, рабочей машины, исполнительного органа; ω_B , ω_{PM} , ω_{IO} – угловые скорости вала ЭД, рабочей машины, исполнительного органа; F_{IO} , V_{IO} – усилие и линейная скорость исполнительного органа.

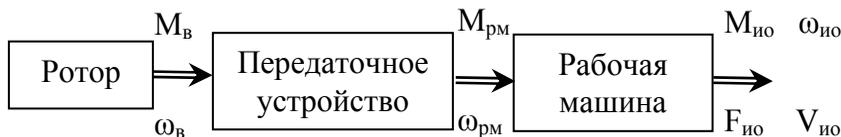


Рис.3.1. Схема механической части электропривода

В зависимости от вида передачи и конструкций рабочей машины различают (рис. 3.1):

➤ ЭП *вращательного* движения, обеспечивающий, соответственно, вращательное движение исполнительного органа РМ; выходные параметры – момент ИО механизма M_{IO} и угловая частота вращения ω_{IO} ;

➤ ЭП *поступательного* движения, обеспечивающий поступательное линейное движение ИО рабочей машины; выходные параметры – усилие F_{IO} и линейная скорость V_{IO} .

Отметим, что существует также специальный ЭП, называемый *колебательным* электроприводом, обеспечивающим *возвратно-поступательное (вибрационное)* движение (как угловое, так и линейное) исполнительного органа РМ.

В механической части ЭП действуют различные виды усилий, моментов, различающиеся характером действия. Конкретно различают статические моменты *реактивные* M_{cp} и *активные* M_{ca} .

Реактивные моменты создаются силой трения, силами сжатия, растяжения, кручения *неупругих* тел. Классическим примером здесь может служить сухое трение (рис. 3.2). Силы трения всегда противодействуют движению и при реверсе электропривода момент трения, обусловленный этими силами, также меняет направление, а функция $M_c(\omega)$ при скорости $\omega = 0$ претерпевает разрыв. Силы трения проявляются в передачах электродвигателя и рабочих машинах.

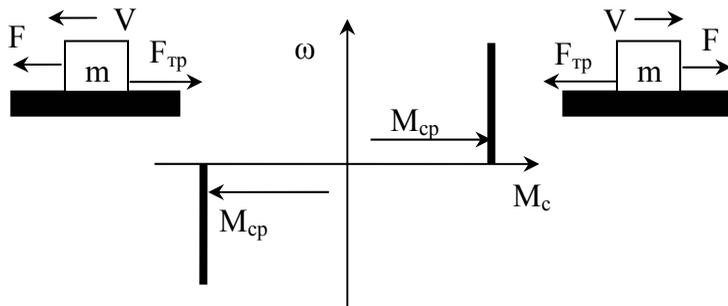


Рис. 3.2. Зависимость статического момента сил сухого трения от скорости

Активные (потенциальные) моменты создаются силой тяжести, силами сжатия, растяжения, кручения *упругих* тел. В МЧ ЭП активные моменты возникают в нагруженных элементах (валы, зубчатые зацепления и т.п.) при их деформации, поскольку механические связи не являются абсолютно жесткими. Особенности действия потенциальных моментов наглядно проявляются на примере силы тяжести. При подъеме или

спуске груза направление силы тяжести F_j остается постоянным. Иными словами, при реверсе электропривода направление активного момента M_{ca} сохраняется неизменным (рис. 3.3).

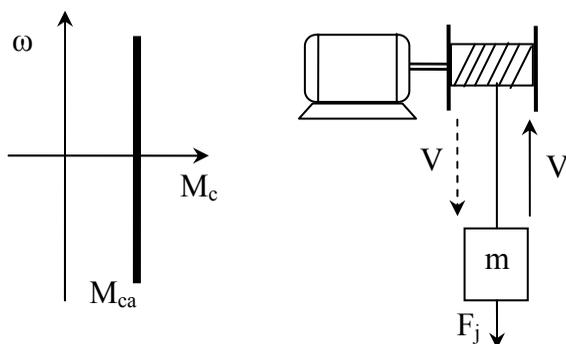


Рис. 3.3. Зависимость активного статического момента от скорости, характерная для механизмов подъема грузов

Краткий анализ видов M_c показывает, что между реактивными и активными моментами имеется существенное отличие: *реактивный момент с изменением направления движения также меняет свое направление, активный же момент сохраняет его постоянным.*

Рабочие машины, несмотря на большое многообразие конструкций и выполняемых операций, могут быть классифицированы по виду зависимости статического момента от ряда факторов. Различают укрупненно 5 групп механизмов.

К первой группе относятся механизмы, у которых статический момент не зависит от скорости вращения, то есть $M_c(\omega) = \text{const}$. Это значит, что *механическая характеристика рабочей машины* – зависимость статического момента от частоты вращения – представляет прямую, параллельную оси угловой скорости ω , и претерпевает разрыв при $\omega = 0$ для реактивных статических моментов (как показано на рис. 3.2), например, для ленточного транспортера с равномерной погонной нагрузкой.

Для активных M_c (как показано на рис. 3.3) механическая характеристика не зависит от направления движения. Типичным примером является механизм подъемника.

Вторая группа механизмов достаточно представительна [2, 3]. Здесь M_c зависит от скорости вращения РМ:

$$M_c(\omega) = M_{c0} + (M_{cн} + M_{c0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^a, \quad (3.1)$$

где M_{c0} – момент механических потерь на трение;
 $M_{cн}$ – статический момент рабочей машины при номинальной скорости вращения ω_H ;
 ω – текущая скорость вращения;
 a – коэффициент пропорциональности.

При $a = 0$ имеем $M_c(\omega) = M_{cн}$, то есть получаем механическую характеристику машин первой группы.

При $a = 1$ имеем линейную зависимость статического момента от скорости, что присуще, например, генераторам G постоянного тока, работающим на постоянное сопротивление R (рис. 3.4).

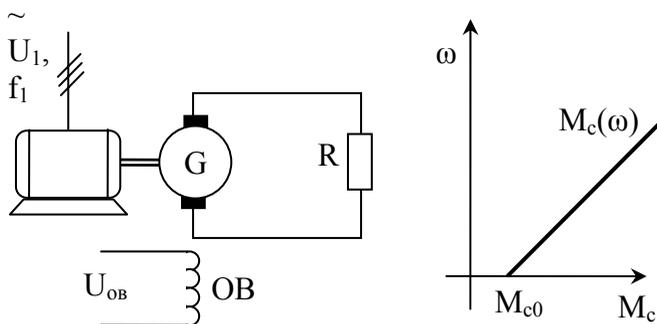


Рис. 3.4. Механическая характеристика при $a = 1$

При $a = 2$ (рис. 3.5) получаем наиболее многочисленную группу рабочих механизмов [2, 3], имеющих *вентиляторную* характеристику (вентиляторы, гребные винты, центробежные насосы и другие подобные механизмы).

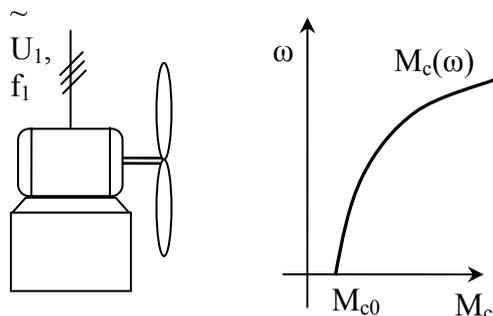


Рис. 3.5. Вентиляторная механическая характеристика

При $a = -1$ имеет место *гиперболическая* зависимость, характерная для большинства металлорежущих станков, когда с увеличением скорости подачи резца V (соответственно при этом увеличивается усилие резания) снижает скорость обработки детали ω (рис. 3.6).

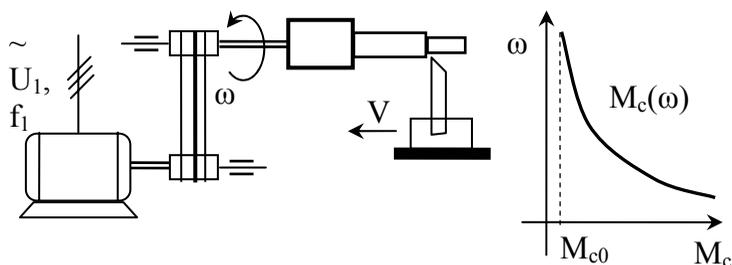


Рис. 3.6. Гиперболическая механическая характеристика

Отметим, что на практике встречаются и другие значения коэффициента a .

Третья группа механизмов – это группа машин, у которых статический момент является функцией угла поворота вала РМ α , то есть $M_c = f(\alpha)$. Это свойственно, например, шатунно-кривошипным (рис 3.7) и эксцентриковым механизмам, в которых происходит преобразование вращательного движения с частотой вращения ω в возвратно-поступательное движение со скоростью V . Рабочий ход механизма, при котором достига-

ется максимальный статический момент $M_{c_{\max}}$, имеет место, например, при $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, обратный ход с максимальным моментом $M_{c_{\max, \text{xx}}}$ – при $\pi \leq \alpha \leq 2\pi$.

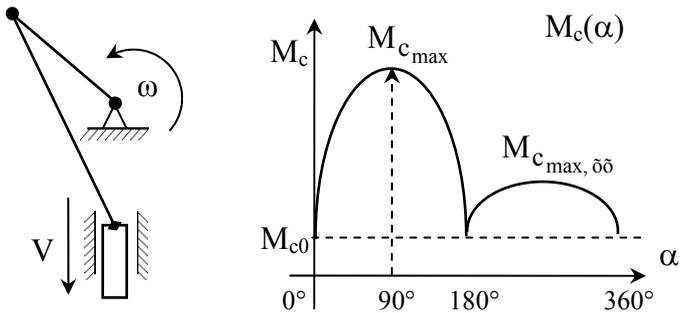


Рис. 3.7. Зависимость M_c от угла поворота кривошипа α

Четвертая группа механизмов – это группа рабочих машин, у которых M_c зависит одновременно и от угла поворота, и от скорости движения, т.е. $M_c = f(\alpha, \omega)$. Подобная зависимость наблюдается при движении электротранспорта на закругленном участке пути.

Пятая группа механизмов – группа РМ, у которых статический момент изменяется случайным образом во времени. К ней можно отнести геологические буровые станки, дробилки крупного дробления и другие подобные механизмы (рис. 3.8).

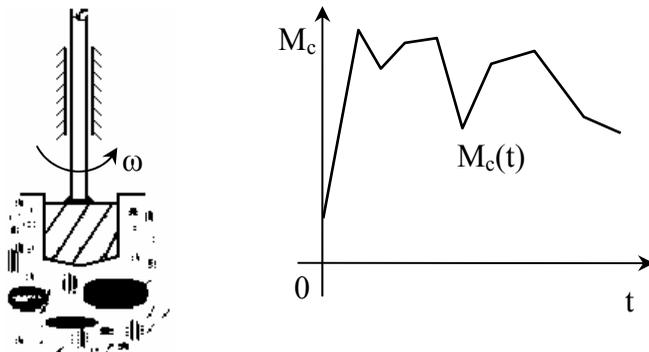


Рис. 3.8. Зависимость $M_c = f(t)$ при бурении горных пород

ЛЕКЦИЯ 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Конструкция машин постоянного тока.
2. Основные параметры и электромеханическое преобразование энергии в машинах постоянного тока.
3. Классификация электродвигателей постоянного тока.
4. Ориентировочное определение сопротивления якоря.

Электрическая машина постоянного тока (МПТ) имеет специфическую конструкцию. Схематически на примере электродвигателя П-92 она показана на рис. 4.1. Неподвижная часть (статор) содержит главные полюса 1 с катушками 2, образующие индуктор или систему возбуждения машины. Полюса равномерно распределены на внутренней поверхности станины 3, которая совмещает функции механической детали (корпуса) и активной части (ярма магнитопровода статора). Поскольку через станину (ярмо) проходит постоянный магнитный поток, не индуцирующий в ней вихревых токов, то она выполняется монолитной стальной. Сердечники главных полюсов чаще всего выполняются шихтованными: они состоят из отдельных пластин, стянутых заклепками, шпильками или др. Такое конструктивное решение используется не для ограничения вихревых токов, а скорее диктуется удобством изготовления полюса. Кроме обмоток возбуждения (ОВ) главные полюса МПТ могут содержать компенсационную обмотку, предназначенную для компенсации размагничивающего действия собственного магнитного поля якоря (реакции якоря), а также стабилизирующую обмотку, используемую для тихоходных двигателей большой мощности при необходимости временного увеличения частоты вращения в 2...2,5 раза. Для обеспечения безыскровой коммутации в машине предусмотрены добавочные полюса 4, обмотки которых включаются последовательно в цепь ротора.

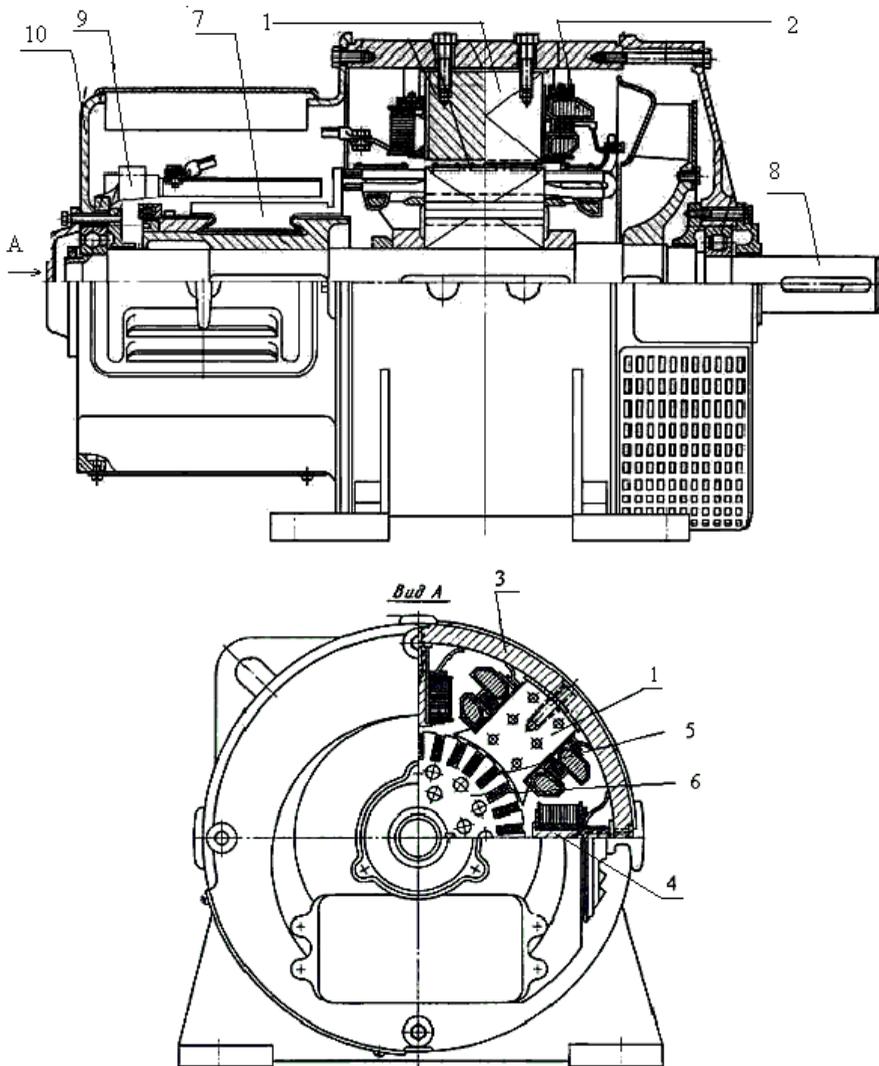


Рис. 4.1. Машина постоянного тока типа П-92

Ротор МПТ чаще называют *якорем*. Он несет главную обмотку машины, по которой течет ее основной ток. *Якорная обмотка 5* располагается в пазах *магнитопровода 6*. Выводы

обмотки соединены с *пластинами коллектора* 7. Магнитопровод и коллектор размещены на общем валу 8. Для нормальной работы машины постоянного тока пазы магнитопровода должны быть строго сориентированы относительно пластин 7.

К внешней (активной) поверхности коллектора прижимаются *токосъемные щетки*. (угольными, графитовыми, композитными и др.). Одна группа может содержать одну или несколько щеток, в зависимости от пропускаемого через контакт тока. Важное значение имеет площадь контакта (прилегание желательно обеспечить близким к 100%) и сила нажатия щетки к коллектору. Щетки устанавливаются в *щеткодержатели*, которые ориентируют и прижимают щетку. Сами же щеткодержатели размещают на специальных пальцах *траверсы* 9, смонтированной на внутренней стороне *подшипникового щита* 10. Траверса имеет возможность поворота вокруг оси машины и фиксации ее в любом выбранном положении, что позволяет при необходимости регулировать положение щеток на коллекторе из условия минимального искрения в щеточном контакте.

Машины постоянного тока чаще используются в качестве двигателей, они обладают высоким пусковым моментом, возможностью широко регулировать скорость, легко реверсируются, имеют практически линейные регулировочные характеристики, экономичны. Эти достоинства МПТ часто ставят их вне конкуренции в приводах, требующих широких и точных регулировок. Важным преимуществом МПТ является также возможность их регулирования по слаботочным цепям возбуждения. Тем не менее, используют эти машины только там, где невозможно подобрать равноценную замену. Связано это с наличием щеточно-коллекторного узла, который обуславливает большинство недостатков МПТ: повышает стоимость, сокращает ресурс работы, создает радиопомехи, акустический шум. Искрение под щетками ускоряет износ щеток и пластин коллектора. Продукты износа покрывают внутреннюю полость

машины тонким проводящим слоем, ухудшая изоляцию токопроводящих цепей.

Работа электродвигателя и генератора постоянного тока характеризуется следующими основными величинами:

- M – электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;

- M_c – момент сопротивления (нагрузка, статический момент), создаваемый производственным механизмом, Н·м, обычно является *приведенным* к валу электродвигателя (формулы приведения рассматриваются в [лекции 14](#));

- $I_{\text{я}}$ – ток якоря электродвигателя, А;

- U – напряжение, приложенное к якорной цепи, В;

- E – электродвижущая сила (ЭДС) машины постоянного тока (для электродвигателя ее называют *противо-ЭДС*, так как в электродвигателе она направлена навстречу напряжению U и препятствует протеканию тока), В;

- Φ – магнитный поток, создаваемый в электродвигателе при протекании тока возбуждения по ОВ, Вб;

- $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря, Ом;

- ω – угловая частота (скорость) вращения якоря ЭД, с^{-1} (вместо ω часто употребляется величина n , об/мин),

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}. \quad (4.1)$$

- P – мощность двигателя, Вт, различают механическую (полезную) мощность на валу ЭД $P_{\text{мех}}$

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \omega, \quad (4.2)$$

и полную (электрическую) мощность

$$P_{\text{эл}} = U \cdot I_{\text{я}}; \quad (4.3)$$

- η – коэффициент полезного действия МПТ, равный отношению полезной мощности к полной;

- λ – коэффициент перегрузочной способности, различают перегрузочную способность по току λ_I и по моменту λ_M :

$$\lambda_I = I_{\max}/I_n ; \quad \lambda_M = M_{\max}/M_n .$$

Взаимосвязь параметров МПТ отражена в следующих четырех формулах:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_c}{J} , \quad (4.4)$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \omega , \quad (4.5)$$

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}} , \quad (4.6)$$

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_{я} , \quad (4.7)$$

где J – момент инерции системы электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 $d\omega/dt$ – угловое ускорение вала электродвигателя, с^{-1} ;
 K – конструктивная постоянная электродвигателя,

$$K = \frac{p_n \cdot N}{2\pi \cdot a} , \quad (4.8)$$

где p_n – число пар главных полюсов;

N – число активных проводников якоря;

a – число пар параллельных ветвей якоря.

Формула (4.4) является видоизмененной записью основного уравнения движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (4.9)$$

Отметим, что основное уравнение движения является аналогом закона Ньютона $a = F/m$. Разница лишь в том, что для вращательного движения линейное ускорение заменяется угловым ускорением $\varepsilon = d\omega/dt$, масса m – моментом инерции J , а сила F заменяется динамическим моментом $M_{\text{дин}}$, равным разности момента электродвигателя M и статического момента M_c .

Формула (4.5) отражает принцип действия генератора постоянного тока, основанный на законе электромагнитной индукции. Для того, чтобы появилась ЭДС, достаточно вращать якорь с некоторой скоростью ω в магнитном потоке Φ .

ЭДС E в машине получить невозможно, если отсутствует хотя бы одна из величин: ω (электродвигатель не вращается) или Φ (машина не возбуждена).

Формула (4.6) показывает, что ток $I_{я}$ в якорной цепи протекает в двигателе под действием приложенного к якору напряжения U . Величина этого тока ограничивается вырабатываемой при вращении электродвигателя противо-ЭДС и суммарным сопротивлением якорной цепи.

Формула (4.7) фактически иллюстрирует принцип действия ЭД постоянного тока, основанный на законе взаимодействия тока в проводнике и магнитного поля (закон Ампера). Для возникновения вращающего момента необходимо создать магнитный поток Φ и пропустить ток $I_{я}$ по обмотке якоря.

Приведенные формулы описывают все основные процессы в электродвигателе постоянного тока.

МПТ различают по способу включения обмотки главных полюсов (*обмотки возбуждения*) в электрическую цепь.

1. Машины постоянного тока с *независимым возбуждением*. Суть термина в том, что электрическая цепь обмотки возбуждения (ОВ) является независимой от силовой цепи ротора ЭД. Для генераторов это практический единственный вариант схемного решения, т.к. по цепи возбуждения происходит управление работой МПТ. Возбуждение в двигателях постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) может быть выполнена на постоянных магнитах. ДПТ НВ с традиционной ОВ имеют два канала управления – напряжением ротора и напряжением обмотки возбуждения. ДПТ НВ являются самыми массовыми электрическими машинами постоянного тока.

2. Электродвигатели с *параллельным возбуждением* (ДПТ ПВ). Характеризуются включением ОВ параллельно с цепью якоря ЭД. По своим характеристикам близки к ДПТ НВ.

3. ЭД с *последовательным возбуждением* (ДПТ Посл.В). Обмотка статора включается последовательно с обмоткой ротора, что обуславливает зависимость магнитного потока от то-

ка якоря (фактически – от нагрузки). Имеют нелинейные характеристики, на практике используются редко.

4. Двигатели *со смешанным возбуждением* – являются компромиссным вариантом ЭД с последовательным и параллельным возбуждением. Соответственно в ЭД присутствуют две ОВ – параллельная и последовательная.

Если неизвестна величина сопротивления обмотки якоря, то можно воспользоваться приближенной формулой. Предполагая, что половина потерь мощности связана с потерями в меди обмотки якоря, запишем формулу

$$I_n^2 \cdot R_{я} \approx 0,5 \cdot (1-\eta) \cdot U_n \cdot I_n, \quad (4.10)$$

где η – КПД электродвигателя, $\eta = \frac{M_n \cdot \omega_n}{U_n \cdot I_n}$.

Из формулы находим

$$R_{я} \approx \frac{(1-\eta) \cdot U_n}{2 \cdot I_n}; \quad \text{или} \quad R_{я} \approx \frac{U_n \cdot I_n - P_n}{2 \cdot I_n^2}. \quad (4.11)$$

ЛЕКЦИЯ 5

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Естественные электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).
2. Жесткость статической характеристики.
3. Система относительных единиц.
4. Механические и электромеханические характеристики ДПТ НВ в относительных единицах.

Прежде чем перейти к рассмотрению характеристик ДПТ НВ, дадим некоторые определения.

Механическими характеристиками (МХ) двигателя называются зависимости установившейся частоты вращения от вращающего момента – $n = f_1(M)$ или $\omega = f_2(M)$.

Электромеханическими характеристиками (ЭМХ) двигателя называются зависимости установившейся частоты вращения от тока – $n = f_3(I)$ или $\omega = f_4(I)$.

Как МХ, так и ЭМХ могут быть представлены и обратными функциями $M = \varphi_1(n)$ или $I = \varphi_4(\omega)$.

Характеристики называют *естественными*, если они получены при номинальных условиях питания (при номинальных напряжении и частоте вращения), номинальном возбуждении и отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря. Характеристики двигателя называются *искусственными* при изменении любого из перечисленных выше факторов.

Для вывода электромеханической и механической характеристик двигателя постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением рассмотрим простейшую схему включения двигателя (рис. 5.1).

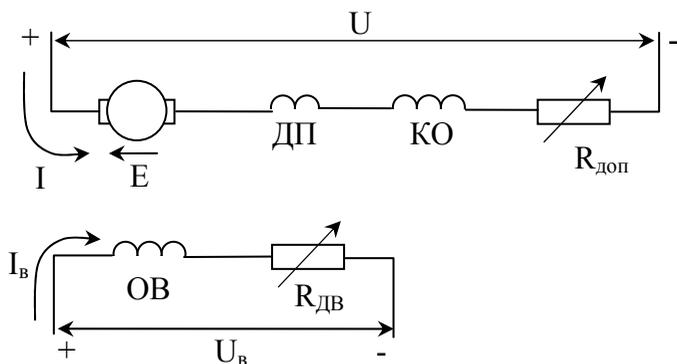


Рис. 5.1. Схема электрическая принципиальная двигателя постоянного тока независимого возбуждения

К якорию электродвигателя прикладывается напряжение сети постоянного тока $U_c = U$, которое в установившемся режиме уравнивается ЭДС (E) двигателя и падением напряжения в цепи якоря ($I_a \cdot R_{яц}$).

$$U = E + I_a \cdot R_{яц}, \quad (5.1)$$

где $R_{яц} = R_a + R_{доп} + R_{дп} + R_{ко}$ – полное сопротивление цепи якоря, Ом;

R_a – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{доп}$ – добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом;

$R_{дп}$, $R_{ко}$ – соответственно, сопротивления обмоток дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, Ом.

Таблица 5.1

Класс изоляции	Рабочая температура, °С
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	> 180

Необходимо отметить, что для продолжения расчетов необходимо привести сопротивление обмоток ЭД к рабочей температуре, которая определяется классом изоляции (табл. 5.1) и учесть потери в щеточно-коллекторном узле.

Приведение сопротивления обмоток в цепи якоря

к рабочей температуре t , °C, осуществляется по следующей формуле:

$$R_{ящ_t} = R_{ящ_{t_0}} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta), \quad (5.2)$$

где $R_{ящ_{t_0}}$ – суммарное сопротивление обмоток при температуре t_0 , определяемое по паспортным данным, Ом;

α – температурный коэффициент, $(^\circ\text{C})^{-1}$, для меди обычно принимают $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$;

θ – разность между рабочей температурой и t_0 , °C.

Добавочное сопротивление в щеточно-коллекторном узле можно учесть как отношение падения напряжения на контакте “щетка – коллектор” $\Delta U_{щ} = 2$ В к номинальному току якоря.

Подставив в уравнение (5.1) значение E согласно (4.5) и произведя соответствующие преобразования относительно частоты вращения ω , получим электромеханическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

$$\omega = \frac{U - I_{я} \cdot R_{ящ}}{K\Phi_H} = \frac{U}{K\Phi_H} - \frac{R_{ящ}}{K\Phi_H} \cdot I_{я}. \quad (5.3)$$

Выразив величину тока якоря через электромагнитный момент (4.7) и подставив значение тока в уравнение (5.3), найдем механическую характеристику двигателя постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi_H} - M \cdot \frac{R_{ящ}}{(K\Phi_H)^2}. \quad (5.4)$$

Анализируя уравнения (5.3) и (5.4), видим, что математически это уравнения прямой линии, пересекающей ось скоростей в точке ω_0 .

Величина $\omega_0 = U/(K \cdot \Phi)$ – называется *скоростью идеального холостого хода*, а соотношения

$$I_{я} \cdot \frac{R_{ящ}}{K\Phi} = M \cdot \frac{R_{ящ}}{(K\Phi)^2} = \Delta\omega_c \quad (5.5)$$

называют *статическим перепадом скорости* относительно ω_0 , вызванное наличием статического момента на валу двигателя.

Правомерна следующая формула

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c . \quad (5.6)$$

Для построения естественной механической характеристики (ЕМХ) необходимо найти две точки. Одна из них определяется из паспортных данных двигателя для номинальных значений n_n и M_n :

$$\omega_n = \pi \cdot n_n / 30 = 0,105 \cdot n_n, \quad M_n = P_n / \omega_n ,$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, Вт;

n_n – номинальная частота вращения ЭД, об/мин.

Вторая точка соответствует идеальному холостому ходу, когда $I = 0$; $M = 0$. Ее можно найти из уравнения (5.3) при подстановке паспортных данных двигателя:

$$\omega_0 = \frac{U_n \cdot \omega_n}{U_n - I_n \cdot R_{я}} . \quad (5.7)$$

Построение естественной электромеханической характеристики (ЕЭМХ) происходит аналогичным образом с использованием паспортного значения номинального тока I_n .

ЕМХ можно построить, зная ω_0 и наклон характеристики, представляющей собой прямую линию. Величину наклона определяют по производной $dM/d\omega = \beta_c$, получившей название *статической жесткости механической характеристики*

$$\beta_c = \frac{dM}{d\omega} = - \frac{(K\Phi)^2}{R_{яц}} . \quad (5.8)$$

На практике используют модуль статической жесткости $\beta = |\beta_c|$. Величина β зависит от сопротивления якорной цепи и магнитного потока возбуждения. С учетом сказанного уравнение механической характеристики можно записать как

$$\omega = \omega_0 - M / \beta . \quad (5.9)$$

Сравнить различные по мощности, току, моменту, числу пар полюсов электрические двигатели позволяет представление характеристик ЭД в *относительных единицах*.

Система относительных единиц достаточно часто используется в технических расчетах и основана на принятии некоторой произвольной величины за *базовую*. Абсолютные значения параметров одной физической природы k_i , отнесенные к базовой величине $k_{баз}$, можно сравнивать между собой. В относительных единицах

$$k_i^{\circ} = \frac{k_i}{k_{баз}}. \quad (5.10)$$

Для анализа характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения за базовые величины примем:

- U_H – номинальное напряжение;
- I_H – номинальный ток двигателя;
- M_H – номинальный момент двигателя;
- ω_0 – скорость идеального холостого хода;
- Φ_H – номинальный магнитный поток.

Базовое значение сопротивления обычно определяют как

$$R_{баз} = U_H / I_H, \quad (5.11)$$

где $R_{баз}$ имеет следующий физический смысл – это сопротивление цепи якоря, которое ограничивает ток якоря до номинального значения в заторможенном состоянии ($\omega = 0$) и приложенном номинальном напряжении.

Чтобы выразить электромеханическую характеристику (5.3) в относительных единицах, необходимо разделить правую и левую части уравнения на скорость идеального холостого хода ω_0 ЭМХ. В результате получим выражение

$$\omega^{\circ} = \frac{U^{\circ}}{\Phi^{\circ}} - I^{\circ} \cdot \frac{R_{яц}^{\circ}}{\Phi^{\circ}}, \quad (5.12)$$

$$\text{где } \overset{\circ}{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad \overset{\circ}{U} = \frac{U}{U_H}; \quad \overset{\circ}{\Phi} = \frac{\Phi}{\Phi_H}; \quad \overset{\circ}{I} = \frac{I}{I_H}; \quad \overset{\circ}{R}_{\text{яц}} = \frac{R_{\text{яц}}}{R_{\text{баз}}}.$$

Уравнение механической характеристики в относительных единицах можно получить из уравнения (5.12) после под-

становки в него выражения $\overset{\circ}{I} = \frac{\overset{\circ}{M}}{\overset{\circ}{\Phi}}$, где $\overset{\circ}{M} = \frac{M}{M_H}$.

Естественные характеристики ДПТ НВ в относительных единицах примут вид:

а) электромеханическая

$$\overset{\circ}{\omega} = 1 - \overset{\circ}{I} \cdot \overset{\circ}{R}_{\text{яц}}, \quad (5.13)$$

б) механическая

$$\overset{\circ}{\omega} = 1 - \overset{\circ}{M} \cdot \overset{\circ}{R}_{\text{яц}}. \quad (5.14)$$

Статический перепад скорости $\Delta \overset{\circ}{\omega}_c = \overset{\circ}{I} \cdot \overset{\circ}{R}_{\text{яц}} = \overset{\circ}{M} \cdot \overset{\circ}{R}_{\text{яц}}$,

откуда следует, что $\overset{\circ}{I} = \overset{\circ}{M}$. Таким образом, *в относительных единицах естественные механическая и электромеханическая характеристики совпадают.*

При $M = M_H$ и $I = I_H$ из уравнений (5.13) и (5.14) видно, что статический перепад при номинальной нагрузке равен сопротивлению цепи якоря в относительных единицах, то есть

$\Delta \overset{\circ}{\omega}_{сн} = \overset{\circ}{R}_{\text{яц}}$. Величина $\overset{\circ}{R}_{\text{яц}}$ зависит от мощности двигателя и находится в пределах $0,2 \dots 0,02$ для ДПТ НВ мощностью от 0,5 до 1000 кВт. Зная относительное сопротивление якоря, нетрудно определить ток короткого замыкания в относительных

единицах $\overset{\circ}{I}_k = \overset{\circ}{U} / \overset{\circ}{R}_{\text{яц}}$, в абсолютных единицах этот ток равен

$$I_k = I_k \cdot I_H.$$

ЛЕКЦИЯ 6

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Искусственные электромеханические (ИЭМХ) и механические (ИМХ) характеристики ДПТ НВ при изменении сопротивления ротора.
2. Искусственные электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ при изменении магнитного потока.
3. Искусственные электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ при изменении питающего напряжения.

Реостатное регулирование частоты вращения осуществляется путем введения в цепь якоря дополнительных активных сопротивлений – резисторов, т.е. $R_{яц} = (R_{я} + R_{дя}) = \text{var}$ при $U = U_n$, $\Phi = \Phi_n$. Как видно из уравнения механической характеристики (5.4), при варьировании величины добавочного сопротивления $R_{дя}$ в цепи якоря скорость идеального холостого хода ω_0 остается постоянной, изменяется лишь модуль статической жесткости β , а с ним и жесткость (крутизна) характеристики (рис. 6.1).

Например, при введении добавочного резистора сопротивлением $R_{дя} = R_{я}$ модуль статической жесткости искусственной механической характеристики (ИМХ) $\beta_{и}$ в два раза меньше, чем для естественной характеристики β_e , т.е. $\beta_{и} = 0,5 \cdot \beta_e$. Соответственно в два раза возрастет статический перепад скорости $\Delta\omega_{ни} = \Delta\omega_{не} + \Delta\omega_{R_{дя}} = 2 \cdot \Delta\omega_{не}$.

В относительных единицах реостатную механическую характеристику можно записать

$$\overset{\circ}{\omega} = 1 - \overset{\circ}{M} \cdot \overset{\circ}{R}_{яц} = 1 - \overset{\circ}{M} \cdot \left(\overset{\circ}{R}_{яц} + \overset{\circ}{R}_{дя} \right) \quad (6.1)$$

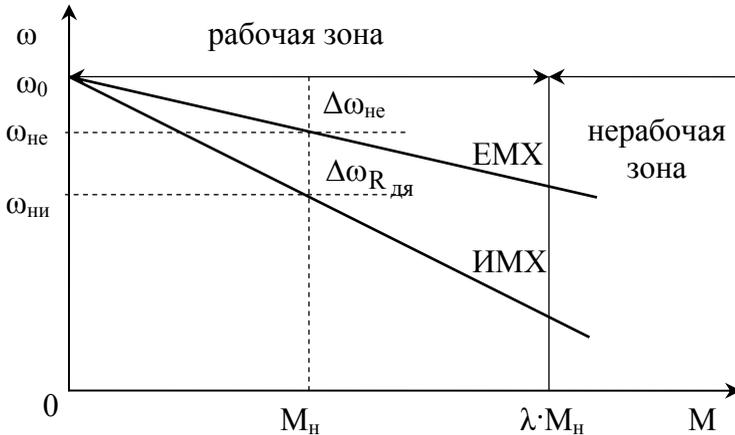


Рис. 6.1. Искусственные механические характеристики при введении добавочного сопротивления в цепь ротора двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При номинальном моменте или токе

$$\overset{\circ}{\omega}_{ни} = 1 - \overset{\circ}{R}_{яц} = 1 - \left(\overset{\circ}{R}_{я} + \overset{\circ}{R}_{д\ddot{a}} \right) = \overset{\circ}{\omega}_{не} - \overset{\circ}{R}_{д\ddot{a}} = \overset{\circ}{\omega}_{не} - \Delta \overset{\circ}{\omega}_{R_{д\ddot{a}}}$$

где $\overset{\circ}{\Delta \omega}_{R_{д\ddot{a}}}$ – статический перепад скорости, обусловленный наличием добавочного резистора.

По условию допустимого нагрева ток якоря не должен превышать номинальное значение, т.е. $I_{я\text{ доп}} = I_n$, тогда $M_{\text{доп}} = K \cdot \Phi_n \cdot I_{я\text{ доп}} = K \cdot \Phi_n \cdot I_n = M_n$. Если это условие соблюдается, реостатное регулирование осуществляется *при постоянном допустимом статическом моменте*. Механические характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании имеют ступенчатый вид, диапазон регулирования достигает $D = 2 - 2,5$. *Диапазоном регулирования* называют отношение максимальной частоты вращения (она находится на естественной механической характеристике) к минимальной, соответствующей реостатной характеристике.

Потребляемая мощность при $I_{я} = I_{н}$ составляет

$$P_1 = U_{н} \cdot I_{я} = K\Phi_{я} \cdot \omega_0 \cdot I_{н} = \omega_0 \cdot M_{н} = \text{const} . \quad (6.2)$$

Механическая мощность на валу двигателя равна

$$P_{\text{мех}} = \omega \cdot M_{н} , \quad (6.3)$$

а КПД двигателя в этом случае будет определяться по формуле

$$\eta = P_{\text{мех}}/P_1 = (\omega \cdot M_{н})/(\omega_0 \cdot M_{н}) = \omega/\omega_0 . \quad (6.4)$$

Регулирование частоты вращения при *изменении магнитного потока* осуществляется преимущественно за счет *ослабления* магнитного потока Φ возбуждения двигателя, т.е. за счет уменьшения тока возбуждения $i_{в}$. Это связано с нелинейной зависимостью Φ от $i_{в}$ (рис. 6.2). Приращение тока возбуждения $\Delta i_{в}$ от точки 1 номинального режима работы в сторону увеличения $i_{в}$ дает меньшее приращение потока $\Delta\Phi''$, (точка 1'') чем уменьшение $i_{в}$ (точка 1', приращение потока $\Delta\Phi'$). К тому же увеличение $i_{в}$ приводит к перегреву обмотки возбуждения и, следовательно, может стать причиной аварии двигателя.

При уменьшении магнитного потока обычно соблюдаются условия: $U = U_{н}$; $R_{\text{дл}} = 0$. В этом случае модуль статической жесткости (см. формулу (5.8)) изменяется следующим обра-

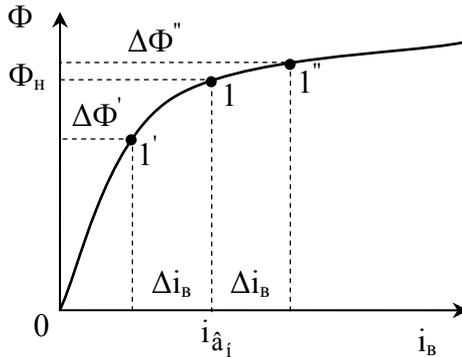


Рис. 6.2. Зависимость потока от тока возбуждения в двигателях постоянного тока

ЗОМ:

$$\frac{\beta_{и}}{\beta_{е}} = \left[\frac{(K\Phi)^2}{R_{я}} \right] / \left[\frac{(K\Phi_{н})^2}{R_{я}} \right] = \left(\frac{\Phi}{\Phi_{н}} \right)^2 \Rightarrow \beta_{и} = \beta_{е} \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_{н}} \right)^2, \quad (6.5)$$

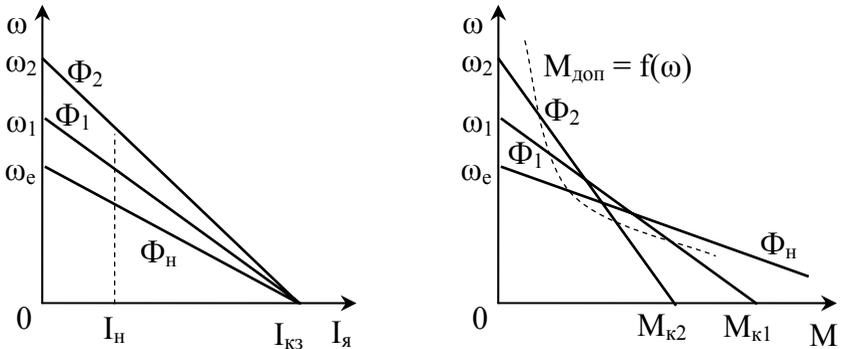
а скорость идеального холостого хода

$$\frac{\omega_{0и}}{\omega_{0е}} = \left[\frac{U}{K\Phi} \right] / \left[\frac{U}{K\Phi_{н}} \right] = \frac{\Phi_{н}}{\Phi} \Rightarrow \omega_{0и} = \frac{\omega_{0е}}{\frac{\Phi}{\Phi_{н}}}. \quad (6.6)$$

Из уравнения (5.3) электромеханической характеристики следует, что с уменьшением магнитного потока, хотя и возрастает $\omega_{0и}$, но все электромеханической характеристики имеют общую точку $I_{кз} = U_{н} / R_{я}$ при $\omega = 0$ (рис. 6.3, а).

Механические характеристики (рис. 6.3, б) отличаются от ЭМХ тем, что при $\omega = 0$ имеют разные значения моментов короткого замыкания $M_{кi} = K\Phi_i \cdot I_{кз}$ вследствие разной величины магнитного потока: $M_{кe} > M_{к1} > M_{к2}$.

Искусственные электромеханические и механические характеристики в относительных единицах отличаются друг от друга (формулы (6.7) и (6.8)).



$$\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_{н} \quad M_{кe} > M_{к1} > M_{к2}$$

а)

б)

Рис. 6.3. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ при ослаблении магнитного потока

$$\overset{\circ}{\omega} = \frac{1}{\overset{\circ}{\Phi}} - \left(\overset{\circ}{I} \cdot \overset{\circ}{R}_{яц} \right) / \left(\overset{\circ}{\Phi} \right); \quad (6.7)$$

$$\overset{\circ}{\omega} = \frac{1}{\overset{\circ}{\Phi}} - \left(\overset{\circ}{M} \cdot \overset{\circ}{R}_{яц} \right) / \left(\overset{\circ}{\Phi} \right)^2. \quad (6.8)$$

Регулирование скорости изменением магнитного потока происходит при *постоянной мощности* или по условию нагрева допускается при токах, не превышающих I_H . Из уравнения ЭМХ (5.3) можно определить значение КФ:

$$КФ = \frac{U_H - I_H \cdot R_{я}}{\omega}, \quad (6.9)$$

тогда величина допустимого момента будет равна

$$M_{доп} = КФ \cdot I_H = (U_H - I_H \cdot R_{я}) \cdot \frac{I_H}{\omega}. \quad (6.10)$$

В соответствии с уравнением (6.10) зависимость момента двигателя от частоты вращения $M = f(\omega)$ представляет собой гиперболу. На рис. 6.3, б подобная гипербола показана для предельного момента $M_{доп}$ при регулировании скорости ЭД ослаблением магнитного потока.

Для регулирования частоты вращения ДПТ НВ *изменением питающего напряжения* необходимы регулируемые источники напряжения. Из уравнений МХ и ЭМХ видно, что с регулированием напряжения связано изменение скорости идеального холостого хода $\omega_0 = U_H / (КФ_H)$ при сохранении жесткости характеристик $\beta = (КФ)^2 / R_{яц} = \beta_e$, поскольку $\Phi = \Phi_H$ и добавочное сопротивление в цепи якоря отсутствует. Это позволяет существенно расширить диапазон регулирования. Другим достоинством способа является регулирование в маломощных цепях управляющих устройств, таких как обмотка возбуждения системы Г-Д, угол запираания вентиля в транзисторных преобразователях (система ТП-Д), коэффициент заполнения импульса напряжения в широтно-импульсных преобразователях.

Регулирование частоты вращения идет, как правило, вниз от основной скорости. Искусственные характеристики при изменении U будут иметь вид прямых, показанных на рис. 6.4.

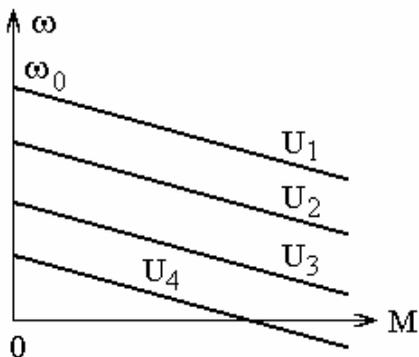


Рис. 6.4. Механические характеристики ДПТ НВ при изменении питающего напряжения питания

Искусственные механические и электромеханические характеристики в относительных единицах при вариации питающего напряжения принимают вид:

$$\overset{\circ}{\omega} = \overset{\circ}{U} - \left(\overset{\circ}{M} \cdot \overset{\circ}{R}_{яц} \right); \quad (6.11)$$

$$\overset{\circ}{\omega} = \overset{\circ}{U} - \left(\overset{\circ}{I} \cdot \overset{\circ}{R}_{яц} \right), \quad (6.12)$$

и они одинаковы благодаря постоянству магнитного потока ($\Phi = \Phi_n$).

ЛЕКЦИЯ 7

ЭНЕРГЕТИКА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА, РЕЖИМЫ ТОРМОЖЕНИЯ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Режимы работы двигателя постоянного тока независимо возбуждения и направление потоков мощности.
2. Рекуперативное торможение.
3. Динамическое торможение.
4. Торможение противовключением.

В процессе функционирования электрической машины имеют место *двигательный* и *тормозной* режимы работы. Наиболее простым способом определения режима работы является *анализ направлений электромагнитного момента и частоты вращения (скорости) двигателя*. Если M и ω направлены согласно, то электрическая машина работает в *двигательном* режиме, в противном случае – в *тормозном* режиме.

Рассмотрим двигательный режим работы ($0 < \omega < \omega_0$), показанный на рис. 7.1.

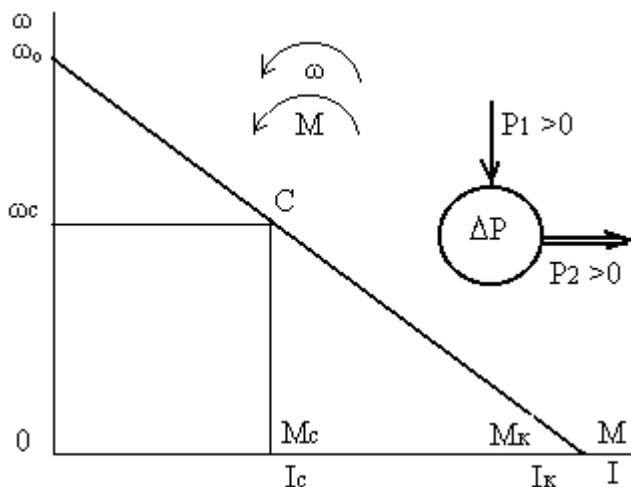


Рис.7.1. Работа ДПТ НВ в двигательном режиме

Уравнение электрического равновесия

$$U = I \cdot R_{\text{яц}} + E, \quad (7.1)$$

умножим на ток якоря с учетом его знака $I > 0$ и получим

$$U \cdot I = I^2 \cdot R_{\text{яц}} + E \cdot I, \quad (7.2)$$

где $U \cdot I = P_1 > 0$ – электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети;

$E \cdot I = K\Phi \cdot \omega \cdot I = M \cdot I > 0$ – электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$, с учетом принимаемых на практике допущений, равна мощности на валу двигателя P_2 ($P_{\text{эм}} \sim P_2$);

$I^2 \cdot R_{\text{яц}} = \Delta P$ – потери электрической мощности, обусловленные процессом электромеханического преобразования электрической энергии.

Принимая во внимания сделанные пояснения, уравнение баланса электрической мощности можно представить в следующем виде

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad (7.3)$$

в котором знаки перед параметрами свидетельствуют:

- при $P_1 > 0$ двигатель потребляет из сети мощность, в противном случае – отдает;
- $P_2 > 0$ – механическая мощность направлена к рабочей машине (*прямой поток мощности*), при $P_2 < 0$ мощность направлена от РМ к двигателю (*обратный поток мощности*);
- $\Delta P > 0$ – энергия потерь электрической мощности всегда положительная и выделяется в обмотках электрической машины, вызывая их нагрев.

При $\omega = \omega_0$, когда ЭДС якоря равна $E_0 = K\Phi \cdot \omega_0 = U$, электромеханического преобразования не происходит в виду отсутствия тока якоря ($I = 0$), поэтому электромагнитный момент $M = K\Phi \cdot I$ также равен нулю.

В режиме короткого замыкания, когда ток якоря равен току короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, электромеханическое преобразование энергии также не происходит, поскольку $\omega = 0$, и вся

потребляемая из сети мощность $U \cdot I_{кз}$ идет на нагрев двигателя. Сказанное относится и к работе двигателя в третьем квадранте. Таким образом, электрическая машина работает в двигательном режиме в первом и третьем квадрантах.

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения характерны три вида электрического торможения:

1. Генераторное (рекуперативное) торможение.
2. Динамическое торможение.
3. Торможение противовключением.

Условием *генераторного (рекуперативного)* торможения является $\omega > \omega_0$. При этом ЭДС обмотки якоря E будет больше приложенного напряжения сети. Тогда ток $I_{я} = (U_c - E) / R_{яц}$ изменит направление, а, следовательно, поменяет направление момент, который при этом становится тормозным

$$M_{Г} = -K \cdot \Phi_n \cdot I_{я} . \quad (7.4)$$

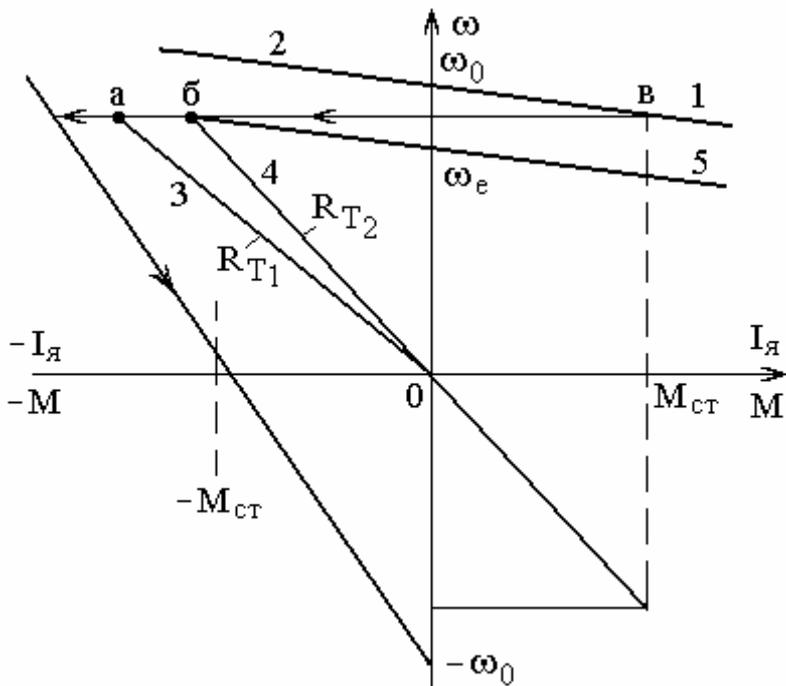
Уравнение ЭМХ характеристики двигателя постоянного тока в режиме рекуперативного торможения получим из уравнения (5.3) после учета направления тока якоря (знак "-" в формуле (5.3) меняется на знак "+"):

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} + I_{я} \cdot \frac{R_{яц}}{K\Phi} . \quad (7.5)$$

Сравнивая уравнения (5.3) и (7.5) видим, что характеристики проходят при $I_{я} = 0$ через ω_0 и ЭМХ ДПТ НВ в режиме рекуперативного торможения являются продолжением двигательного режима.

В режим рекуперативного торможения, например, попадает двигатель, к которому приложен момент больший по абсолютному значению и противоположный по направлению электромагнитному моменту ЭД. Или при ступенчатом снижении питающего напряжения на обмотке якоря ДПТ НВ наблюдается генераторное торможение.

На рис. 7.2 показаны различные характеристики ДПТ НВ в режимах торможения. Характеристика (кривая) 1 является



- 1 – двигательный режим; 2 – рекуперативное торможение;
- 3, 4 – динамическое торможение при $R_{T1} < R_{T2}$;
- 5 – двигательный режим при $U < U_n$

Рис. 7.2. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ в режимах торможения исходной статической характеристикой работы двигателя постоянного тока до начала режимов торможения. Характеристика 2, являющаяся продолжением кривой 1, иллюстрирует первый пример для рекуперативного торможения. Характеристика 5 – второй: при изменении напряжения питания рабочей характеристикой ЭД становится кривая 5, переход осуществляется из точки **в** в точку **б**, далее до скорости идеального холостого хода электрическая машина находится в режиме гене-

роторного торможения, затем, если статический момент является активным, МПТ вновь перейдет в двигательный режим.

Уравнение электрического равновесия для режима рекуперативного торможения

$$U = (-I) \cdot R_{яц} + E, \quad (7.6)$$

умножим на ток якоря с учетом его знака $I < 0$. Получим

$$U \cdot (-I) = I^2 \cdot R_{яц} + E \cdot (-I). \quad (7.7)$$

Тогда баланс мощностей примет вид (рис. 7.3)

$$-P_1 = \Delta P - P_2, \quad (7.8)$$

где $P_1 < 0$ означает, что механическая мощность после электромеханического преобразования энергии возвращается в сеть в виде электрической мощности;

$P_2 < 0$ означает, что к валу ЭД приложена механическая мощность *внешнего* источника механической энергии.

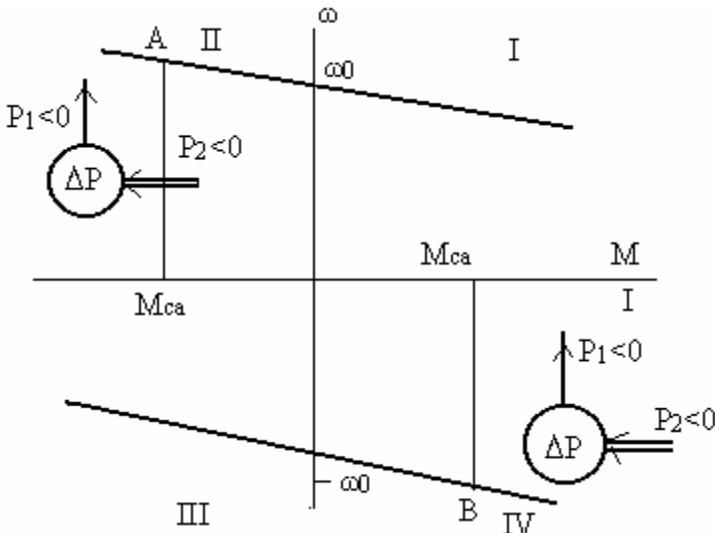


Рис. 7.3. Характеристики ДПТ НВ при рекуперативном торможении

Для динамического торможения ДПТ НВ известны два способа реализации:

1) с независимым возбуждением, когда обмотка возбуждения питается от постоянного источника;

2) с самовозбуждением, когда обмотка возбуждения подключается к якорю (применяется в качестве аварийного при отключении источников питания).

Условия реализации динамического торможения:

1. якорь отключается от питающей сети;
2. после отключения от сети якорь замыкается на добавочное сопротивление (рис. 7.4).

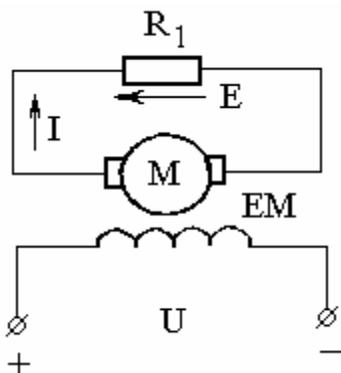


Рис. 7.4. Электрическая схема реализации динамического торможения в ДПТ НВ

В режиме динамического торможения источником тока является ЭДС якоря E :

$$I_{я} = I_{дт} = -E/R_{яц}, \quad (7.9)$$

т.е. ток меняет свое направление и создает тормозной момент, работая во втором квадранте. Тогда электро-механическая характеристика ДПТ НВ находится из основного уравнения (5.3) при $U = 0$

$$\omega = -\frac{I_{я} \cdot R_{яц}}{K\Phi}, \quad (7.10)$$

где $R_{яц} = R_{я} + R_{т}$ представляет прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 7.2 прямые 3 и 4, рис. 7.5).

Добавочное сопротивление вводят для ограничения величины тока якоря по условиям коммутации или по допустимым ускорениям. Положим, например, что сопротивление яко-

ря в относительных единицах составляет $\overset{\circ}{R}_{яц} = 0.1$, тогда при но-

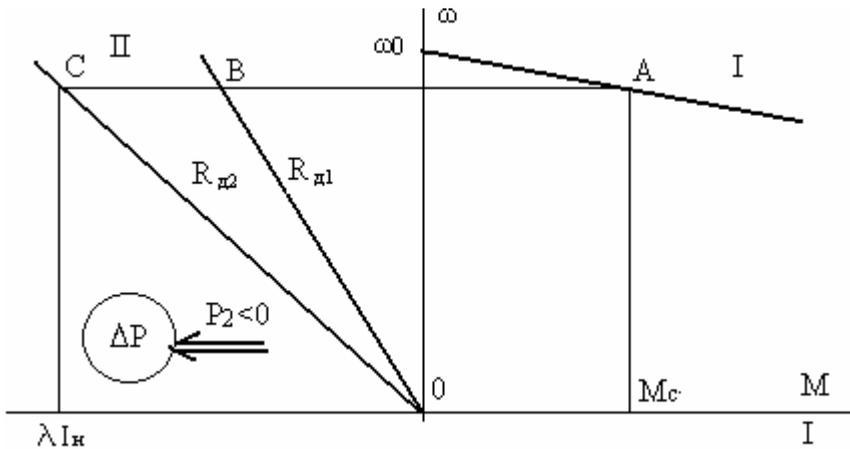


Рис. 7.5. Характеристики ДПТ НВ в режиме динамического торможения

минальном токе нагрузки в двигательном режиме в якоре наводится ЭДС $\overset{\circ}{E} = 1 - \overset{\circ}{R}_{яц} = 1 - 0.1 = 0.9$. Если после отключения от источника якорь просто замкнуть, то по нему будет протекать в начальный момент времени ток $\overset{\circ}{I}_{нач} = \overset{\circ}{E} / \overset{\circ}{R}_{яц} = 0.9 / 0.1 = 9$, то есть $I_{нач} = 9 \cdot I_n$, что недопустимо по коммутационным способностям двигателя. Добавочное сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_{д2} = E / I_{доп} - R_{яц}, \quad (7.11)$$

где $I_{доп}$ – допустимое значение тока по наиболее жесткому требованию, по коммутационной способности $I_{доп} = \lambda \cdot I_n$.

Интенсивность торможения выше при большем значении тока, и, следовательно, тормозного момента электродвигателя (рис. 7.5, $R_{д2} < R_{д1}$).

Баланс мощностей для режима динамического торможения в ДПТ НВ (рис. 7.5)

$$0 = (-I)^2 \cdot R_{\text{яц}} + E \cdot (-I), \quad (7.12)$$

т.е. $P_1 = 0$, $P_2 < 0$, иными словами, механическая мощность, поступающая от механизма на вал двигателя, преобразуется в электрическую ΔP , которая тратится на нагрев элементов якорной цепи.

Для ДПТ НВ существуют два вида торможения *противовключением*.

1. При активном статическом моменте, когда в цепь якоря вводят большое добавочное сопротивление $R_{\text{дл}}$. Ток якоря в этом случае уменьшается (рис. 7.6, точка **В**), момент двигателя M становится меньше активного статического момента $M_{\text{са}}$ и двигатель начинает снижать обороты до точки **К** ($\omega = 0$), а затем под влиянием $M_{\text{са}}$ реверсируется ($\omega < 0$) и разгоняется в направлении, противоположном действию момента двигателя (рис. 7.6, прямая **КС**). После точки **К** наблюдается режим торможения *противовключением*, который также получил название *генераторный режим последовательно с сетью*.

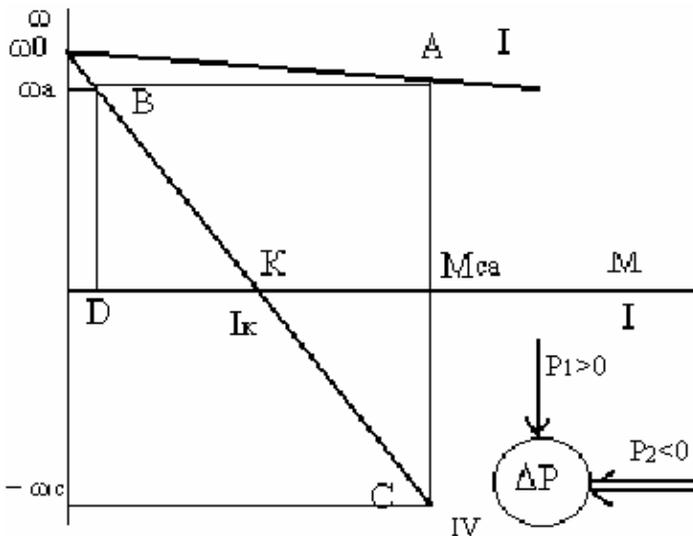


Рис.7.6. Характеристики ДПТ НВ при торможении противовключением с активным статическим моментом

Ток в режиме торможения противовключением по мере снижения оборотов увеличивается, поскольку со сменой направления вращения ($\omega < 0$) ЭДС изменит свой знак ($E < 0$) и будет действовать согласно с напряжением сети, вследствие чего ток становится равным $I = (U + E)/R_{яц}$ и растет до значения, при котором тормозной момент достигает величины M_{ca} . Установившийся режим торможения наступит при $-\omega_c$.

Уравнение баланса мощностей для режима торможения противовключением получим из уравнения электрического равновесия $U = I \cdot R_{яц} + (-E)$, умножив его на ток якоря I ,

$$U \cdot I = I^2 \cdot R_{яц} + (-E) \cdot I, \quad (7.13)$$

из которого следует, что

- $P_1 > 0$ – двигатель потребляет активную мощность из сети;
- $P_2 < 0$ – к валу двигателя приложена механическая мощность рабочей машины (действует активный статический момент M_{ca});
- $\Delta P > 0$ потери мощности в двигателе.

Уравнение электрического баланса

$$\Delta P = P_1 + P_2. \quad (7.14)$$

Таким образом, вся мощность, как потребляемая P_1 , так и преобразуемая в электрическую P_2 тратится на нагрев двигателя, создавая очень неблагоприятный с энергетической точки зрения и в тепловом отношении режим электромеханического преобразования энергии.

2. При реактивном статическом моменте торможение противовключением получают путем изменения полярности напряжения на зажимах якоря. В этом случае ток

$$I_{я} = (-U_n - E)/R_{яц} < 0 \quad (7.15)$$

меняет свое направление и момент двигателя становится тормозным (рис. 7.7, точка **В**). Поскольку полярность напряжения совпадает с полярностью ЭДС, то ток в якоре в момент переключения может достичь $20 \cdot I_n$, что недопустимо как по условиям коммутации, так и по допустимому ускорению. Для ограничения тока включают добавочное сопротивление $R_{дл}$ в цепь якоря, обеспечивая соблюдение условия $I_я < I_{доп}$.

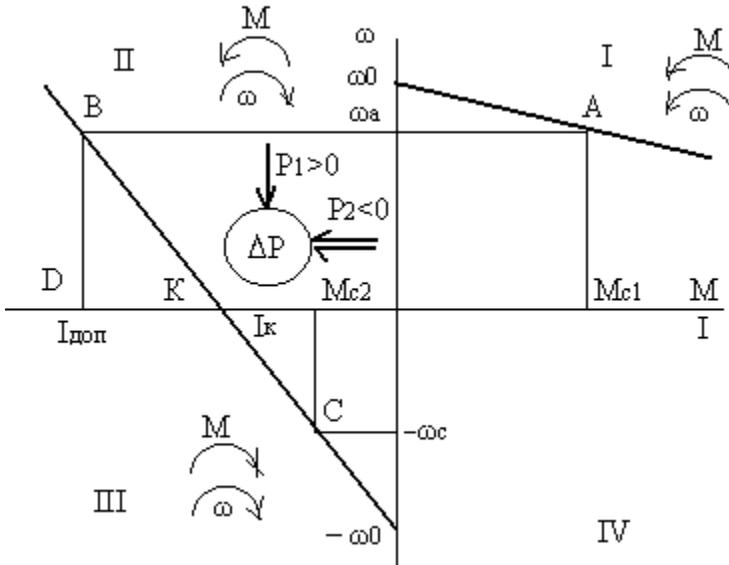


Рис. 7.7. Графики для режима торможения противовключением при смене полярности на зажимах якоря

$$R_{дл} = (U + E)/I_{доп} - R_{яц} . \quad (7.16)$$

Уравнение ЭМХ двигателя в режиме торможения противовключением можно получить из уравнения (5.3) после подстановки в него $-U$

$$\omega = -\omega_0 - I_я \cdot \frac{R_{яц}}{K\Phi_n} . \quad (7.17)$$

Характеристика проходит через $-\omega_0$ и ω_a (точка **В**, рис. 7.7).

Если при $\omega = 0$ (точка **К**) $M_{c2} < M_k$, то двигатель изменит направление вращения (совершит реверс) и станет вращаться с частотой $-\omega_c$.

Если при $\omega = 0$, $M_{c2} > M_k$, то якорь двигателя будет обтекаться током, оставаясь в неподвижном состоянии, поскольку ток якоря I_k (по модулю) меньше I_c . В обоих случаях двигатель отключают от сети при достижении $\omega = 0$.

Уравнение баланса мощностей в режиме торможения противовключением (участок **ВК**) получают из уравнения электрического равновесия для цепи якоря

$$-U = (-I) \cdot R_{яц} + E \quad (7.18)$$

после умножения на ток якоря с учетом знака $(-I)$

$$(-U) \cdot (-I) = (-I)^2 \cdot R_{яц} + E \cdot (-I), \quad (7.19)$$

откуда можно сделать вывод, что наблюдается аналогия с режимом торможения противовключением при активном статическом моменте ($P_1 > 0$, $P_2 < 0$, $\Delta P > 0$).

Сравнение энергетических показателей динамического торможения и торможения противовключением показывает, что потери электроэнергии в якорной цепи в режиме противовключением относятся к потерям при динамическом торможении, как 3:1, а при реверсе – 4:1.

ЛЕКЦИЯ 8

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Физические особенности работы машины постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ ПослВ).
2. Универсальные рабочие характеристики.
3. Естественные и искусственные характеристики двигателя последовательного возбуждения.
4. Режимы торможения ДПТ ПослВ.
5. ЭМХ и МХ двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

У двигателей постоянного тока последовательного возбуждения обмотки якоря и обмотки возбуждения включаются *последовательно* (рис. 8.1). По этой причине с изменением тока нагрузки меняется и величина магнитного потока Φ . А поскольку зависимость $\Phi = f(I)$ нелинейная (рис. 8.2), то аналитические зависимости для механической и электромеханической характеристик отсутствуют.

Поскольку физические процессы, протекающие в ДПТ последовательного возбуждения, аналогичны ДПТ НВ, то ме-

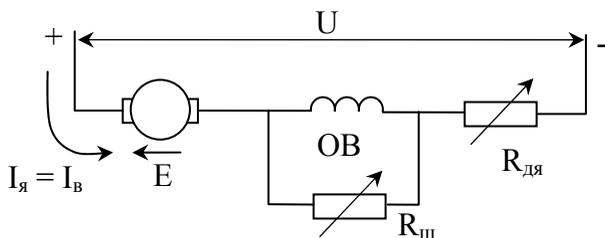


Рис. 8.1. Принципиальная электрическая схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

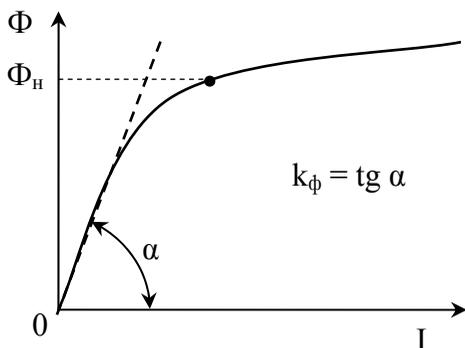


Рис. 8.2. К вопросу об аппроксимации нелинейной зависимости $\Phi = f(I)$ в двигателях постоянного тока

механическая и электрохимическая характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ ПослВ) описываются теми же уравнениями, что и для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (формулы (5.3) и (5.4)) с той лишь разницей, что поток Φ является функцией тока якоря и сопротивление якорной цепи является суммой сопротивлений обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Для построения естественных механических и электрохимических характеристик используются универсальные рабочие характеристики (рис. 8.3), где уже имеется зависимость

скорости ЭД от тока якоря $\overset{\circ}{n} = f\left(\overset{\circ}{I}\right)$, т.е. электрохимическая

характеристика, а для расчета механической характеристики

$\overset{\circ}{n} = f\left(\overset{\circ}{M}\right)$ используется зависимость $\overset{\circ}{M} = f\left(\overset{\circ}{I}\right)$.

При аппроксимации кривой намагничивания линейной зависимостью (что возможно только в области малых значений тока якоря $I_{я} < 0,3 \cdot I_{н}$) ЭМХ и МХ описываются гиперболической зависимостью, асимптотой которой является ось ω [3]:

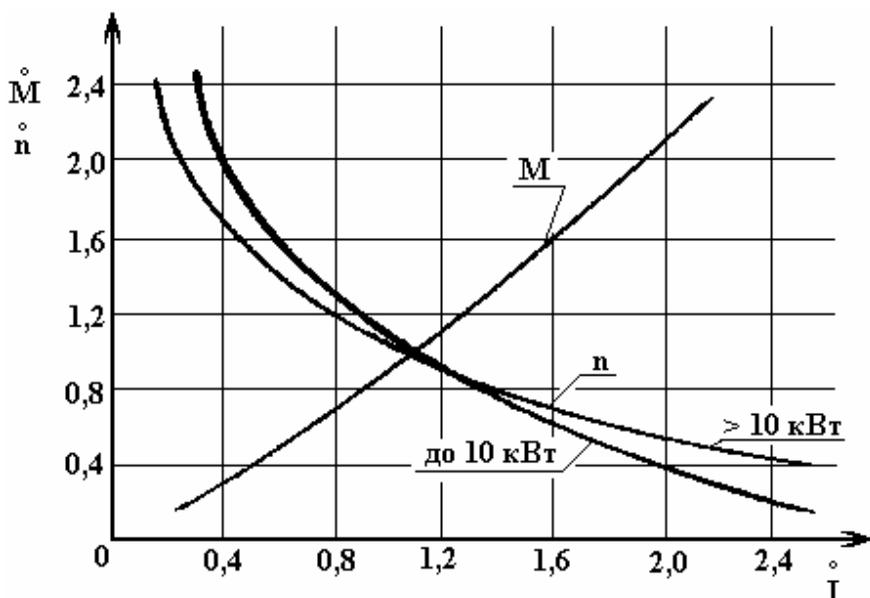


Рис. 8.3. Универсальные рабочие характеристики ДПТ последовательного возбуждения в относительных единицах

$$\omega = \frac{U}{kk_{\phi}I_{я}} - \frac{R_{яц}}{kk_{\phi}}; \quad (8.1)$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\phi}M}} - \frac{R_{яц}}{kk_{\phi}}, \quad (8.2)$$

где k_{ϕ} – коэффициент аппроксимации кривой намагничивания, определяемый углом наклона касательной (рис. 8.2).

При нагрузках, равных номинальной и выше, характеристика двигателя с последовательным возбуждением близка к линейной (рис. 8.3). С увеличением нагрузки в ДПТ ПослВ снижается частота вращения, что определяет повышенную перегрузочную способность двигателей этого типа. При проектировании и эксплуатации электроприводов с двигателями последовательного возбуждения необходимо исключить возможность их работы с малыми нагрузками, при которых частота вращения ЭД стремится

к бесконечности (рис. 8.3) и может превысить допустимую по условиям механической прочности.

Искусственные характеристики машины постоянного тока с последовательным возбуждением можно получить следующими способами:

- 1) введением в цепь якоря добавочного сопротивления $R_{\text{дЯ}}$ (реостатные характеристики);
- 2) изменением подводимого напряжения сети U_c ;
- 3) изменением магнитного потока.

Для построения искусственных характеристик первыми двумя способами применяют следующее уравнение

$$\omega_{\text{и}} = \omega_{\text{е}} \frac{U_c - I_{\text{я}}(R_{\text{яц}} + R_{\text{дЯ}})}{U_c - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{яц}}}. \quad (8.3)$$

Задаваясь рядом значений $I_{\text{я}}$, по естественной характеристике двигателя находят значения $\omega_{\text{е}}$, которые подставляют в уравнение (8.3) при заданном внешнем сопротивлении $R_{\text{яц}}$ или (и) напряжении сети U_c и определяют $\omega_{\text{и}}$.

Реостатные механические и электромеханические характеристики ДПТ ПослВ показаны на рис. 8.4. Соответственно введение добавочных сопротивлений уменьшает жесткость характеристик, позволяет ограничить момент и ток короткого замыкания двигателя.

Статические характеристики ЭД, соответствующие различным напряжениям питания, приведены на рис. 8.5. Их вид свидетельствует о том, что уменьшение U_c приводит к снижению скорости без изменения жесткости характеристик.

Регулирование магнитного потока двигателя постоянного тока последовательного возбуждения возможно путем шунтирования обмотки возбуждения резистором $R_{\text{ш}}$ (рис. 8.1). Механические характеристики при различных сопротивлениях $R_{\text{ш1}}$ и $R_{\text{ш2}}$ показаны на рис. 8.6.

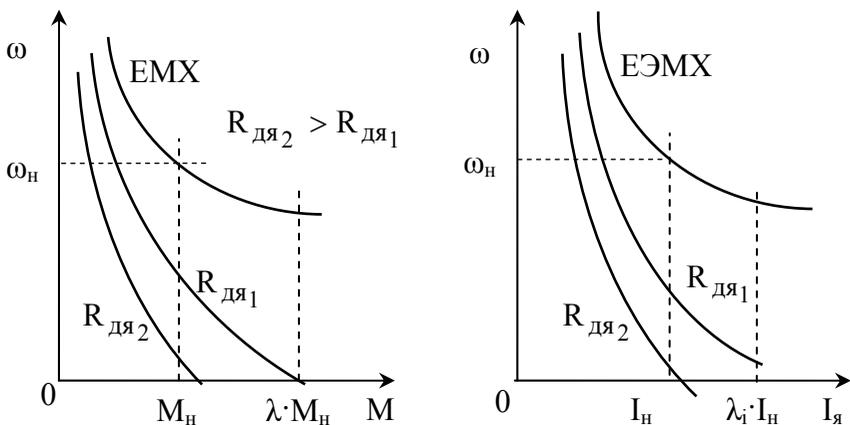


Рис. 8.4. Реостатные механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

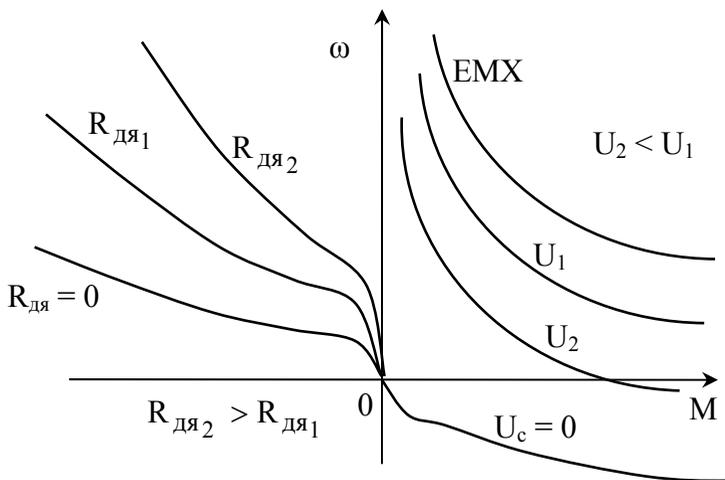


Рис. 8.5. Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения при изменении U_c и при динамическом торможении с самовозбуждением

Для двигателя последовательного возбуждения возможны два вида электрического торможения:

- 1) динамическое торможение;
- 2) торможение противовключением.

Рекуперативное торможение невозможно, поскольку ДПТ ПослВ не имеют частоты вращения идеального холостого хода ω_0 .

Режим динамического торможения с самовозбуждением имеет место при вариации напряжения, когда $U_c = 0$ (рис. 8.5). Согласно [3], характеристика существует только в IV квадранте, если принудительно изменить частоту вращения электродвигателя. Расположение характеристик динамического торможения во II квадранте можно обеспечить, переключив выводы обмотки якоря или выводы обмотки возбуждения. Варьирование величины добавочного сопротивления в якорной цепи позволит получить семейство характеристик динамического торможения с самовозбуждением (рис. 8.5).

На практике также используют динамическое торможение с независимым возбуждением, схемное решение которого аналогично ДПТ НВ. Недостатком подобного технического решения является потребление из сети мощности, близкой к номинальной.

При торможении противовключением ДПТ ПослВ возможны два случая.

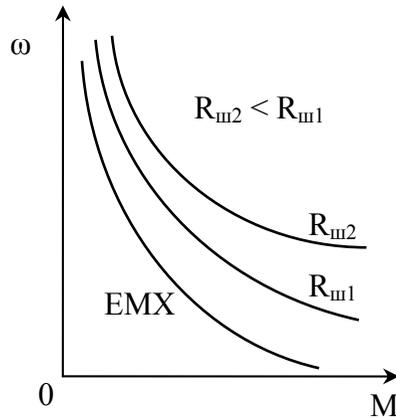


Рис. 8.6. Механические характеристики ДПТ ПослВ при вариации магнитного потока путем шунтирования обмотки возбуждения

1) Торможение с активным M_c путем введения большого добавочного сопротивления. В результате уменьшается ток в цепи якоря, а следовательно, момент двигателя (рис. 8.7), который начинает тормозиться до $\omega = 0$ (точка **C**), а затем якорь изменяет направление вращения (рис. 8.7, кривая **CD**). При равенстве моментов $M = M_c$ наступает установившийся режим вращения якоря с частотой вращения $-\omega_c$.

2) При реактивном статическом моменте M_c торможение противовключением выполняют путем изменения полярности напряжения на зажимах якоря двигателя, оставляя неизменным направление тока в обмотке возбуждения (во избежание перемагничивания машины). Для ограничения тока в цепи якоря в режиме торможения вводится добавочное сопротивление $R_{д\ddot{a}}$, поскольку в этом случае ЭДС и напряжение сети направлены

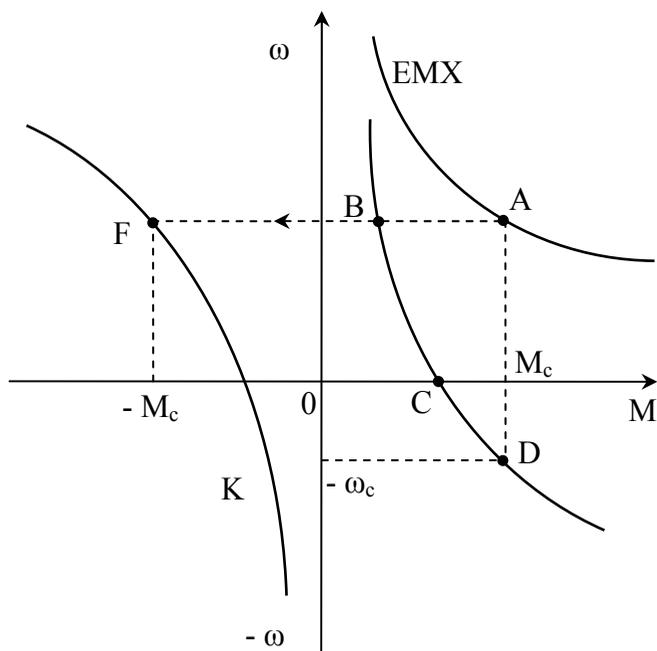


Рис. 8.7. Механические характеристики ДПТ ПослВ в режиме торможения противовключением

согласно, $R_{\text{д\ddot{я}}} = \frac{U + E}{\lambda \cdot I_{\text{я}}} - R_{\text{яц}}$. Торможение противовключением в этом случае осуществляется по кривой **FK** (рис. 8.7).

Характеристики двигателя смешанного возбуждения (ДПТ СВ) получают на основании тех же зависимостей (формулы (5.3) и (5.4)), что и для ДПТ с независимым возбуждением. МХ и ЭМХ формально совпадают с соответствующими уравнениями для двигателя последовательного возбуждения:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi(I_{\text{я}})} - M \cdot \frac{R_{\text{яц}}}{(K\Phi(I_{\text{я}}))^2}, \quad (8.4)$$

$$\omega = \frac{U}{K\Phi(I_{\text{я}})} - \frac{R_{\text{яц}}}{K\Phi(I_{\text{я}})} \cdot I_{\text{я}}. \quad (8.5)$$

Однако магнитный поток ДПТ СВ зависит от потока Φ_1 , создаваемого током независимой обмотки возбуждения, и потока Φ_2 , создаваемого током обмотки последовательного возбуждения, то есть

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (8.6)$$

Так как значение Φ_2 определяется током нагрузки, то для построения характеристик используют универсальные рабочие характеристики, представленные на рис. 8.8.

При регулировании частоты вращения ДПТ смешанного возбуждения используют те же способы, что и для двигателя постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением, то есть за счет U_c , $R_{\text{д\ddot{я}}}$ и Φ .

Пусковые и перегрузочные способности близки к ДПТ последовательного возбуждения. Тормозные режимы аналогичны двигателям постоянного тока с независимым возбуждением. Но есть одна особенность: при рекуперативном и динамическом торможении с целью предотвращения размагничивания машины обмотку последовательного возбуждения шунтируют.

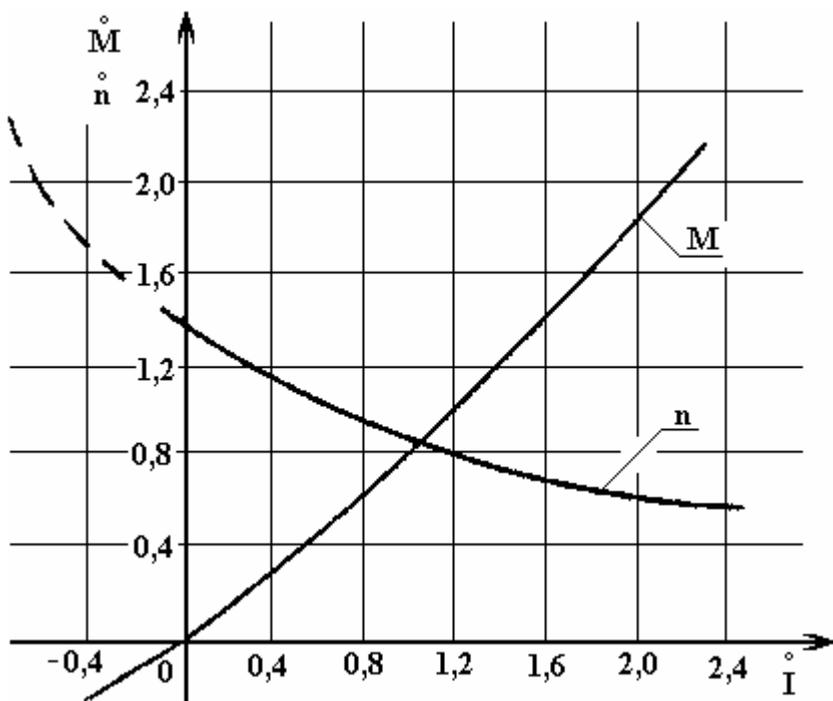


Рис. 8.8. Универсальные характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

ЛЕКЦИЯ 9

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

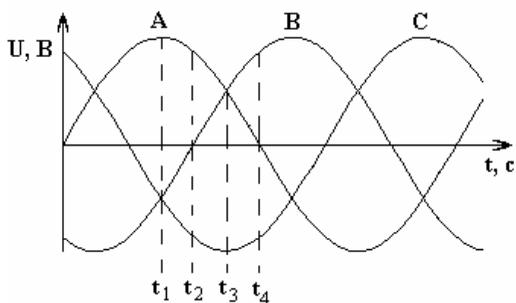
Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Конструкция асинхронных электродвигателей (АД).
2. Вращающееся магнитное поле статора.
3. Схема замещения и электромеханическое преобразование энергии в асинхронном электродвигателе.

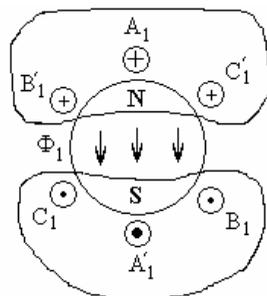
Из всех видов электрических машин наиболее широкое применение нашли машины переменного тока: в качестве двигателей – асинхронный ЭД с короткозамкнутым ротором (АД КЗ), в качестве генераторов – синхронные электрические машины.

Конструктивно электрические машины переменного тока, подобно машинам постоянного тока, состоят из *статора* и *ротора*. Отметим, что статор конструктивно выполняется примерно одинаково для синхронных и асинхронных машин. Он не имеет явно выраженных полюсов. Обмотки переменного тока равномерно располагаются в пазах статора. Наиболее распространены *трехфазные* электрические машины, обмотки которых соединены в *звезду* или в *треугольник*.

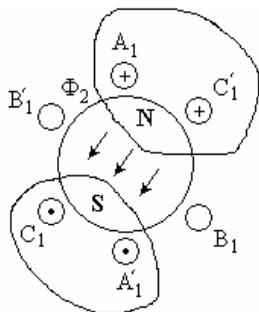
Магнитное поле статора является не стационарным, как в машинах постоянного тока, а *вращающимся*. Физический принцип существования вращающегося магнитного поля в статоре машин переменного тока проиллюстрирован на рис. 9.1. В трехфазной системе переменного тока возьмем несколько фиксированных моментов времени $t_1 \dots t_4$ (рис. 9.1, а), для которых определим направление тока (фазы $A_1 - A'_1, B_1 - B'_1, C_1 - C'_1$). Ток, направленный к плоскости наблюдения, будем обозначать \oplus , а от плоскости наблюдения к наблюдателю – \odot , причем размеры "плюса" или "точки" характеризуют величину амплитуды тока. Объединяя проводники с одним направлением тока, получаем магнитный полюс **N** или **S**. Направление



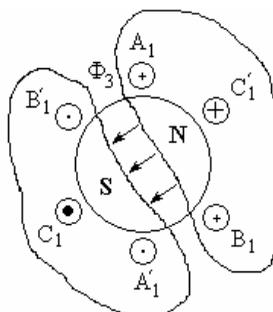
а) фазы А, В и С



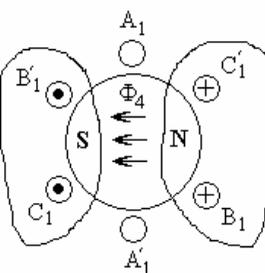
б) $t = t_1$



в) $t = t_2$



г) $t = t_3$



д) $t = t_4$

Рис. 9.1. К вопросу о физическом принципе существования вращающегося магнитного поля в статоре машин переменного тока

магнитного потока Φ_i для рассматриваемых моментов времени также показано на рис. 9.1, из которых следует, что от момента времени t_1 (рис. 9.1, б) до момента t_4 (рис. 9.1, д) поток Φ изменился на 90° , т.е. магнитное поле в статоре машин переменного тока вращается с частотой питающего напряжения.

Основные отличия машин переменного тока определяются конструкцией ротора.

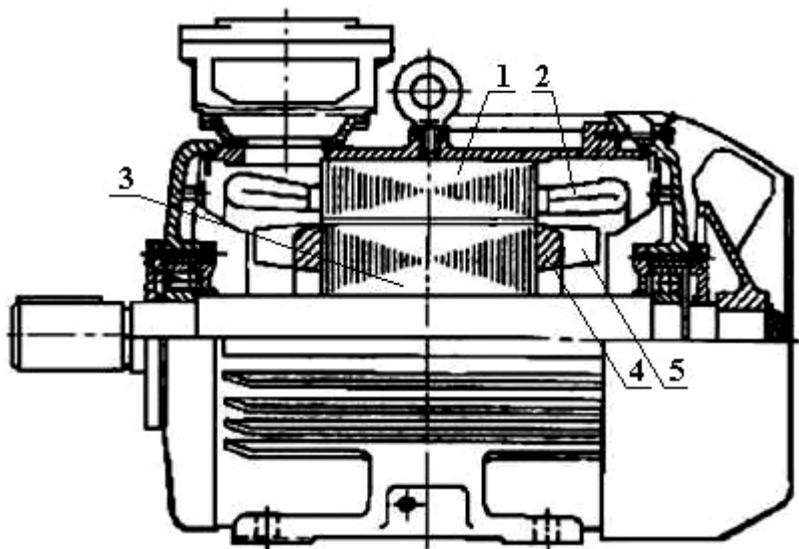
Рассмотрим устройство наиболее простого и надежного *асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором*. Его роторная обмотка содержит расположенные в пазах стержни,

торцы которых соединены специальными короткозамыкающими кольцами. Стержни и кольца образуют фигуру, напоминающую известное беличье колесо, поэтому короткозамкнутая обмотка ротора АД КЗ в специальной литературе часто именуется «*беличьей клеткой*».

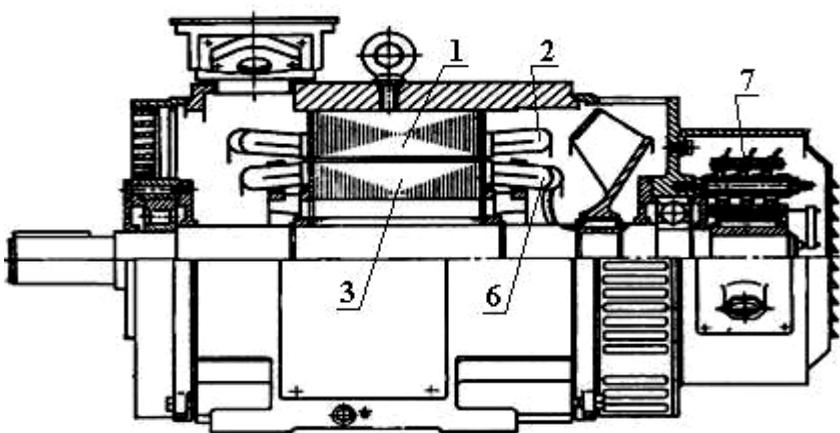
На рис. 9.2, а для примера схематически показан продольный разрез короткозамкнутого АД. Видно, что электродвигатель содержит неподвижный статор, включающий в себя активные части: шихтованный (набранный из отдельных изолированных листов) магнитопровод 1 и размещенную в его пазах обмотку 2. Ротор также имеет шихтованный магнитопровод 3, в пазах которого размещены стержни 4 «беличьей клетки». На торцах магнитопровода стержни соединены между собой короткозамыкающими кольцами 5.

В приводах, где требуется регулирование развиваемого двигателем вращающего момента и частоты вращения ротора, применяются *асинхронные двигатели с фазным ротором*. Конструкция такого двигателя схематически показана на рис. 9.2, б. Его статор принципиально не отличается от рассмотренного варианта короткозамкнутого двигателя. Ротор же содержит в пазах магнитопровода 3 трехфазную обмотку 6, концы которой выведены на контактные кольца 7, жестко размещенные на валу с помощью изолирующей втулки. Токосъем с колец обеспечивается щетками, щеткодержатели которых закреплены на подшипниковом щите.

Наличие фазной обмотки на роторе позволяет в целях регулирования машины включать в роторную цепь различные регулировочные приборы: реостаты, дроссели, коммутирующие аппараты и т.п. АД с фазным ротором из-за наличия щеточного контакта требуют более внимательного ухода, систематического контроля степени износа и усилия нажатия щеток, периодической очистки полости машины от токопроводящей пыли (продувка сжатым воздухом). Такие двигатели широко используются в различных подъемных устройствах (краны,



а) устройство АД КЗ



б) устройство АД с фазным ротором

Рис. 9.2. Конструкция асинхронных электродвигателей

кран-балки и т.п.), в других регулируемых приводах. Асинхронные машины выгодно отличаются от других низкой стоимостью, простотой обслуживания, высокой надежностью. К недостаткам можно отнести сложность их регулирования и резкое снижение коэффициента мощности при недогрузке.

По своей природе асинхронный двигатель является универсальным преобразователем, в котором происходит преобразование напряжения статора U_1 в напряжение ротора U_2 , частоты питания f_1 в частоту тока ротора f_2 , электрической мощности P_1 , потребляемой из сети, в механическую мощность P_2 , развиваемую двигателем. Обмотка статора в зависимости от номинального напряжения двигателя и напряжение сети может быть соединена в звезду или треугольник, обмотка ротора, как правило, соединяется в звезду. В цепь ротора АД с фазным ротором включается внешнее сопротивление $R_{2вн}$. Большинство асинхронных двигателей выполняются трехфазными, поэтому при дальнейшем изложении электромеханические свойства будут рассматриваться этих двигателей.

Упрощенная П-образная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 9.3 [2, 3], где в обозначениях коэффициенты с индексом 1 относятся к обмотке статора (*первичной цепи*), а с индексом 2 – к обмотке ротора (*вторичной цепи*).

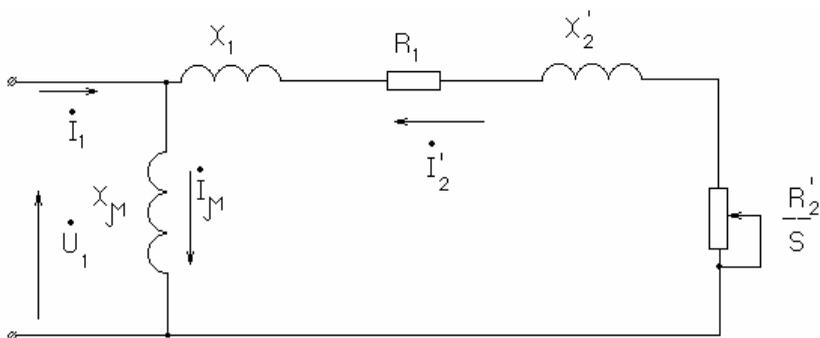


Рис. 9.3. Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя

На рис. 9.3 введены обозначения: U_1 – действующее значение фазного напряжения; I_μ , I_1 – ток намагничивания и ток обмотки статора; x_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания; x_1 , R_1 – индуктивное и активное сопротивления обмотки фазы статора; I_2' , R_2' , x_2' – приведенные к обмотке статора ток ротора, активное и индуктивное сопротивления фазы ротора; s – скольжение ЭД.

Приведенный к статору ток ротора

$$I_2 = I_2' / (K_e \cdot m_1 / m_2) \quad (9.1)$$

где I_2 – действительный ток ротора;

K_e – коэффициентом трансформации ЭДС, $K_e = E_1 / E_2$;

m_1 , m_2 – число фаз статора и ротора.

Приведенные к обмотке статора сопротивления ротора:

$$R_2' = R_2 \cdot K_e \cdot K_T = R_2 \cdot (m_1 / m_2) \cdot K_e \quad (9.2)$$

$$x_2' = x_2 \cdot (m_1 / m_2) \cdot K_e \quad (9.3)$$

где R_2 , x_2 – действительные активное и индуктивное сопротивления фазы роторной цепи, Ом.

Индуктивное сопротивление x_i зависит от индуктивности L_i и частоты напряжения f_i по формуле:

$$x_i = 2\pi \cdot f_i \cdot L_i \quad (9.4)$$

Коэффициент K_e можно определить из паспортных данных двигателя:

$$K_e \approx 0.95 \cdot U_{\text{лн}} / E_{2к} \quad (9.5)$$

где 0.95 – коэффициент, учитывающий 5 % - ю потерю напряжения в обмотке статора;

$U_{\text{лн}}$ – номинальное линейное напряжение статора;

$E_{2к}$ – ЭДС между кольцами неподвижного ротора.

На практике у большинства двигателей $m_1 = m_2$, тогда формулы (9.2) и (9.3) примут более простой вид:

$$R'_2 = R_2 \cdot K_e^2, \quad (9.6)$$

$$x'_2 = x_2 \cdot K_e^2. \quad (9.7)$$

Из определения коэффициента K_e известно, что приведенная к обмотке статора ЭДС ротора E_2' равна E_1 , то есть $E_2' = E_2 \cdot K_e = E_1$, а коэффициент трансформации тока равен $K_T = I_2/I_2'$.

Сопrotивления короткого замыкания АД определяются:

$$R_K = R_{1\text{сум}} + R'_{2\text{сум}}; \quad (9.8)$$

$$x_K = x_{1\text{сум}} + x'_{2\text{сум}}; \quad (9.9)$$

$$R'_{2\text{сум}} = R'_2 + R'_{2д};$$

$$x_{2\text{сум}}' = x_2' + x_{2д}';$$

$$x_K = x_1 + x'_2;$$

где $R_{2д}$, $x'_{2д}$ – *дополнительные* активное и реактивное сопротивления, включенные в цепь ротора и приведенного к обмотке статора.

Отметим, что если обмотки двигателя соединены в треугольник, то его следует заменить схемой эквивалентной звезды, для которой сопротивления принимаются равными 1/3 фактических сопротивлений фаз статора и ротора.

Как уже отмечалось, при подключении обмотки статора асинхронного электродвигателя к сети трехфазного тока возникает *вращающееся магнитное поле*, угловая скорость которого ω_0 , называемая *синхронной*, находится по формуле

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \quad (9.10)$$

где f_1 – частота переменного тока промышленной частоты, Гц, обычно $f_1 = 50$ Гц;

p_n – число пар полюсов двигателя, которые определяются из паспортных данных.

Синхронную угловую скорость в научно-технической литературе также обозначают как ω_1 . Разность между ней и

текущим значением угловой скорости ротора ω , отнесенная к скорости ω_0 (ω_1), называется *скольжением*

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} . \quad (9.11)$$

Для двигательного режима $s = 1 \dots 0$. Мощность на валу двигателя составляет

$$P_2 = M \cdot \omega = P_{эм} \cdot (1 - s) , \quad (9.12)$$

а разность

$$P_{эм} - P_2 = P_{эм} \cdot s \quad (9.13)$$

дает тепловые потери в цепи ротора, которые пропорциональны скольжению. Максимальное значение КПД при этом составит

$$\eta = P_2/P_{эм} = P_{эм} \cdot (1 - s)/P_{эм} = 1 - s . \quad (9.14)$$

По паспортным данным номинальный ток статора двигателя определяется по формуле

$$I_{1Н} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot \cos \phi_H \cdot \eta_H} . \quad (9.15)$$

Приведенные соотношения используются для построения электромеханических и механических характеристик асинхронных электрических машин.

ЛЕКЦИЯ 10

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя.
2. Механическая характеристика АД.
3. Общий подход к построению механических и электромеханических характеристик асинхронных электродвигателей.

Электромеханическая характеристика в асинхронном ЭД определяет зависимость между скоростью вращения ротора ω (или скольжением s) и током статора I_1 или током ротора I_2' .

Согласно схеме замещения (рис. 9.3) ЭМХ АД по току ротора $I_2'(s)$, А, определяется по формуле

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{2\text{сум}}'}{s}\right)^2 + X_K^2}}, \quad (10.1)$$

где $U_{1\phi}$ – действующее значение фазного напряжения питающей сети, В.

В режиме идеального холостого хода через обмотки статора протекает только ток намагничивания I_μ , который создает магнитный поток в статоре, поэтому ток статора определяется как геометрическая сумма приведенного тока ротора и намагничивающего тока:

$$I_1 = \sqrt{\left(I_2'\right)^2 + I_\mu^2}. \quad (10.2)$$

Данное выражение можно использовать для определения электромеханической характеристики асинхронного двигателя $I_1 = f(s)$ или $I_1 = f(\omega)$.

Активная электромагнитная мощность трех фаз P_{12} , передаваемая через воздушный зазор ротору двигателя, может быть записана в виде [2, 3]

$$P_{12} = 3 \cdot I_2' \cdot \frac{R_2'}{s} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2' / s}{\left(R_1 + R_2' / s\right)^2 + x_k^2}, \quad (10.3)$$

или через электромагнитный момент и скорость поля ЭД:

$$P_{12} = M \cdot \omega_0. \quad (10.4)$$

Механической характеристикой асинхронного двигателя принято называть зависимость электромагнитного момента M от скольжения $M = f(s)$ или $\omega = f(M)$. Приравнявая формулы (10.3) и (10.4), получаем уравнение статической механической характеристики АД

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + R_2' / s \right)^2 + x_k^2 \right]}. \quad (10.5)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что она имеет точки экстремума. Производная dM/ds дает выражения для определения *критического скольжения* s_k

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}. \quad (10.6)$$

Знак (плюс) соответствует двигательному режиму, а знак (минус) – генераторному режиму с отдачей энергии в сеть.

При s_k момент двигателя будет максимальным (он также получил название *критического момента*). Подставив (10.6) в выражение (10.5), получим формулу для определения критического момента M_k :

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \quad (10.7)$$

Из формулы (10.7) следует, что критический момент в генераторном режиме будет отрицательным и по абсолютному значению в 1,5...3 раза больше M_K в двигательном режиме.

Разделив уравнение (10.5) на уравнение (10.7) и учитывая выражение для s_K (10.6), после соответствующих преобразований получим уравнение МХ, получившее название *уточненной формулы Клосса*:

$$M = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + \alpha \cdot S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot \alpha \cdot S_K}, \quad (10.8)$$

где $\alpha = R_1/R_2'$.

Уравнение (10.8) применяется обычно для двигателей малой мощности. Для двигателей средней и большой мощности механическую характеристику строят по *упрощенной формуле Клосса*, позволяющей использовать паспортные данные двигателя

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}. \quad (10.9)$$

При этом M_K и s_K можно определить через перегрузочную способность двигателя λ :

$$M_K = M_H \cdot \lambda, \quad (10.10)$$

$$s_K = s_H \cdot (1 + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (10.11)$$

Отметим, что при $s \ll s_K$ механическая характеристика АД близка к линейной зависимости $M(s) \approx \frac{2 \cdot M_K}{s_K} \cdot s$, а в области больших скольжений ($s \gg s_K$) имеет гиперболический характер: $M(s) \approx \frac{2 \cdot M_K \cdot s_K}{s}$. При $s = s_K$ момент принимает максимальные значения, причем в двигательном режиме ($s_K > 0$) соответствующее значение критического момента $M_{K,д}$ мень-

ше, чем $M_{к,г}$ в генераторном режиме ($s_k < 0$). С помощью формулы (10.7) эту разницу можно оценить количественно:

$$M_{к,г} = M_{к,д} \cdot \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = -M_{к,д} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot |s_k|}{1 - \alpha \cdot |s_k|}, \quad (10.12)$$

где $|s_k|$ – модуль критического скольжения.

На рис. 10.1 и рис. 10.2 показаны естественные механические и электромеханические характеристики асинхронного ЭД.

Расчет механических и электромеханических характеристик АД можно проводить в следующем порядке:

1. На основании паспортных данных двигателя опреде-

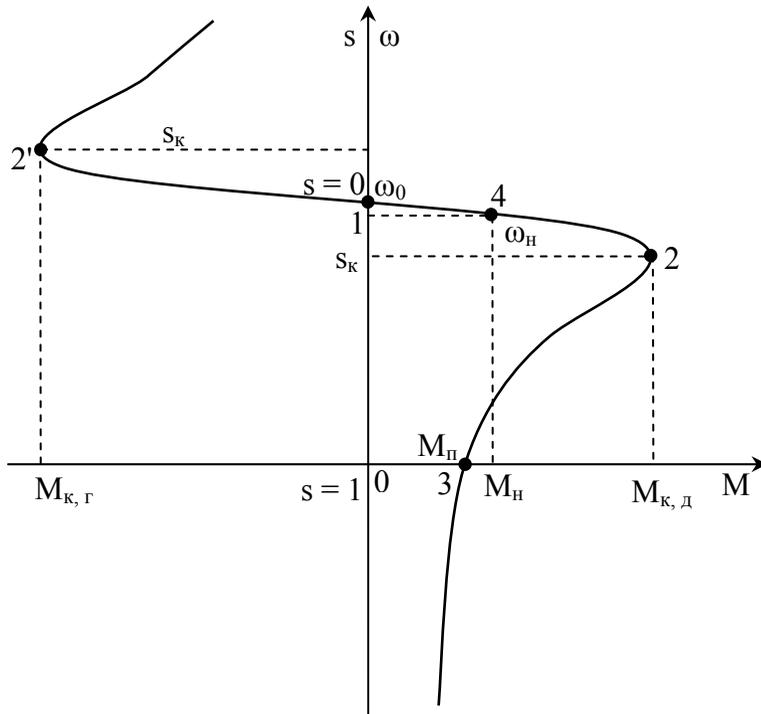


Рис. 10.1. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

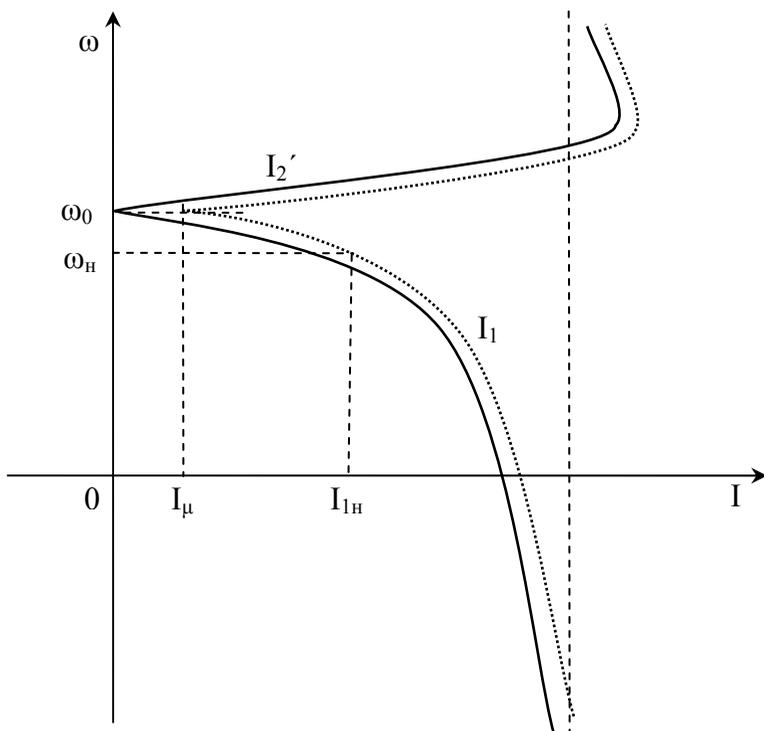


Рис. 10.2. Естественные электромеханические характеристики асинхронного двигателя

ляются *основные* или *характерные* точки:

а) синхронную скорость ω_0 по формуле (9.10), на рис. 10.1 точка обозначена цифрой 1;

б) критические точки перелома характеристик (2 и 2' на рис. 10.1), для их нахождения необходимо определить критическое скольжение s_k и критический момент M_k ;

в) точку пуска ЭД (точка 3 на рис. 10.1), необходимо отметить, что *пусковой момент* M_p определяется из паспортных данных двигателя по специальному коэффициенту $k_p = M_p / M_n$;

г) точку номинального режима работы (4 на рис. 10.1).

2. По основным точкам уже можно определить принципиальный вид механической характеристики АД. Если необхо-

дима точность построения, то для двигателей мощностью до 100 кВт МХ рассчитывают по уточненной формуле Клосса (10.8), а для двигателей средней и большой мощности используется упрощенная формула (10.9).

3. Электромеханическая характеристика для тока ротора рассчитывается по формуле (10.1). Для расчета ЭМХ по току статора $I_1(s)$, А, следует использовать формулу:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + (I_{1H} - I_0)^2 \cdot \frac{M \cdot s}{M_H \cdot s_H}}, \quad (10.13)$$

где I_{1H} , M_H , s_H – соответственно номинальные значения тока статора, момента и скольжения;

M , s – текущие значения момента и скольжения двигателя в установившемся режиме работы.

I_0 – ток холостого хода, А.

4. Для асинхронных двигателей при наличии неполных каталожных данных параметры двигателя определяют приближенно [2, 3]. При этом для машин малой мощности принимают $\alpha = 1$. Сначала находят критическое скольжение S_k , полагая $s = s_H$, затем вычисляют критический момент $M_k = m_k \cdot M_H$, где $m_k = \lambda$ – отношение критического момента к номинальному. Дальнейший расчет характеристик выполняют аналогично вышесказанному.

Методика расчета и построения естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик подробно освещено в учебной литературе [2, 3]. Отметим, что расчет искусственных электромеханических характеристик $I_2'(s)$, $I_1(s)$ удобно проводить по формулам проф. Шубенко.

ЛЕКЦИЯ 11

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Реостатное регулирование частоты вращения.
2. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов.
3. Характеристики асинхронного двигателя при изменении амплитуды и частоты питающего напряжения.

Регулирование частоты вращения в асинхронном электродвигателе может осуществляться путем варьирования большего числа параметров по сравнению с приводом постоянного тока.

Например, *реостатное регулирование скорости* может быть реализовано включением дополнительных сопротивлений (как активных, так и реактивных) в цепь статора или в цепь ротора. Последний способ подходит только для АД с фазным ротором. Искусственные реостатные характеристики АД качественно можно свести к двум случаям (рис. 1.11). Изменение механических характеристик можно оценить, например, по характерным точкам.

Синхронная частота ω_0 , согласно формуле (9.10), остается без изменений (рис. 11.1).

Величина критического скольжений s_k , формула (10.6), зависит от параметров как цепи статора, так и цепи ротора. Увеличение активного сопротивления ротора R_2' приводит к увеличению s_k (рис. 11.1, б), увеличение других параметров (R_1, x_1, x_2') – к уменьшению критического скольжения (рис. 11.1, а).

Величина критического момента M_k , формула (10.7) от сопротивления ротора не зависит (рис. 11.1, б). Изменение R_1, x_1, x_2' , как и для s_k , уменьшает M_k (рис. 11.1, а).

На практике используется варьирование R_2' , т.к. данный способ регулирования позволяет получить максимальный пус-

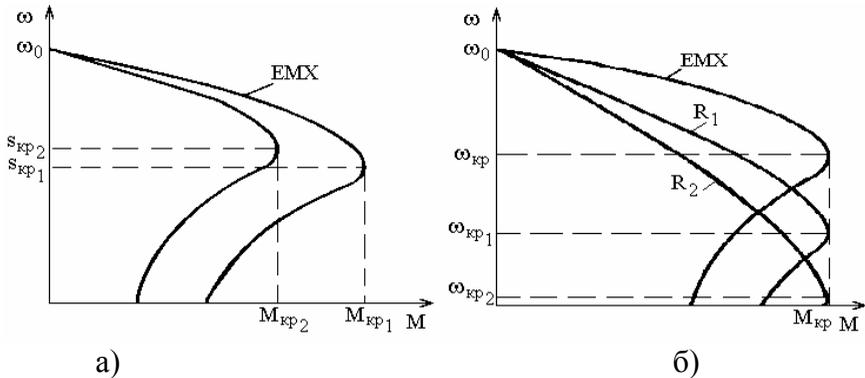


Рис. 11.1. Механические характеристики асинхронного двигателя при реостатном регулировании

ковой момент, и включение фаз статора двигателя через токоограничивающий реактор, т.е. увеличение параметра x_1 .

Регулирование скорости путем *изменения числа пар полюсов* осуществляется при неизменных параметрах питающей сети. Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в статоре были уложены либо независимые обмотки возбуждения с различным значением числа пар полюсов, либо при одной обмотке статора имелась возможность изменения ее схемы соединений. На практике наибольшее применение получили схемы переключения числа пар полюсов со "звезды" на "двойную звезду" (рис. 11.2, а), или с "треугольника" на "двойную звезду" (рис. 11.2, б).

Принцип изменения числа пар полюсов, например для схемы "звезда" – "двойная звезда" (рис. 11.2, а), можно проследить по схеме включения секций одной фазы обмотки статора (рис. 11.3). Число пар полюсов p_p , как и при переключении с "треугольника" на "двойную звезду", изменяется вдвое, что вызывает соответствующие изменения скорости магнитного поля (см. формулу (9.11)). Критический момент двигателя при различных числах полюсов зависит от конструктивного

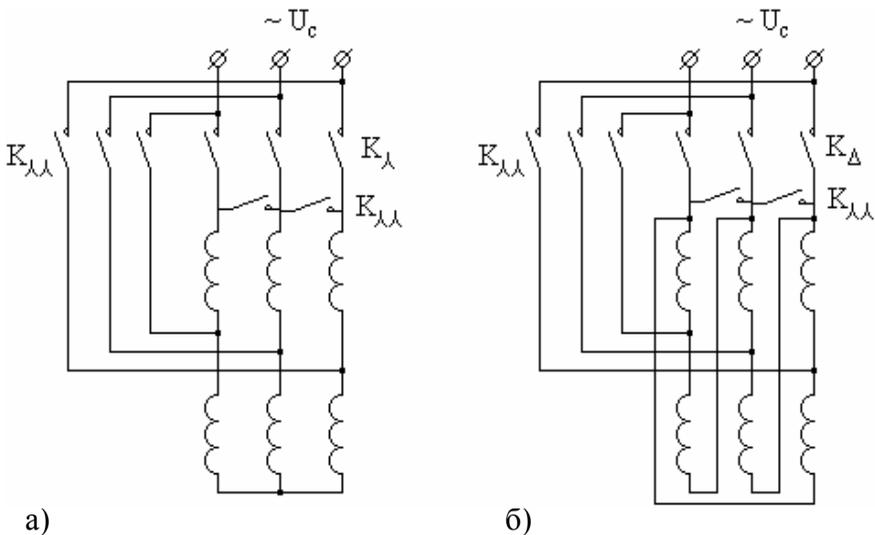
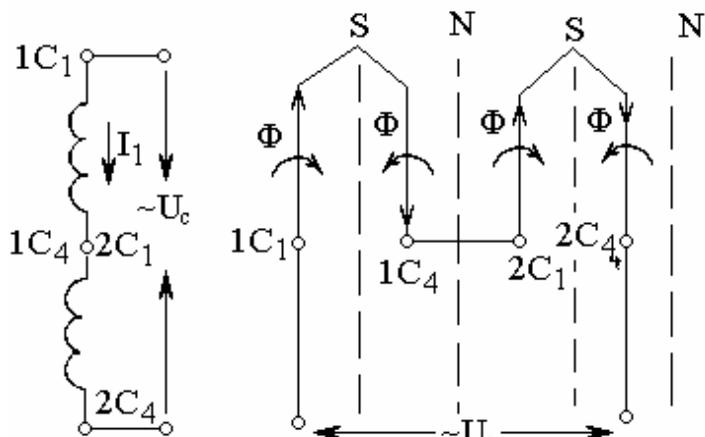


Рис. 11.2. Схемы включения статорных обмоток АД при изменении числа пар полюсов

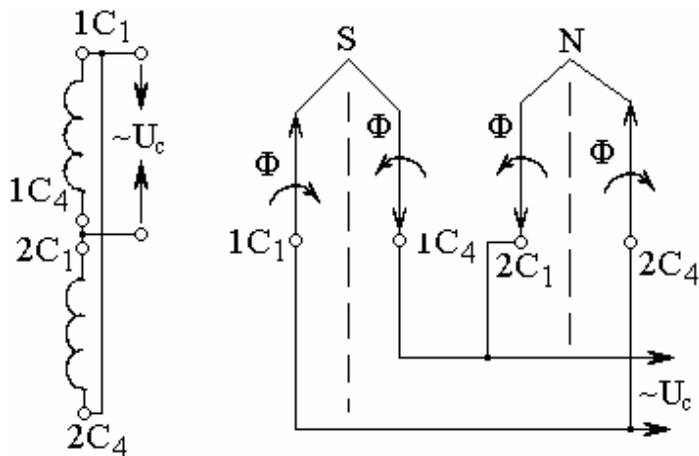
исполнения обмоток. Регулирование частоты вращения осуществляется ступенчатое.

Данный способ регулирования требует применения специальных двигателей, габариты и стоимость которых выше, чем у односкоростных АД. Однако простота способа регулирования (уже при наличии на статоре ЭД двух обмоток, обеспечивающих возможность переключения числа пар полюсов, можно обеспечить четыре регулировочные ступени) и высокая жесткость регулировочных характеристик определяют целесообразность использования данного метода во многих практических случаях [3].

Момент, развиваемый двигателем, и мощность определяются схемой включения. Для приведенной на рис. 11.2, а схемы включения, согласно формуле 10.7, критический момент равен



а) тип включения обмоток – "звезда"; $2p = 4$; $p = 2$



б) тип включения обмоток – "двойная звезда"; $2p = 2$; $p = 1$

Рис. 11.3. Схемы включения секций обмотки статора при изменении числа пар полюсов

$$M_{\kappa\lambda} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}}{2 \cdot \omega_{0\lambda} \left[2 \cdot R_1 \pm 2 \cdot \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \quad (11.1)$$

Множитель «2» перед R_1 говорит о том, что в схеме «звезда» две обмотки соединены последовательно (рис. 11.3, а).

Частоты вращения на холостом ходу, согласно формуле 9.10, находятся в соотношении $\omega_{0\lambda\lambda} = 2 \cdot \omega_{0\lambda}$.

Для двойной звезды момент

$$M_{\kappa\lambda\lambda} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}}{2 \cdot \omega_{0\lambda\lambda} \cdot \left[\frac{R_1}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \quad (11.2)$$

Несложно показать, что $M_{\kappa\lambda\lambda}/M_{\kappa\lambda} = 2$. На рис. 11.4 показаны механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя при изменении числа пар полюсов.

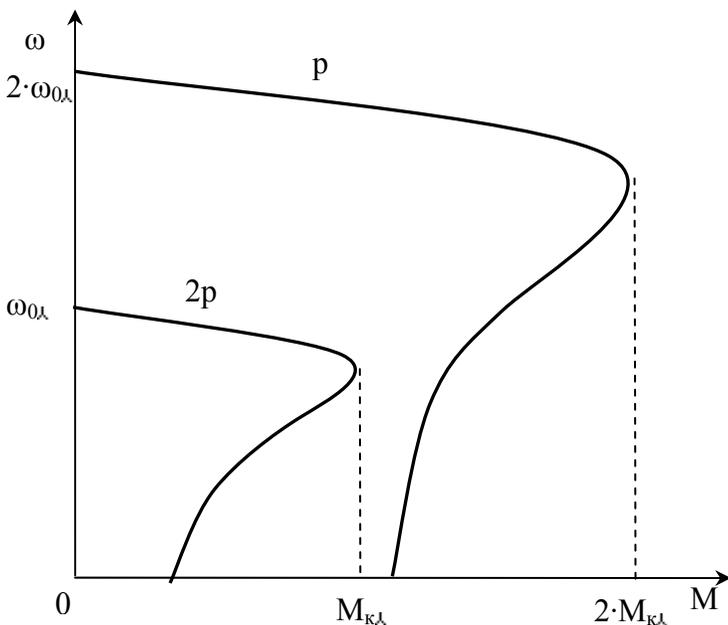


Рис. 11.4. Механические характеристики двухскоростного АД при изменении числа пар полюсов

Регулирование частоты вращения двигателя при *изменении величины питающего напряжения* связано со значительным уменьшением критического момента (рис. 11.5)

$$M_{\text{кн}} = M_{\text{ке}} \cdot (U_1/U_{1\text{н}})^2 \quad (11.3)$$

при сохранении постоянным критического скольжения.

При регулировании скорости асинхронных двигателей *изменением частоты питающего напряжения* f_c меняются:

1. Синхронная скорость вращения $\omega_0 = 2 \cdot p \cdot f_c/p_{\text{п}}$;
2. Критический момент, поскольку изменение частоты влияет на реактивное сопротивление машины $x_{\text{к}}$;
3. Критическое скольжение $s_{\text{к}}$, также связанное с параметром $x_{\text{к}}$.

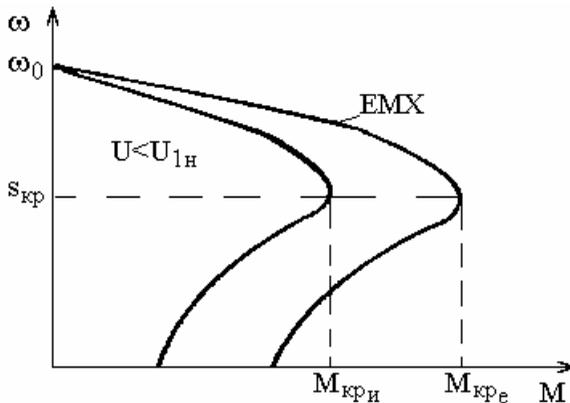


Рис. 11.5. Механические характеристики АД при снижении напряжения на обмотке статора

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = 2 \cdot p_{\text{п}} \cdot f_{\text{с}} \cdot L_{\text{к}} \quad (11.4)$$

где $L_{\text{к}}$ – индуктивность обмоток двигателя.

Поскольку обычно $R_1 \ll x_{\text{к}}$, то в уравнении (10.6) величиной R_1 можно пренебречь, тогда

$$s_{\text{к}} \approx R'_2 / (2 \cdot p_{\text{п}} \cdot f_{\text{с}} \cdot L_{\text{к}}). \quad (11.5)$$

Соотношение критических скольжений для двух различных частот определяется следующим образом:

$$\frac{s_{ки}}{s_{ке}} = \frac{\frac{R_2'}{2 \cdot p_{п} \cdot f_1 \cdot L_{к}}}{\frac{R_2'}{2 \cdot p_{п} \cdot f_{н} \cdot L_{к}}} = \frac{f_{н}}{f_1}, \quad (11.6)$$

где $f_{н}$ – частота номинального напряжения сети;

f_1 – нового значения частоты питающего напряжения.

Из предыдущего выражения находим

$$s_{ки} = s_{ке} \cdot \frac{f_{н}}{f_1} \quad (11.7)$$

Из данного уравнения видно, что $s_{к}$ асинхронного ЭД обратно пропорционально частоте сети.

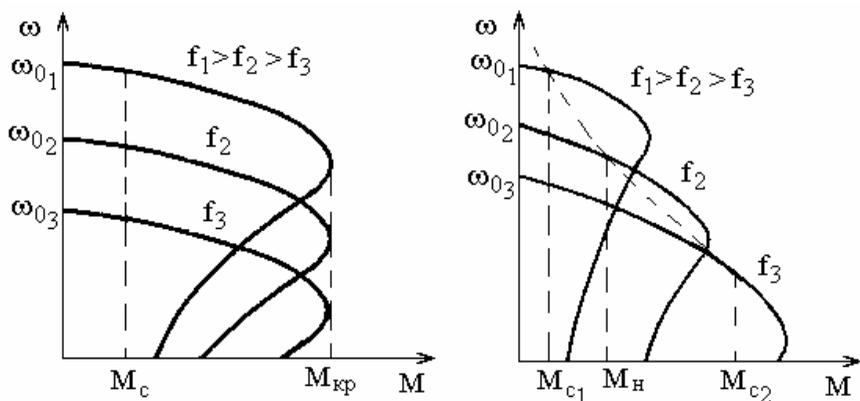
Критический момент при частоте f_1 , отличной от номинальной, равен

$$M_{ки} = M_{ке} \cdot (f_{н}/f_1)^2 \quad (11.8)$$

При уменьшении частоты $f_1 < f_{н}$ снижается ω_0 , а магнитный поток Φ увеличивается. Это приводит к глубокому насыщению магнитной цепи и увеличению намагничивающего тока I_{μ} , что вызывает снижение энергетических показателей двигателя ($\cos\varphi$ и η). Для того, чтобы поток Φ оставался постоянным, необходимо при изменении частоты f_1 в той же кратности изменять напряжение, то есть

$$U_1/f_1 = \text{const} \quad (11.9)$$

На рис. 11.6 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при *частотном регулировании*: а) при $U_1/f_1 = \text{const}$; б) при $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$, где $f_1 > f_2 > f_3$.



а) при $U_1/f_1 = \text{const}$

б) $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$

Рис. 11.6. Механические характеристики АД при частотном регулировании

ЛЕКЦИЯ 12

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Рекуперативное торможение асинхронного двигателя.
2. Торможение противовключением.
3. Динамическое торможение.

Для асинхронного электродвигателя существуют следующие виды торможения:

1. *Рекуперативное* торможение с отдачей энергии в сеть (*генераторный режим работы параллельно с сетью*), для которого механические характеристики асинхронного двигателя расположены во втором квадранте.

2. Торможение *противовключением* может быть получено двумя методами:

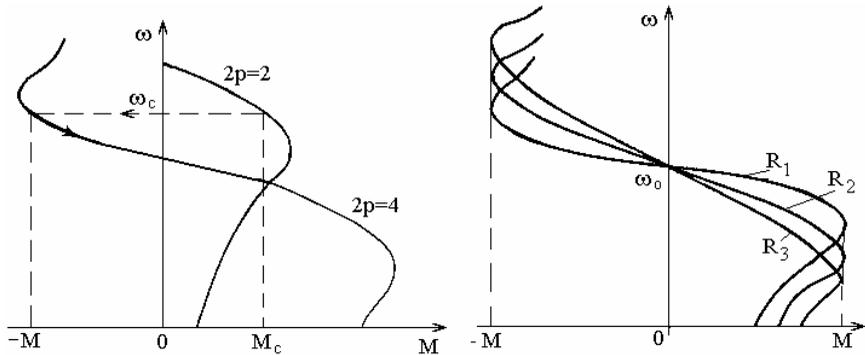
а) изменением чередования фаз обмотки статора и при расположении механических характеристик двигателя во втором квадранте;

б) при активном моменте, когда механические характеристики расположены в четвертом квадранте.

3. *Динамическое* торможение с независимым возбуждением или самовозбуждением. Механические характеристики динамического торможения располагаются во втором или в четвертом квадрантах.

Режим рекуперативного торможения АД возможен при частоте вращения ротора выше синхронной, то есть $\omega > \omega_0$. При этом скольжении $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 < 0$ становится отрицательным, что ведет к изменению направления активной мощности, которая в двигательном режиме передавалась к ротору, а в генераторном режиме отдается в сеть. Момент двигателя меняет свое направление и становится тормозным. Механическая характеристика в рекуперативном режиме аналогична

двигательному режиму, однако величина критического момента будет больше $M_{кр} = (1.5...3) \cdot M_{кд}$ (рис. 12.1).



а) при переключении числа пар полюсов двухскоростного АД

б) при введении добавочного сопротивления в цепь ротора АД с фазным ротором

Рис. 12.1. Механические характеристики АД при рекуперативном торможении

Торможение противовключением в асинхронных двигателях, как и для двигателей постоянного тока, существует двух видов (с активным и реактивным M_c).

При активном моменте в цепь ротора АД с фазным ротором вводится добавочное сопротивление с таким расчетом, чтобы $M < M_c$. Под действием статического момента двигатель сначала снижает обороты до $\omega = 0$ (рис. 12.2), а затем реверсируется (точка А на рис. 12.2).

При реактивном статическом моменте режим торможения противовключением получают путем чередования двух фаз. На рис. 12.2 показаны соответствующие механические характеристики: 1-1' – АД с короткозамкнутым ротором, 2-2' – АД с фазным ротором.

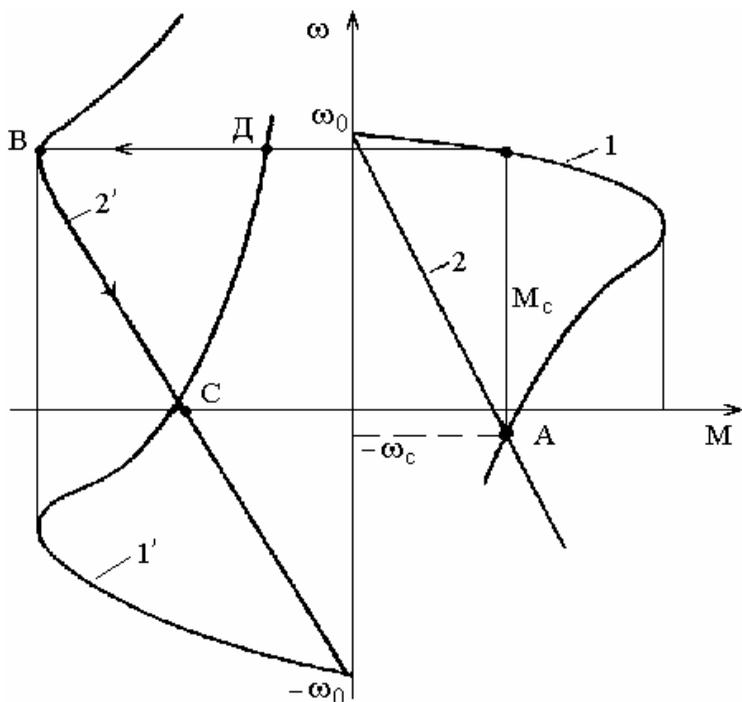


Рис. 12.2. Механические характеристики АД в режиме торможения противовключением

Использование АД с КЗ ротором в режиме противовключения приводит к перегрузке обмоток по току (см. [рис. 10.2](#) – электромеханическая характеристика АД), которые могут превышать в 7-8 раз номинальный ток, КПД резко падает, поскольку преобразуемая в электрическую энергию механическая энергия и электрическая энергия, потребляемая из сети, тратится на потери в цепи ротора.

Использование двигателя с фазным ротором позволяет сформировать тормозную характеристику, ограничить ток и производить торможение с максимальным моментом.

Более широко применяется *динамическое торможение с независимым возбуждением*, когда обмотка статора отключается от сети переменного тока, и две фазы

подключаются к источнику постоянного тока (рис. 12.3, а). Постоянный ток, протекающий по обмотке статора, создает *неподвижный* магнитный поток, который, пересекая обмотку вращающегося ротора, наводит в ней ЭДС. Последняя создает ток, от взаимодействия которого с магнитным полем статора, возникает тормозной момент. По мере снижения частоты вращения уменьшаются ЭДС, ток, тормозной момент, а при $\omega = 0$ они исчезают. Из рис. 12.3, б видно, что максимальный тормозной момент M_{TM} тем больше, чем больше величина постоянного тока в обмотке статора (механическая характеристика 3 с током торможения I_{2H} и МХ кривая 2 с током I_{1H}).

Использование АД с фазным ротором позволяет переместить критическую частоту вращения в область больших угловых скоростей, а критический тормозной момент остается постоянной величиной (механическая характеристика 4).

Динамическое торможение с *самовозбуждением* получается при наличии конденсаторной батареи, которая подключается параллельно обмоткам фаз статора двигателя. Используется как аварийный вид торможения.

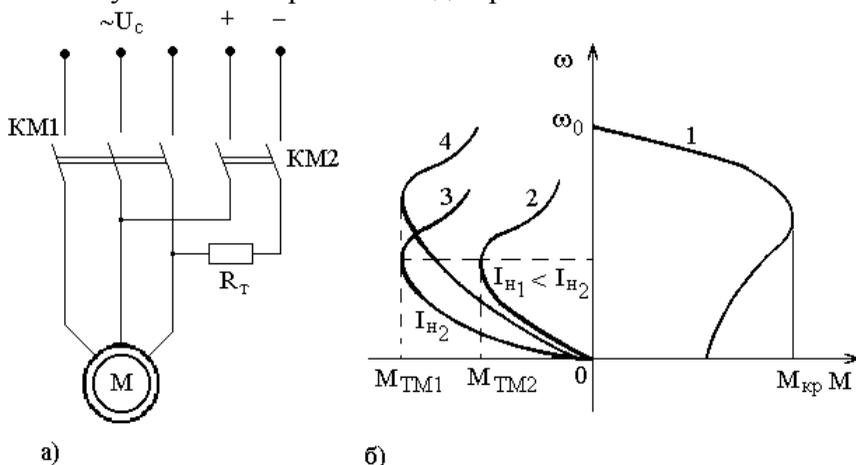


Рис. 12.3. Схема включения АД при динамическом торможении (а) и механические характеристики (б) АД в режиме динамического торможения

ЛЕКЦИЯ 13

СИНХРОННАЯ МАШИНА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Конструктивные особенности синхронных машин.
2. Угловая и механическая характеристики.
3. Шаговый режим работы синхронного двигателя.

Конструкция статора *синхронных машин* (СМ) переменного тока принципиально не отличается от асинхронных электрических машин (см. [лекцию № 9](#)). СМ, как правило выполняются с *явнополюсным* ротором, на котором размещается *обмотка возбуждения*, питание которой осуществляется *от источника постоянного тока* через контактные кольца. Особенностью этих машин переменного тока является *синхронное* вращение ротора с полем статора. При работе в двигательном режиме ротор отстает от поля статора на угол $\theta_{эл}$:

$$\theta_{эл} = \varphi_{0эл} - \varphi_{эл} = \omega_{0эл} \cdot t - \varphi_{эл} , \quad (13.1)$$

при работе в генераторном режиме – опережает поле статора на тот же угол.

Электромагнитный момент M синхронной машины с явнополюсным ротором состоит из двух составляющих, первая из которых – момент M' обусловлена взаимодействием вращающегося поля статора с полем возбужденного ротора, а вторая представляет собой реактивный момент M'' , обусловленный явнополюсным исполнением ротора. Отметим, что M'' зависит от двойного угла $\theta_{эл}$.

Принципиальный вид *угловой характеристики*

$$M = f(\theta_{эл}) = M'_{\max} \cdot \sin(\theta_{эл}) + M''_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \theta_{эл}) \quad (13.2)$$

показан на рис. 13.1. Ее анализ показывает, что увеличение $\theta_{эл}$ вызывает рост электромагнитного момента по зависимости, близкой к линейной в зоне нулевого угла $\theta_{эл}$. При $\theta_{эл} > 45^\circ$ темп нарастания под влиянием реактивного момента M'' быстро снижается, и после достижения максимума дальнейшее

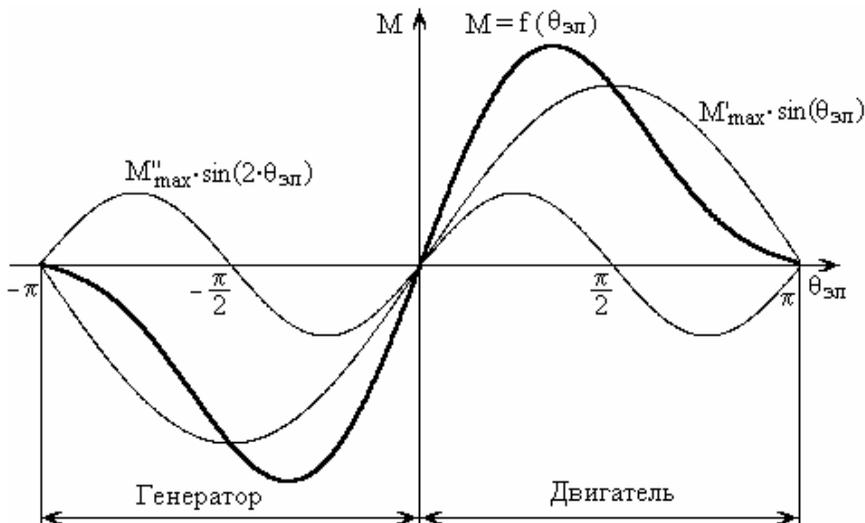


Рис. 13.1. Угловая характеристика синхронной электрической машины

возрастание угла $\theta_{эл}$ влечет за собой уменьшение электромагнитного момента синхронной машины. Для СМ с неявнополюсным ротором максимум момента наступает при $\theta_{эл} = 90^\circ$.

В номинальном режиме работы угол $\theta_{эл, н} = 20^\circ..30^\circ$. Перегрузочная способность синхронных машин $\lambda = 2..3$. Электромагнитный момент СМ менее чувствителен к напряжению сети, чем для асинхронных электрических машин.

Рабочий участок угловой характеристики $M = f(\theta_{эл})$ можно с приемлемой для многих инженерных расчетов точностью считать линейным, проходящим через точку номинального режима:

$$M \approx \frac{M_n \cdot \theta_{эл}}{\theta_{эл, н}} = C_{эм} \cdot \theta_{эл}, \quad (13.3)$$

где $C_{эм}$ – электромагнитная жесткость угловой характеристики.

Статическая механическая характеристика синхронной электрической машины является *абсолютно жесткой* и проходит параллельно оси моментов через точку синхронной скорости, как показано на рис. 13.2, линия 1.

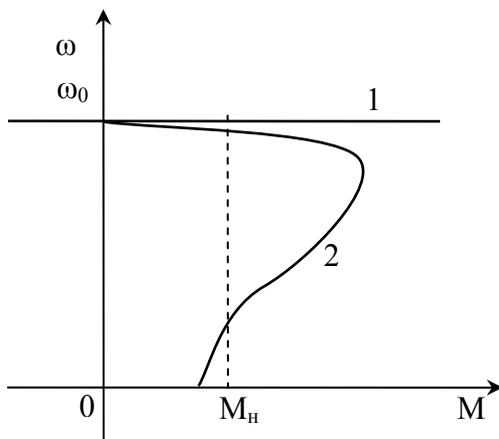


Рис. 13.2. Механические характеристики синхронной электрической машины при работе в номинальном режиме (1) и при пуске (2)

Из-за абсолютной жесткости характеристики синхронные машины имеют повышенную колебательность при пусках и при изменении (набросе) нагрузки. Для борьбы с этим явлением в роторе СМ располагают короткозамкнутую обмотку, подобную "беличьей клетке" асинхронных электрических машин. На рис. 13.2 кривой 2 показана МХ такой обмотки. Электромеханический момент, таким образом, имеет еще одну составляющую – момент асинхронной роторной обмотки.

Пуск синхронной машины осуществляется без питания обмотки возбуждения ротора благодаря пусковой короткозамкнутой обмотке. При достижении установившейся скорости в ОВ ротора подают напряжение – и синхронная машина *втягивается в синхронизм*, т.е. выходит на номинальную синхронную частоту вращения.

При набросе нагрузки возникающие колебания, характерные для синхронных электрических машин, демпфируются также благодаря короткозамкнутой обмотке на роторе.

Синхронные машины используют преимущественно в качестве генераторов. Важной особенностью применения синхронных электродвигателей является свойство потреблять из питающей сети реактивную мощность, улучшая такую энергетическую характеристику как $\cos\varphi$. При этом используют, как правило, регулирование напряжения на обмотке возбуждения.

Для синхронного электродвигателя возможна *фиксация положения ротора* путем подключения обмоток фаз статора к источнику постоянного напряжения. Для анализа этой возможности используем двухфазную модель синхронного ЭД в осях α , β , q и d [3], показанную на рис. 13.3. Примем, что обмотка статора по оси α подключена к источнику напряжения $U_{1\alpha}$, а обмотка по оси β отключена, т.е. поле статора создается обмоткой 1α и оно направлено по оси α . Возбужденный ротор, взаимодействуя с полем статора, создает синхронизирующий момент, зависящий от угла $\varphi_{эл}$. Если при этих условиях отклонить ротор от точки $\varphi_{эл} = 0$ в любую сторону, то в ЭД возник-

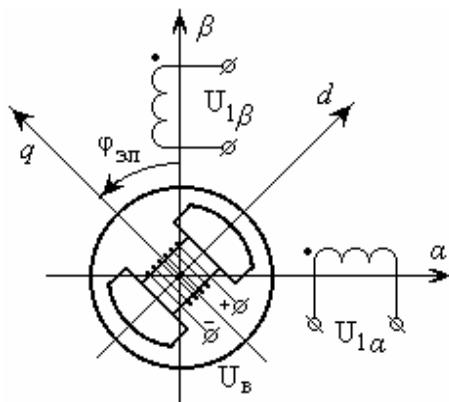


Рис. 13.3. Двухфазная модель синхронного двигателя в осях α , β , q и d

нет момент, направленный противоположно перемещению, т.е. стремящийся вернуть систему в исходное состояние.

Таким образом, при возбуждении статора постоянным током ротор синхронного электродвигателя фиксируется в положении, которое определяется направлением поля статора (фактически направлением вектора тока статора), с точностью, зависящей от нагрузки на валу и от электромагнитной жесткости угловой характеристики $C_{эм}$, которую можно определить по формуле

$$C_{эм} = \frac{P_{п} \cdot M_{н}}{\theta_{эл, н}}. \quad (13.4)$$

Примем, что $M_c = 0$ и в статическом режиме ротор занимает положение, соответствующее $\varphi_{эл} = 0$. Если при этом отключить обмотку $I\alpha$ и подать напряжение на обмотку $I\beta$, то результирующий вектор тока (т.е. направление поля статора) скачком повернется на угол $\Delta\varphi_{ш} = 90^\circ$, значение $\varphi_{0эл}$ станет равным $\Delta\varphi_{ш}$, возникнет электромагнитный момент, который будет стремиться вновь совместить ось ротора с вектором поля статора и вызывать поворот ротора в сторону новой точки фиксации. Таким путем можно задавать дискретные перемещения ротора двигателя, соответствующие определенному числу шагов. Такой режим работы синхронного двигателя называется *шаговым режимом*.

Средняя скорость перемещения определяется частотой f_1 импульсов тока в обмотках статора

$$\omega_{ср} = f_1 \cdot \Delta\varphi_{ш}. \quad (13.5)$$

Средний за один шаг момент определяется соотношением

$$M_{ср} = 2 \cdot M_{max} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{m}{2\pi}\right), \quad (13.6)$$

где m – число фаз двигателя.

В шаговом режиме синхронный электродвигатель способен обрабатывать перемещения, задаваемые числом электри-

ческих импульсов, коммутирующих токи статора в требуемой последовательности. Жесткая связь между числом шагов перемещения ротора и числом электрических импульсов широко используется в практике дискретного электропривода с цифровым управлением. Разработаны и промышленно выпускаются специальные синхронные двигатели, называемые *шаговыми*. Они имеют обычно небольшую (до 4 кВт) мощность и выполняются с различным числом фаз ($m = 3, 4, 5, \dots$) и числом пар полюсов $p_n > 2$. От этих параметров зависит значение шага:

$$\Delta\varphi_{ш} = \frac{\pi}{m \cdot p_n}, \quad (13.7)$$

которая определяет точность обработки перемещений при описанном способе коммутации обмоток статора. На практике используют более сложные законы управления, позволяющие дробить шаг.

Конструктивно шаговые ЭД имеют ряд исполнений по способу возбуждения (с ОВ и с постоянными магнитами) и по характеру движения (двигатели с вращающимся движением ротора, ЭД с линейным движением ротора, двигатели с многокоординатным линейным движением ротора).

На этом заканчивается раздел, посвященный механическим и электромеханическим свойствам электродвигателей. Далее возвращаемся к анализу механической части электропривода.

ЛЕКЦИЯ 14

ПРИВЕДЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА К РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Кинематическая и расчетная схемы механической части электропривода. Процесс приведения схем.
2. Правила приведения моментов инерции и поступательно движущихся масс.
3. Правила приведение упругих деформаций.
4. Приведение скоростей, моментов и усилий.
5. Учет направления потока энергии.
6. Правила начертания расчетных схем.

Исследовать свойства электропривода возможно лишь при наличии *кинематической схемы* ЭП, которая дает непосредственное представление о движущихся массах установки и механических связях между ними. В промышленности имеется значительное многообразие механизмов и способов соединения их с двигателями, однако существуют общие принципы построения кинематических схем.

В общем случае МЧ ЭП представляет собой многомассовую упругую механическую систему, в которой массы движутся с разными скоростями как вращательными, так и поступательными. Это затрудняет количественную оценку влияния каждой массы, моментов инерции и усилий на работу механической части электропривода. Необходимая базовая величина, которая давала бы возможность сравнивать между собой параметры механической части. В качестве такой базовой величины принимается в большинстве случаев скорость электродвигателя, хотя для ряда задач бывает удобным выбрать скорость движения рабочего механизма. Используя базовую скорость, можно перейти от реальной кинематической схемы электропривода к *расчетной*. Этот процесс называется *приведением*.

В основу приведения положен закон *сохранения энергии*. Это значит, что *при приведении кинематической схемы к расчетной необходимо обеспечить сохранение запаса кинетической и потенциальной энергии системы, а также величины элементарной работы всех действующих в системе сил и моментов на возможных перемещениях.*

Для *вращательного движения* приведение момента инерции i -го элемента к угловой скорости электродвигателя осуществляется из условия равенства кинетических энергий

$$J_{\text{пр}i} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} = J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{2}. \quad (14.1)$$

Полученная формула приведения

$$J_{\text{пр}i} = J_i \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_1} \right)^2 = \frac{J_i}{i_{1i}^2}, \quad (14.2)$$

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

$i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$ – передаточное число от вала двигателя (цифра 1) к i -му валу установки.

Для *поступательно движущихся масс* (элементы имеют индекс j) закон сохранения энергии примет вид

$$J_{\text{пр}j} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} = m_j \cdot \frac{V_j^2}{2}, \quad (14.3)$$

тогда имеем следующую формулу приведения:

$$J_{\text{пр}j} = m_j \cdot \left(\frac{V_j}{\omega_1} \right)^2 = m_j \cdot \rho_{1j}^2, \quad (14.4)$$

где ρ_{1j} – радиус приведения j -го поступательно движущегося элемента к скорости приведения ω_1 .

В общем случае момент инерции механической части электропривода рассчитывается по формуле

$$J = J_{\text{эд}} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{J_i}{i_{1i}} \right)^2 + \sum_{j=1}^k (m_j \cdot \rho_{1j}^2), \quad (14.5)$$

где $J_{\text{эд}}$ – момент инерции ротора двигателя;

J_i – момент инерции i -ой вращающейся массы механической части электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$ – передаточное число от вала ЭД к i -ой вращающейся массе МЧ ЭП (к i -му валу установки);

m_j – масса поступательно движущегося j -го элемента механической части электропривода, кг ;

$\rho_{1j} = V_j / \omega_1$ – радиус приведения j -го поступательно движущегося элемента кинематической схемы к валу двигателя, вращающегося со скоростью ω_1 , м ; V_j – линейная скорость j -го элемента, м/с .

Кроме моментов инерции, важным параметром МЧ ЭП являются *упругие деформации (упругости)*. Это физическое явление в электроприводе является причиной различных усталостных напряжений и динамических перегрузок отдельных элементов механики. Учет упругости существенно уточняет (и, следовательно – усложняет) расчет и анализ механической части ЭП. Различают упругости *I рода* (при вращательном движении) и упругости *II рода* (при линейных удлинениях). Отметим, что в упругих связях при их деформации запасается потенциальная энергия.

Рис. 14.1-а иллюстрирует физическую сущность упругих деформаций для вращательного движения. Точке **a** одного сечения цилиндрического вала в другом сечении соответствует точка **a'**. Под действием крутящего момента M сечение смещается на угол $\Delta\varphi_i$, точка **a'** переходит в **a''**. Угол, естественно, зависит от расстояния между сечениями (длины вала), физических свойств материала и крутящего момента M [5]. С увеличением M возрастает $\Delta\varphi_i$. Численная характеристика угла по-

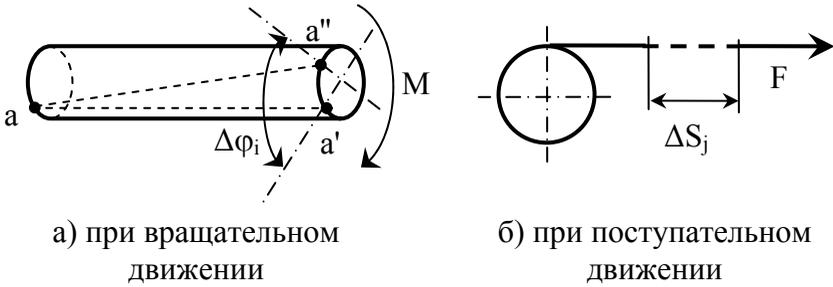


Рис. 14.1. Физика процессов упругой деформации

ворота называется *упругостью*, единица измерения – Н·м, определяется как отношение крутящего момента к углу поворота:

$$C = M/\Delta\varphi_i. \quad (14.6)$$

Для приведения *упругих деформаций* при *вращательном* движении можно воспользоваться определением передаточного отношения:

$$i_{1i} = \frac{\omega_1}{\omega_i} = \frac{d\varphi_1}{d\varphi_i}, \quad (14.7)$$

где i – передаточное число от вала двигателя к i -му валу кинематической схемы установки;

ω_1 и ω_2 – угловые скорости вращения;

φ_1 и φ_2 – углы поворота.

При $i = \text{const}$ имеется возможность перейти к конечным приращениям

$$i_{1i} = \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_i} \Rightarrow \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_{\text{пр}1i} = \Delta\varphi_i \cdot i_{1i}. \quad (14.8)$$

Потенциальная энергия $W_{\text{п}}$ в упругих элементах для вращательного движения определяется по формуле:

$$W_{\text{п}} = \frac{C_i \cdot (\Delta\varphi_i)^2}{2}. \quad (14.9)$$

В случае приведения жесткостей C_i к валу электродвигателя следует соблюсти равенство потенциальных энергий

$$\frac{C_{\text{пр}i} \cdot (\Delta\varphi_{\text{пр}i})^2}{2} = \frac{C_i \cdot (\Delta\varphi_i)^2}{2}. \quad (14.10)$$

Тогда, учитывая формулу (14.8), получаем приведенное значение жесткости C_i :

$$C_{\text{пр}i} = C_i \cdot \left(\frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_{\text{пр}i}} \right)^2 = \frac{C_i}{(i_{1i})^2}. \quad (14.11)$$

Физическая сущность упругих сил при линейных деформациях показана на рис. 14.1-б. Под действием силы F_j упругий элемент (полотно транспортера, трос и т.п.) удлиняется (растягивается) на величину ΔS_j [5]. Для линейных перемещений целесообразно применить формулу радиуса приведения

$$\rho_{1j} = \frac{V_j}{\omega_1} = \frac{dS_j}{d\varphi_1}. \quad (14.12)$$

При $\rho_{1j} = \text{const}$ переходим к приращениям, и тогда приведенное значение линейной деформации определяется как

$$\Delta\varphi_{1j} = \Delta S_j / \Delta\rho_{1j}. \quad (14.13)$$

При линейных деформациях потенциальная энергия

$$W_{\text{п}j} = \frac{C_j \cdot (\Delta S_j)^2}{2}. \quad (14.14)$$

Используя указанную формулу для приведения C_j к валу двигателя, можно записать равенство

$$\frac{C_{\text{пр}1j} \cdot (\Delta\varphi_{\text{пр}j})^2}{2} = \frac{C_j \cdot (\Delta S_j)^2}{2}. \quad (14.15)$$

Поскольку $\Delta\varphi_{\text{пр}1j} = \Delta S_j / \Delta\rho_{1j}$, то приведенная к валу электродвигателя жесткость C_j определяется по формуле

$$C_{\text{пр}1j} = C_j \cdot \left(\frac{\Delta S_j}{\Delta\varphi_{\text{пр}j}} \right)^2 = C_j \cdot \rho_{1j}^2. \quad (14.16)$$

Для приведения скоростей необходимо воспользоваться понятиями передаточного числа (смотри формулу 14.2) и радиуса приведения (формула 14.4).

Приведение моментов и усилий выполняется из условия равенства элементарной работы момента M_i или усилия F_j в реальной и приведенной схемах:

$$M_i \cdot \Delta\varphi_i = M_{\text{пр}1i} \cdot \Delta\varphi_{\text{пр}i} \quad (14.17)$$

$$F_j \cdot \Delta S_j = M_{\text{пр}1i} \cdot \Delta\varphi_{\text{пр}i} \quad (14.18)$$

Из соотношений находим приведенные моменты:

а) для вращательного движения:

$$M_{\text{пр}1i} = M_i \cdot \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_{\text{пр}i}} = \frac{M_i}{i_{1i}}; \quad (14.19)$$

б) для поступательного движения:

$$M_{\text{пр}1j} = F_j \cdot \frac{\Delta S_j}{\Delta\varphi_{\text{пр}j}} = F_i \cdot \rho_{1j}. \quad (14.20)$$

Подобные зависимости можно также получить из равенства мощностей:

$$M_i \cdot \omega_i = M_{\text{пр}1i} \cdot \omega_1; \quad (14.21)$$

$$F_j \cdot V_j = M_{\text{пр}1j} \cdot \omega_1. \quad (14.22)$$

Из зависимостей (14.21) и (14.22) выводятся формулы, аналогичные (14.19) и (14.20):

а) для вращательного движения:

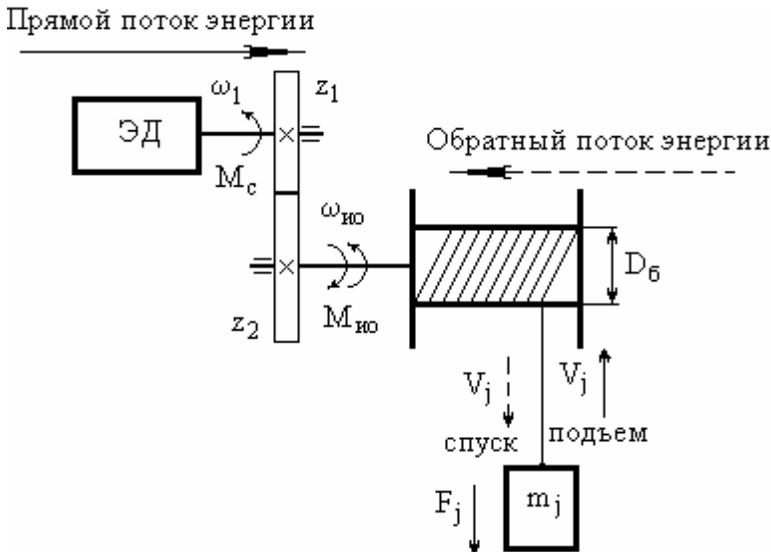
$$M_{\text{пр}1i} = M_i \cdot \frac{\omega_i}{\omega_1} = \frac{M_i}{i_{1i}};$$

б) для поступательного движения:

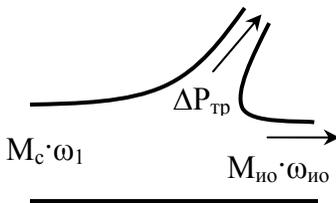
$$M_{\text{пр}1j} = F_j \cdot \frac{V_j}{\omega_1} = F_i \cdot \rho_{1j}.$$

Рассмотренные ранее правила приведения моментов и усилий характерны для получения приведенных полезных моментов, но не для статического момента на валу двигателя, так как не учитывают потери в кинематической цепи. Для получения значения приведенного M_c необходимо знать *направление потока энергии*.

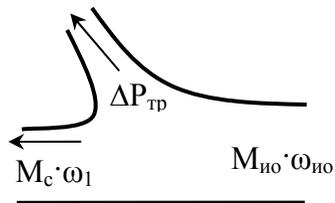
Если энергия направлена от двигателя к РМ, то говорят о *прямом* направлении потока энергии (рис. 14.2). Когда же поток энергии направлен по кинематической цепи в сторону ЭД,



а) силы и моменты в кинематической схеме электропривода



б) при прямом потоке энергии (подъем груза)



в) при обратном потоке энергии (спуск груза)

Рис. 14.2. Направление потоков мощности в электроприводе

то имеют дело с *обратным* направлением потока энергии. Величина $\Delta P_{\text{тр}}$ учитывает потери на трение в механизме (КПД).

Рассмотрим определение статического момента для различных направлений потока энергии.

Для *прямого направления потока энергии*.

а) При вращательном движении M_c равен:

$$M_c \cdot \omega_1 - M_c \cdot \omega_1 \cdot (1 - \eta) = M_{\text{ио}} \cdot \omega_{\text{ио}}, \quad (14.23)$$

где $M_c \cdot \omega_1$ – мощность на валу двигателя;

$M_c \cdot \omega_1 \cdot (1 - \eta)$ – мощность потерь на трение;

η – КПД передачи;

$M_{\text{ио}} \cdot \omega_{\text{ио}}$ – мощность на валу исполнительного органа рабочей машины.

После преобразований формулы (14.23) получим

$$M_c \cdot \omega_1 \cdot \eta = M_{\text{ио}} \cdot \omega_{\text{ио}}; \quad (14.24)$$

$$M_c = M_{\text{ио}} \cdot \frac{\omega_{\text{ио}}}{\omega_1 \cdot \eta} = \frac{M_{\text{ио}}}{i_p \cdot \eta}, \quad (14.25)$$

где $M_{\text{ио}}/i_p = M_{\text{пол}}$ – полезный приведенный момент ИО.

б) При поступательном движении

$$M_c \cdot \omega_1 - M_c \cdot \omega_1 \cdot (1 - \eta) = F_j \cdot V_j, \quad (14.26)$$

$$M_c \cdot \omega_1 \cdot \eta = F_j \cdot V_j, \quad (14.27)$$

тогда статический момент будет равен

$$M_c = F_j \cdot \left(\frac{V_j}{\omega_1} \right) \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{F_j \cdot \rho_{1j}}{\eta}. \quad (14.28)$$

С учетом изложенного, ЭД при прямом направлении потока энергии преодолевает не только полезный момент $M_{\text{пол}}$ исполнительного органа, но и момент трения в кинематической цепи $M_{\text{тр}}$ (рис. 14.3), то есть статический момент M_c равен

$$M_c = M_{\text{пол}} + M_{\text{тр}}. \quad (14.29)$$

Для *обратного направления потока энергии*, например при спуске груза, когда поток энергии направлен от рабочей

машины к электродвигателю, статический момент определяется следующим образом.

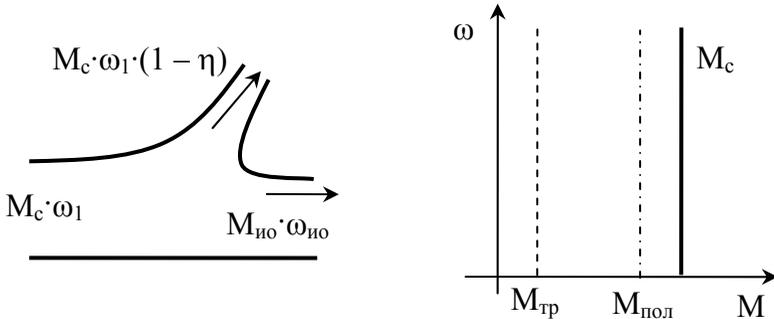


Рис. 14.3. Приведение моментов при прямом направлении потока энергии

а) При вращательном движении

$$M_{ио} \cdot \omega_{ио} - M_{ио} \cdot \omega_{ио} \cdot (1 - \eta) = M_c \cdot \omega_1 . \quad (14.30)$$

После преобразования получим

$$M_c \cdot \omega_1 = M_{ио} \cdot \omega_{ио} \cdot \eta . \quad (14.31)$$

Статический момент на валу двигателя

$$M_c = M_{ио} \cdot \left(\frac{\omega_{ио}}{\omega_1} \right) \cdot \eta = \frac{M_{ио} \cdot \eta}{i_p} . \quad (14.32)$$

б) При поступательном движении

$$F_j \cdot V_j - F_j \cdot V_j \cdot (1 - \eta) = M_c \cdot \omega_1 . \quad (14.33)$$

После преобразования получим

$$F_j \cdot V_j \cdot \eta = M_c \cdot \omega_1 . \quad (14.34)$$

Статический момент на валу двигателя соответственно

$$M_c = F_j \cdot \left(\frac{V_j}{\omega_1} \right) \cdot \eta = F_j \cdot \rho_{1j} \cdot \eta . \quad (14.35)$$

При обратном направлении потока энергии (рис. 14.4) часть потока энергии затрачивается на преодоление сил трения $M_{тр}$ и результирующий M_c будет меньше приведенного полезного момента $M_{пол}$ на величину момента потерь $M_{тр}$, то есть

$$M_c = M_{\text{пол}} - M_{\text{тр}} . \quad (14.36)$$

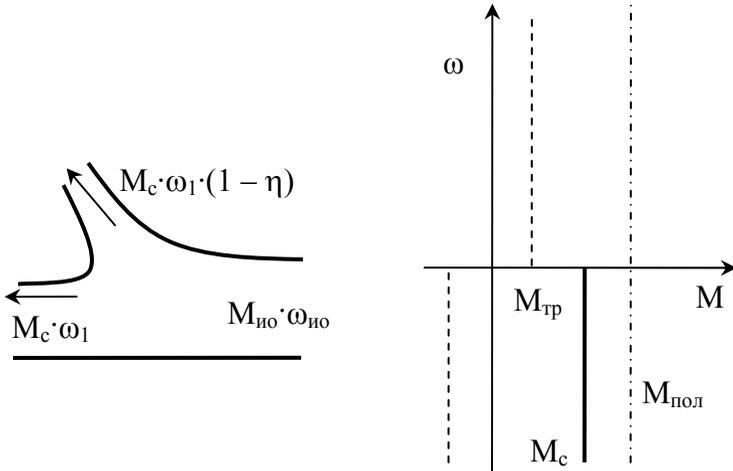


Рис. 14.4. Приведение моментов и усилий к валу двигателя при обратном направлении потока энергии

Из указанных формул приведения следует, что при вращательном движении для приведения к валу ЭД параметров i -го элемента необходимо знать передаточное число от вала двигателя до i -го элемента, а в случае поступательного движения требуется знать радиус приведения r_{ij} -го элемента к валу двигателя. С учетом правил приведения составляют расчетную схему механической части электропривода.

Существуют определенные *правила начертания* расчетных схем. Для наглядности моменты инерции выполняются в виде прямоугольников, площадь которых пропорциональна величине приведенного момента инерции. Расстояние между ними принимают обратно пропорциональным жесткости упругой связи между моментами инерции или прямо пропорционально *податливости*

$$\Pi_i = 1/C_i . \quad (14.37)$$

ЛЕКЦИЯ 15

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Режимы работы электропривода.
2. Одномассовая модель механической части ЭП.
3. Использование уравнений Лагранжа для исследования свойств механической части электропривода с упругостью.
4. Линейные и разветвленные расчетные схемы.

Основное уравнение движения электропривода (формула 4.9) позволяет по знаку динамического момента

$$M_d = J \cdot \varepsilon, \quad (15.1)$$

где $\varepsilon = d\omega/dt$ – угловое ускорение электропривода, c^{-2} ; определить два режима работы электропривода.

1). *Установившейся* режим, когда $\varepsilon = 0$ и момент двигателя M равен моменту сопротивления нагрузки M_c .

2). *Динамический* или *переходной* режим, когда $\varepsilon > 0$ и имеет место *ускоренное* движение электропривода ($M > M_c$) или $\varepsilon < 0$, что соответствует *замедленному* движению электропривода ($M < M_c$).

Графически режимы работы ЭП при постоянном статическом моменте ($M_c = \text{const}$) и неизменном моменте инерции ($J = \text{const}$) показаны на рис. 15.1. Очевидно, что характер движения электропривода определяется величиной и знаком углового ускорения ε .

Исследование динамических свойств механической части электропривода (МЧ ЭП) проведем с помощью различных математических моделей механической части.

Основное уравнение движения ЭП с помощью прямого преобразования Лапласа позволяет получить для суммарного

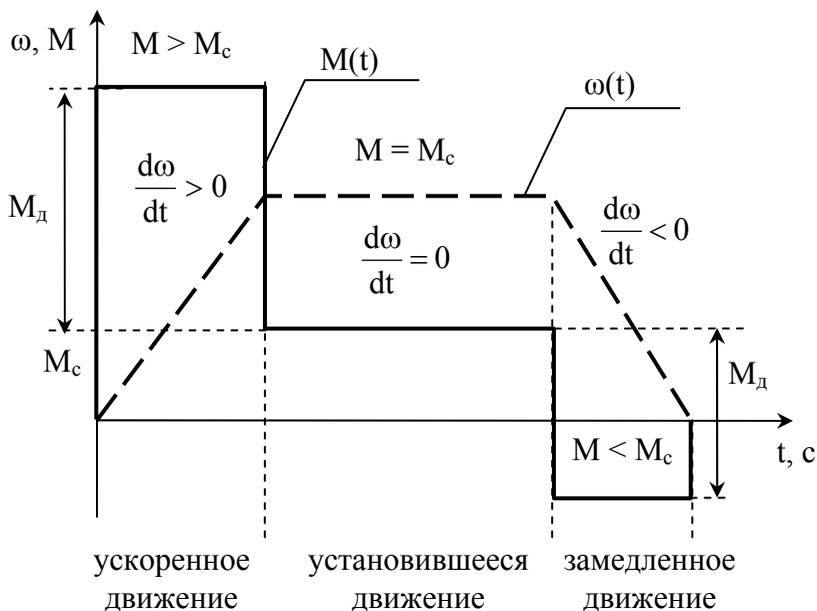


Рис. 15.1. Режимы работы электропривода

момента инерции J_{Σ} *одномассовую математическую модель* механической части электропривода

$$M(p) - M_c(p) = J_{\Sigma} \cdot p \cdot \omega(p), \quad (15.2)$$

структурная схема которой показана на рис. 15.2-а.

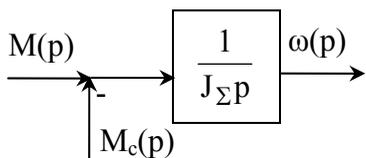
Передаточная функция по управляющему воздействию

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p}, \quad (15.3)$$

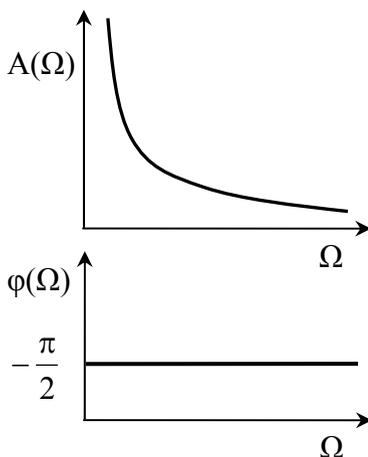
по возмущающему воздействию

$$W_f(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p}. \quad (15.4)$$

Поскольку знаменатели передаточных функций равны, то характер переходных процессов будет одинаков. Проанализируем поведение ЭП по отношению к управляющему воздейст-



а) математическая модель
одномассовой МЧ ЭП



б) частотные характеристики
одномассовой МЧ ЭП

Рис. 15.2. Структурная схема и частотные характеристики
одномассовой механической части электропривода

вию $M(p)$. Подставив $p = j\Omega$ в уравнение 15.3, получим амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ)

$$W(j\Omega) = \frac{1}{J_\Sigma \cdot j \cdot p} = \frac{-j}{J_\Sigma \cdot p}. \quad (15.5)$$

Из полученной формулы следует [6], что вещественная частотная характеристика $P(\Omega) = 0$, а мнимая частотная характеристика $Q(\Omega) = \frac{-1}{J_\Sigma \cdot \Omega}$. Соответственно, амплитудная частотная характеристика (АЧХ) будет равна

$$A(\Omega) = \sqrt{P(\Omega)^2 + Q(\Omega)^2} = \frac{1}{J_\Sigma \cdot \Omega}. \quad (15.6)$$

Фазовая частотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi(\Omega) = \arctg\left(\frac{Q(\Omega)}{P(\Omega)}\right) = -\frac{\pi}{2}. \quad (15.7)$$

Таким образом, механическая часть электропривода является *интегрирующим* звеном с типичными частотными характеристиками (рис. 15.2-б), анализ которых свидетельствует, что амплитуда колебаний угловой скорости *зависит* от частоты вынужденных колебаний Ω , а фаза остается *постоянной*, указывая на *запаздывание регулируемого параметра*. АЧФ свидетельствует также о том, что механическая часть электропривода является *фильтром низких частот*.

Одномассовая модель МЧ ЭП дает только общее представление о характере переходных процессов (ПП) и не отражает ряда важных физических свойств механической части реального электропривода, которая представляет собой *многомассовую упругую механическую систему*. Наличие упругих связей накладывает определенные особенности на протекание в МЧ ЭП динамических процессов, отличающихся от процессов в одномассовом звене.

Для описания динамических свойств механической системы наиболее универсальными являются *уравнения движения в обобщенных координатах*, то есть *уравнения Лагранжа* [3]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad (15.8)$$

где W_k – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i (угловые и линейные перемещения) и обобщенные скорости \dot{q}_i (угловые или линейные скорости);

$Q_i = \delta A_i / \delta q_i$ – обобщенная сила (момент или усилие), определяемая суммой элементарных работ δA_i всех действующих сил на возможном перемещении δq_i .

Число обобщенных координат, как и число уравнений Лагранжа, описывающих динамические характеристики объекта моделирования, соответствует числу степеней свободы объекта, в данном случае – механической системы.

Как говорилось в предыдущей лекции (смотри [лекцию 14](#)), при наличии в кинематической схеме механической части электропривода передаточных устройств, обеспечивающих согласование форм или скоростей движения исполнительного органа с двигателем, целесообразно привести переменные и параметры механической системы к валу двигателя [2, 3]. Это позволяет получить расчетную схему, дающую наглядное представление о реальном влиянии действующих масс, жесткостей на динамические свойства механической части электропривода. Кроме того, в этом случае значительно проще составить систему уравнений Лагранжа, представляющую математическую модель исследуемого объекта.

На практике чаще используют эквивалентную расчетную схему *двухмассовой* упругой системы (рис. 15.3), к которой приводят многомассовую механическую систему, или *одно-массовую* математическую модель, которая получается, если в двухмассовой модели положить эквивалентную жесткость механической связи между массами $C_{12} = \infty$.

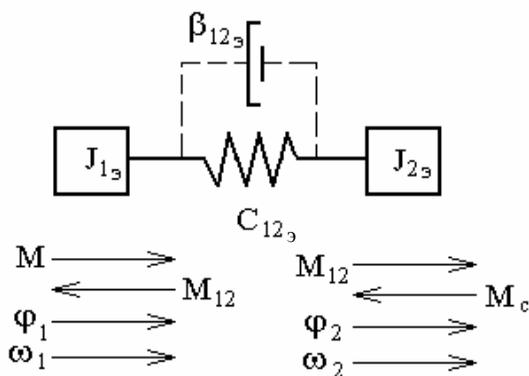


Рис. 15.3. Эквивалентная расчетная схема двухмассовой упругой механической системы

В схеме на рис. 15.3 обобщенными координатами являются *угловые перемещения масс* φ_1 , φ_2 и соответствующие им

обобщенные угловые скорости ω_1, ω_2 . Статические моменты, обусловленные силами трения в элементах кинематической цепи первой ($J_{1э}$) и второй ($J_{2э}$) масс, ввиду их малости приняты равными нулю. В расчетной схеме действуют: M – момент двигателя, M_{12} – момент упругой деформации, M_c – статический момент исполнительного органа рабочей машины. Кроме того, на схеме приведены: C_{12} – жесткость упругой связи между массами, $\beta_{12э}$ – коэффициент внутреннего вязкого трения.

Используем уравнение Лагранжа для получения математической модели двухмассовой механической части ЭП.

Запас кинетической энергии и обобщенные координаты

$$W_k = J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} ;$$

$$q_1 = \varphi_1 ; \quad \dot{q}_1 = \omega_1 ; \quad q_2 = \varphi_2 ; \quad \dot{q}_2 = \omega_2 .$$

Элементарные работы, совершаемые действующими силами, приложенными к первой (δA_1) и второй (δA_2) массам:

$$\delta A_1 = (M - M_{12}) \cdot \delta \varphi_1 ;$$

$$\delta A_2 = (M_{12} - M_c) \cdot \delta \varphi_2 .$$

Обобщенные силы

$$Q_1 = \delta A_1 / \delta q_1 = M - M_{12} ;$$

$$Q_2 = \delta A_2 / \delta q_2 = M_{12} - M_c .$$

Тогда уравнения Лагранжа для двухмассовой механической части электропривода будут иметь следующий вид.

Для первой массы:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \omega_1} \left(J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial \varphi_1} \left(J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} \right) = M - M_{12} ,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{J_1 \cdot 2 \cdot \omega_1}{2} \right) - 0 = M - M_{12} ,$$

$$J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} . \quad (15.9)$$

Для второй массы в результате аналогичных вычислений получаем в окончательном виде уравнение

$$J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_c . \quad (15.10)$$

Очевидно, что уравнения (15.9) и (15.10) являются аналогами основного уравнения движения ЭП (формула 4.9). Для полного описания динамики необходимо уравнение для M_{12} , которое получим из формулы (14.6)

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Учитывая, что $\varphi_i = \int \omega_i dt = \omega_i / p$, в окончательном виде получим уравнение

$$M_{12} = \frac{C_{12}}{p} \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (15.11)$$

Математическая модель двухмассовой упругой механической части электропривода получается из уравнений (15.9), (15.10) и (15.11).

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_c . \\ M_{12} = \frac{C_{12}}{p} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{array} \right. \quad (15.12)$$

Соответствующая структурная схема показана на рис. 15.4. Отметим, что в данной математической модели отсутствует учет *диссипативных сил* – внутреннего трения, определяемых коэффициентом внутреннего вязкого трения β_{12} , и внешнего трения, поскольку статические моменты, обусловленные силами трения в элементах кинематической цепи первой и второй масс были приняты равными нулю.

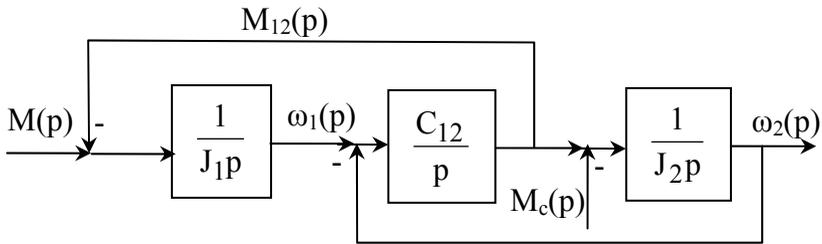


Рис. 15.4. Структурная схема упругой двухмассовой механической части электропривода

Кроме одномассовой и двухмассовой расчетных схем в практике проектирования электропривода используется также *линейные* трех-, четырех- и т.д. массовые расчетные схемы, а также *разветвленные расчетные схемы*. Например, двухдвигательный ЭП (рис. 15.5), работающий на одну рабочую машину (общий вал). Эквивалентную двухмассовую расчетную схему в данном случае можно получить путем объединения моментов инерции двигателей, а эквивалентную жесткость – как сумму C_{12} и C_{23} .

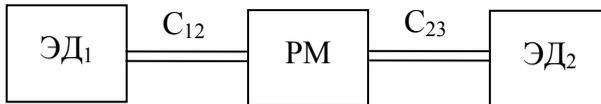


Рис. 15.5. Двухдвигательный электропривод, работающий на одну рабочую машину (РМ)

Возможен и обратный вариант, когда две рабочие машины являются нагрузкой одного электродвигателя. Например, по такой схеме рассчитывается электропривод подъемников с противовесом (лифтов).

Для линейных схем при переходе от N -массовой системы к $(N-1)$ -массовой используются формулы получения *эквивалентных* моментов инерции и упругостей.

Например, переход от трехмассовой (рис. 15.6) расчетной схемы к двухмассовой (рис. 15.3) осуществляется по следующим формулам:

$$J_{1_3} = J_1 + J_2 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}}; \quad (15.13)$$

$$J_{2_3} = J_3 + J_2 \cdot \frac{C_{23}}{C_{12} + C_{23}}. \quad (15.14)$$

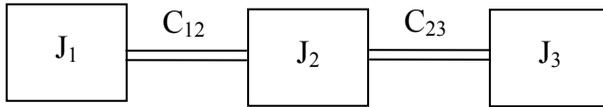


Рис. 15.6. Трехмассовая расчетная схема механической части электропривода

Очевидно, что вторая масса распределяется между J_{1_3} и J_{2_3} прямо пропорционально жесткостям C_{12} и C_{23} .

Эквивалентная жесткость

$$C_{12_3} = \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}}}. \quad (15.15)$$

ЛЕКЦИЯ 16

ДИНАМИКА ДВУХМАССОВОЙ УПРУГОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Анализ упрощенной двухмассовой механической части электропривода.
2. Динамический коэффициент.
3. Учет диссипативных сил внешнего трения.
4. Учет диссипативных сил внутреннего трения.

Из пройденного материала (см. [лекцию 15](#)) известно, что без учета сил диссипативного трения математическая модель упругой двухмассовой системы описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \cdot p \cdot \omega_1 = M - M_{12} \\ J_2 \cdot p \cdot \omega_2 = M_{12} - M_c \\ M_{12} = \frac{C_{12}}{p} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{cases} \quad (16.1)$$

Соответствующая структурная схема приведена на [рис. 15.4](#). Введем обозначения: $W_1 = \frac{1}{J_1 p}$, $W_2 = \frac{C_{12}}{p}$,

$W_3 = \frac{1}{J_3 p}$. Тогда результирующая передаточная функция по управляющему воздействию для скорости ω_2

$$\begin{aligned} W_{\omega_2}(p) &= \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 + W_2 \cdot W_3} = \\ &= \frac{1 \cdot C_{12} \cdot 1}{J_1 \cdot J_2 \cdot p^3 \cdot \left[1 + \frac{C_{12}}{J_1 \cdot p^2} + \frac{C_{12}}{J_2 \cdot p^2} \right]} \end{aligned}$$

$$= \frac{C_{12}}{p} \cdot \frac{1}{J_1 \cdot J_2} \cdot \left[p^2 + \frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2} \right].$$

Введем обозначение частоты свободных колебаний механической части электропривода

$$\Omega_{12}^2 = \frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}. \quad (16.2)$$

Учитывая, что $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$, для $W_{\omega_2}(p)$ получим

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{C_{12}}{J_1 \cdot J_2} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{p^2 + \Omega_{12}^2} = \frac{\Omega_{12}^2}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot (p^2 + \Omega_{12}^2)}. \quad (16.3)$$

АФЧХ по ω_2 имеет вид

$$W_{\omega_2}(j\Omega) = \frac{\Omega_{12}^2}{J_{\Sigma} \cdot j\Omega \cdot (-\Omega^2 + \Omega_{12}^2)} = -j \frac{\Omega_{12}^2}{J_{\Sigma} \cdot \Omega \cdot (\Omega_{12}^2 - \Omega^2)} \quad (16.4)$$

По сравнению с АФЧХ одномассовой системы (формула 15.5) $W_{\omega_2}(j\Omega)$ также имеет только мнимую часть, но содержание ее существенно отличается.

Соответственно, амплитудная частотная характеристика будет равна

$$A_{\omega_2}(\Omega) = \sqrt{P(\Omega)^2 + Q(\Omega)^2} = \frac{\Omega_{12}^2}{J_{\Sigma} \cdot \Omega \cdot (\Omega_{12}^2 - \Omega^2)}. \quad (16.5)$$

Фазочастотная характеристика

$$\varphi_{\omega_2}(\Omega) = \arctg\left(\frac{Q(\Omega)}{P(\Omega)}\right) = \arctg\left(\frac{\left[\frac{-\Omega_{12}^2}{J_{\Sigma} \cdot \Omega \cdot (\Omega_{12}^2 - \Omega^2)}\right]}{0}\right). \quad (16.6)$$

ФЧХ при $\Omega < \Omega_{12}$ $\varphi_{\omega_2}(\Omega) = \arctg(-\infty) = -\frac{\pi}{2}$;

при $\Omega > \Omega_{12}$ $\varphi_{\omega_2}(\Omega) = \text{arctg}(+\infty) = \frac{\pi}{2} = -\frac{3\pi}{2}$.

Для анализа полученных зависимостей, учитывая последующее усложнение модели, воспользуемся методами теории автоматического управления [6] и построим логарифмические характеристики двухмассовой модели МЧ ЭП. Характеристики выходной скорости ω_2 показаны на рис. 16.1-б.

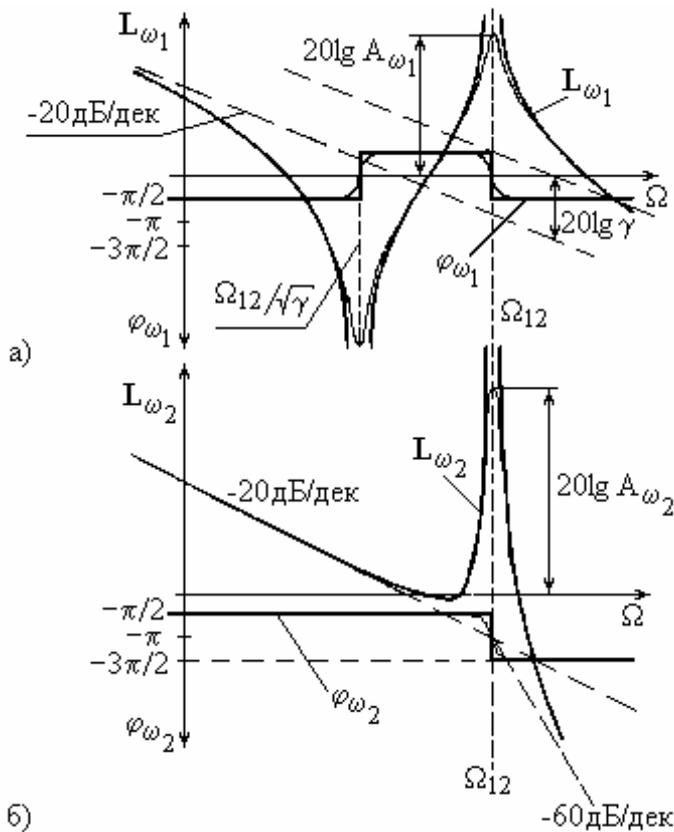


Рис. 16.1. Логарифмические характеристики двухмассовой упругой системы по управляющему воздействию

Скорость ω_2 в двухмассовой системе (скорость рабочего механизма) является аналогом выходной скорости в одномассовой, поэтому целесообразно выявить отличия этих координат. Упрощенная двухмассовая модель механической части электропривода, как и одномассовая, сохраняет *интегрирующие* свойства, но при $\Omega = \Omega_{12}$, т.е. при частоте свободных колебаний в АЧХ для ω_2 наблюдается разрыв, что свидетельствует о незатухающих колебаниях или о *резонансе*. Кроме того, при $\Omega = \Omega_{12}$ фаза меняется на 180° в сторону запаздывания или на 90° в сторону опережения управляющего воздействия.

Незатухающие колебания явно прослеживаются и из решения характеристического уравнения

$$p \cdot (p^2 + \Omega_{12}^2) = 0, \quad (16.7)$$

мнимые корни которого ($p_1 = 0$; $p_{2,3} = \pm j\Omega_{12}$), согласно формуле Эйлера [6], дают колебательный процесс.

В более общем случае можно сказать, что при переходе от N-массовой упругой системы к (N-1)-массовой выявляется только N-2 частот Ω_i , на которой возможно проявление механического резонанса. Однако, если при этом значения Ω_i оказываются достаточно близкими к парциальным частотам исходной системы, то можно полагать, что полученная модель правильно отражает главные особенности механической части электропривода.

Угловая частота вращения ω_1 , по сути, является скоростью электродвигателя. Подробно вывод передаточной функции по этой координате для управляющего воздействия приведен в [3]. В результате имеем зависимость

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\frac{J_2}{C_{12}} p^2 + 1}{J_{\Sigma} p \cdot \left(\frac{J_1 \cdot J_2}{C_{12} \cdot J_{\Sigma}} p^2 + 1 \right)}. \quad (16.8)$$

Решение характеристического уравнения дает те же корни, что и для $W_{\omega_2}(p)$.

Для удобства анализа, в дополнение к Ω_{12} , введем следующие *обобщенные параметры* двухмассовой МЧ ЭП.

- Коэффициент соотношения масс γ :

$$\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = J_2/J_1. \quad (16.9)$$

- Резонансная частота второй массы при жесткой заделке первой ($J_1 \rightarrow \infty$):

$$\Omega_{02} = \sqrt{C_{12}/J_2} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}. \quad (16.10)$$

С учетом этих обозначений $W_{\omega_1}(p)$ можно представить в виде:

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \cdot \frac{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1}{\frac{1}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1}. \quad (16.11)$$

Асимптотические логарифмические АЧХ (ЛАЧХ) могут быть построены непосредственно по полученным передаточным функциям системы. В частности, в соответствии с (16.11) система может быть представлена последовательным соединением интегрирующего звена, форсирующего звена второго порядка с частотой сопряжения $\Omega = \Omega_{12}/\sqrt{\gamma}$ и идеального колебательного звена с резонансной частотой Ω_{12} . При $\Omega = \Omega_{12}/\sqrt{\gamma}$ имеет место нуль передаточной функции, и ЛАЧХ при этом терпит разрыв, стремясь к $-\infty$. При $\Omega = \Omega_{12}$ имеет место полюс передаточной функции, и амплитуды стремятся к $+\infty$, образуя второй разрыв. Низкочастотная асимптота определяется интегрирующим звеном с коэффициентом, обратно пропорциональным J_{Σ} и соответственно имеет наклон -20 дБ/дек. Высо-

кочастотная асимптота ($\Omega \gg \Omega_{12}$) соответствует также интегрирующему звену, но при коэффициенте в γ раз большем, чем в области низких частот. В низкочастотной области сдвиг между колебаниями определяется интегрирующим звеном и составляет -90° . При $\Omega = \Omega_{12}/\sqrt{\gamma}$ скачком меняет знак числитель (16.11), что соответствует уменьшению фазового сдвига на 180° . Затем на частоте Ω_{12} аналогично изменяется знак знаменателя, и фазовый сдвиг вновь принимает значение -90° в соответствии с высокочастотной асимптотой ЛАЧХ. В низкочастотной области ЛАЧХ L_{ω_2} и L_{ω_1} совпадают. Соответствующая всем изложенным положениям ЛАЧХ объекта при выходной переменной ω_1 представлена на рис. 16.1-а.

Отметим, что при анализе механической и электрической частей системы электропривода рассматриваются их передаточные функции, в которых выходная и входная переменные чаще всего имеют *различные единицы измерения*. В этих случаях $W(j\Omega)$ представляет собой не *комплексный коэффициент усиления*, а *комплексный коэффициент передачи*, имеющий определенную единицу измерения. В частности, для $W_{\omega_1}(p)$ и $W_{\omega_2}(p)$ единица измерения $1/(Н \cdot м \cdot с)$, такую же размерность имеют амплитудные характеристики. При необходимости все дифференциальные уравнения и передаточные функции системы могут быть представлены в *относительных* единицах (смотри лекцию 5).

Проанализируем основные свойства механической части, воспользовавшись ее структурой, представленной на [рис. 15.4](#), и частотными характеристиками, изображенными на рис. 16.1. При этом обратим внимание на различия во влиянии упругости на движение первой и второй масс. Движение первой массы при небольших частотах колебаний управляющего воздействия M в соответствии с (16.11) и рис. 16.1-а определяется суммарным моментом инерции электропривода J_Σ , причем механическая часть ведет себя как интегрирующее звено. В част-

ности, при $M = \text{const}$ скорость ω_1 изменяется по линейному закону, на который накладываются колебания, обусловленные упругой связью. Иными словами, интегрирующее звено в структуре характеризует условия движения механической части в среднем.

При приближении частоты колебаний момента к резонансной Ω_{12} амплитуды колебаний скорости ω_1 возрастают и при Ω_{12} стремятся к бесконечности. Однако проявление резонанса существенно зависит от параметров механической части в связи с наличием в числителе передаточной функции $W_{\omega_1}(p)$ форсирующего звена второго порядка. Можно выявить условия, при выполнении которых влияние упругости на движение первой массы будет незначительным.

Во-первых, из (16.11) непосредственно следует, что если механизм обладает небольшой инерцией ($J_2 \ll J_1$, $\gamma \rightarrow 1$), то движение первой массы близко к движению, определяемому интегрирующим звеном $1/J_\Sigma \cdot p$. Во-вторых, из рис. 16.1 видно, что при $\Omega_{12} \rightarrow \infty$ в области малых и средних частот движение первой массы определяется тем же интегрирующим звеном. Отсюда вытекает важный практический вывод. Если при синтезе электропривода используются обратные связи только по переменным двигателя, то при $J_2 \ll J_1$ или $\Omega_{12} \gg \Omega_c$ где Ω_c – частота среза желаемой ЛАЧХ разомкнутого контура регулирования, МЧ ЭП можно представить жестким механическим звеном, не учитывая влияния упругостей.

В соответствии с (16.3) и рис. 16.1-б колебательность второй массы выше, чем первой. В низкочастотной области асимптоты ЛАЧХ L_{ω_1} и L_{ω_2} совпадают, так как в среднем движение второй массы также определяется интегрирующим звеном $1/J_\Sigma \cdot p$. Однако при $\Omega > \Omega_{12}$ наклон высокочастотной асимптоты L_{ω_2} составляет -60 дБ/дек, и нет факторов, которые ослабляли бы развитие резонансных колебаний при любых γ .

Следовательно, во всех случаях, когда важно получить требуемое качество движения второй массы, а также при регулировании ее координат, пренебрегать влиянием упругости механических связей без необходимой проверки нельзя. Достаточным условием для неучета упругости является только большая частота резонанса Ω_{12} , существенно выходящая за пределы полосы пропускания частот электропривода.

Другими словами, пренебрежение влиянием упругости или использование для проектирования электропривода одно-массовой модели механической части оправдано только при таком сочетании параметров, когда $J_2 \ll J_1$ или $\Omega_{12} \rightarrow \infty$.

Решение системы (16.1) позволяет определить характер движения во времени первой и второй массы и момента упругой деформации:

$$\omega_1(t) = \varepsilon_{cp} \cdot t + \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t), \quad (16.12)$$

$$\omega_2(t) = \varepsilon_{cp} \cdot t - \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t), \quad (16.13)$$

$$M_{12}(t) = M_c + \varepsilon_{cp} \cdot J_2 \cdot (1 - \cos(\Omega_{12} \cdot t)), \quad (16.14)$$

где $\varepsilon_{cp} = (M - M_c) / J_{\Sigma}$ – среднее ускорение, c^{-2} .

Отметим, что момент сопротивления M_c иногда разделяют на M_{c1} и M_{c2} – соответственно, моменты сопротивления, приложенные к первой и второй массам.

$$M_{c1} = M_{c2} \cdot (1 - \eta), \quad (16.15)$$

где η – КПД механической передачи.

При проектировании электроприводов значение ε_{cp} должно быть меньше допустимого по условиям технологического процесса углового ускорения $\varepsilon_{доп}$. Если рабочий орган реализует линейное движение, тогда существует величина ли-

нейного допустимого ускорения $a_{\text{доп}}$. В этом случае, соответственно, должно выполняться условие

$$\varepsilon_{\text{доп}} \leq a_{\text{доп}} / \rho_{1j}, \quad (16.16)$$

где ρ_{1j} – радиус приведения.

Из уравнений (16.12) – (16.14) следует, что угловые скорости первой и второй масс изменяются по периодическому закону около среднего значения скорости $\omega_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{ср}} \cdot t$ и находятся в противофазе. Амплитуда колебаний скорости первой массы еще зависит от соотношения масс.

Момент упругой деформации также изменяется по периодическому закону. Максимальное значение

$$M_{12_{\text{max}}} = M_c + 2 \cdot J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}.$$

Отклонение амплитуды от среднего значения

$$M_{12_{\text{ср}}} = M_c + J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}$$

характеризуется *динамическим коэффициентом* k_d

$$k_d = \frac{M_c + 2 \cdot J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}}{M_c + J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}}. \quad (16.17)$$

Динамический коэффициент является важной характеристикой условий работы механического оборудования и одним из основных показателей динамических качеств ЭП.

В реальных системах присутствуют *диссипативные силы*, которые оказывают на систему демпфирующее воздействие и учет влияния которых в некоторых случаях бывает необходим, например, для механизмов, в рабочей циклограмме которых преобладают переходные режимы работы.

Для двухмассовой модели моменты от сил внешнего вязкого трения на первой (M_{f_1}) и второй (M_{f_2}) массах в первом приближении могут быть приняты пропорционально скоростям соответствующих масс:

$$M_{f_1} = a_1 \cdot \omega_1; \quad M_{f_2} = a_2 \cdot \omega_2, \quad (16.18)$$

где a_1, a_2 – коэффициенты внешнего вязкого трения.

Таким образом, увеличивается количество обобщенных сил Q_i , и изменятся правые части первых двух уравнений системы (16.1):

$$Q_1 = M - M_{f_1} - M_{12} ;$$

$$Q_2 = M_{12} - M_{f_2} - M_c .$$

Изменения в структурной схеме выражаются в том, что интегрирующие звенья обеих масс охватываются жесткой обратной связью (рис. 16.2), что приводит к потере двухмассовой модели МЧ ЭП интегрирующих свойств и появлению статической ошибки в выходных координатах.

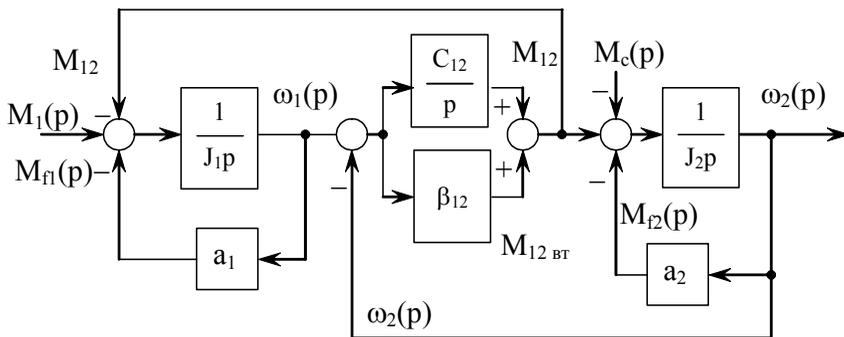


Рис. 16.2. Структурная схема уточненной двухмассовой модели МЧ ЭП с упругим звеном первого рода

Влияние внешних диссипативных сил на динамику электропривода достаточно мало. Более существенное влияние на динамические процессы в механической системе оказывают силы *внутреннего вязкого трения*, пропорциональные скорости деформации валов, канатов, муфт и других элементов.

Демпфирование колебаний осуществляется в материале упругой связи за счет сил внутреннего трения, пропорцио-

нальных разности скоростей первой и второй масс ω_1 и ω_2 [3]. Момент внутреннего вязкого трения можно записать в виде

$$M_{\text{вТ}} = \beta_{\text{вТ}} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \quad (16.19)$$

где $\beta_{\text{вТ}}$ – коэффициент пропорциональности.

Для двухмассовой модели получаем уравнение

$$M_{12_{\text{вТ}}} = \beta_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) = \beta_{\text{вТ}} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \quad (16.20)$$

модифицирующее третье уравнение системы (16.1):

$$M_{12} = \left(\frac{C_{12}}{p} + \beta_{12} \right) \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (16.21)$$

Демпфирование от сил внутреннего вязкого трения в большинстве случаев невелико. По данным технической литературы [2, 3] естественное затухание колебаний под их действием можно охарактеризовать значениями логарифмического декремента $\lambda_{\text{вТ}}$

$$\lambda_{\text{вТ}} = \frac{2\pi \cdot \alpha_{\text{вТ}}}{\Omega_{12}}, \quad (16.22)$$

где $\alpha_{\text{вТ}}$ – коэффициент затухания, который связан с $\beta_{\text{вТ}}$ следующей зависимостью [3]:

$$\beta_{\text{вТ}} = \frac{2 \cdot \alpha_{\text{вТ}} \cdot C_{12}}{\Omega_{12}^2} = \frac{\lambda_{\text{вТ}} \cdot C_{12}}{\pi \cdot \Omega_{12}}. \quad (16.23)$$

Учет естественного демпфирования существенно не сказывается на форме частотных характеристик системы, однако, ограничивает резонансный пик конечными значениями и несколько сглаживает фазочастотную характеристику (показано тонкими линиями на рис. 16.1). Для динамики механической части это означает *затухающий* колебательный процесс с коэффициентом затухания $\alpha_{\text{вТ}}$. Таким образом, временные зависимости (16.12) – (16.14) изменятся следующим образом.

$$\omega_1(t) = \varepsilon_{\text{ср}} \cdot t + \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t) \cdot e^{-\alpha_{\text{вТ}} \cdot t}, \quad (16.24)$$

$$\omega_2(t) = \varepsilon_{cp} \cdot t - \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t) \cdot e^{-\alpha_{BT} \cdot t}, \quad (16.25)$$

$$M_{12}(t) = M_c + \varepsilon_{cp} \cdot J_2 \cdot (1 - \cos(\Omega_{12} \cdot t)) \cdot e^{-\alpha_{BT} \cdot t}. \quad (16.26)$$

ЛЕКЦИЯ 17

МЕТОДИКА ВЫБОРА ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Вопросы, рассматриваемые в лекции.

1. Нагрузочная диаграмма и тахограмма. Классификация режимов работы электроприводов.
2. Перегрузочная способность двигателя.
3. Тепловая модель двигателя. Стандартные режимы работы.
4. Методы эквивалентирования по нагреву произвольного и номинального режимов работы.

В соответствии с основным уравнением движения электропривода (формула 4.9) для случая абсолютно жесткой механической связи в системе можно принять, что момент двигателя на различных этапах работы определяется текущими значениями статической и динамической нагрузки ЭП:

$$M(t) = M_c(t) + J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} . \quad (17.1)$$

Зависимость момента двигателя от времени называется *нагрузочной диаграммой* двигателя и является главной характеристикой, используемой при расчетах, связанных с выбором мощности электродвигателя. Основой для расчета нагрузочной диаграммы являются информация о статическом моменте на каждом этапе работы $M_c(t)$, которую обычно называют *нагрузочной диаграммой механизма*, и сведения о характере движения электропривода в рабочем процессе, определяемые технологией и задаваемые, например, в виде зависимости скорости ЭП от времени $\omega(t)$, обычно называемой *тахограммой* электропривода. При проектировании привода зависимости $M_c(t)$ и $\omega(t)$ являются либо заданными, либо в техническом задании на проектирование содержатся данные, достаточные для их расчета и построения.

Все многообразие производственных механизмов с точки зрения *режимов работы электропривода* можно разделить на две большие группы: механизмы *непрерывного* и механизмы *циклического действия*. Для них характерны вполне определенные зависимости $M_c(t)$ и $\omega(t)$, которые в конечном итоге сводятся к *типовым нагрузочным диаграммам* двигателей.

Отметим, что особенностью тахограммы ЭД может быть наличие *реверса*, т.е. требование изменения направления вращения двигателя, в соответствии с которым механизмы и соответственно их электроприводы делятся на *нереверсивные* и *реверсивные*. При выборе двигателей по нагреву данная классификация принципиального значения не имеет, однако оказывает решающее влияние на проектирование системы управления электроприводом и поэтому ее следует иметь в виду.

Особенностью механизмов *непрерывного действия* является продолжительный режим работы ЭД при неизменной заданной средней скорости $\omega_{cp} = \text{const}$. При этом время пуска и торможения ЭП настолько мало по сравнению с общим временем работы при каждом включении, что на нагрев двигателя влияния не оказывает и при построении нагрузочных диаграмм может не учитываться. Поэтому тахограмма заданной скорости в подобных случаях имеет вид прямой и является характерным признаком рассматриваемой группы электроприводов.

Зависимости $M_c(t)$ также имеют значительное многообразие, которое в свою очередь может быть подразделено на следующие типовые группы:

- 1) механизмы с постоянной нагрузкой $M_c = \text{const}$;
- 2) механизмы с переменной циклической нагрузкой, регулярно повторяющейся в течение длительного времени;
- 3) механизмы с переменной циклической нагрузкой, зависящей от пути $M_c(\varphi)$;
- 4) механизмы со случайной нагрузкой $M_c(t)$.

В большинстве случаев в случайной нагрузке рассматриваемых механизмов удастся выделить регулярную цикличе-

скую составляющую. Для удобства расчетов реальную зависимость $M_c(t)$ обычно с требуемой точностью заменяют ступенчатой зависимостью.

При работе с переменной нагрузкой $M_c(t)$ мгновенные значения скорости электропривода со в той или иной степени отличаются от заданного среднего значения ω_{cp} в связи с ограниченной жесткостью механической характеристики. Электропривод на изменения нагрузки реагирует изменениями скорости двигателя, которые в соответствии с (17.1) определяют значение динамического момента $J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt}$ и, как следствие, нагрузочная диаграмма электродвигателя $M(t)$ всегда в той или иной степени отличается от нагрузочной диаграммы рабочей машины $M_c(t)$. Типичный внешний вид нагрузочных диаграмм двигателя $M(t)$ и механизма $M_c(t)$, а также тахограмма скорости $\omega(t)$ показаны на рис. 17.1.

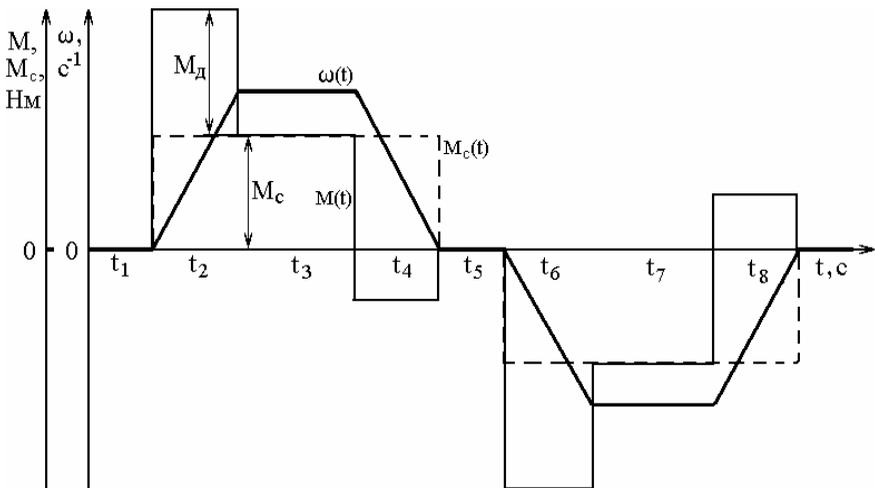


Рис. 17.1. Нагрузочные диаграммы двигателя $M(t)$, механизма $M_c(t)$, тахограмма скорости $\omega(t)$

По нагрузочной диаграмме и тахограмме электродвигателя можно определить мощность на каждом участке и, опре-

делив эквивалентную мощность за цикл, получить с учетом коэффициента запаса требуемую мощность ЭД.

Нагрузочная диаграмма ЭД также служит основой для проверки предварительно выбранного двигателя *по перегрузочной способности и по нагреву*.

Проверка по перегрузочной способности сводится к проверке выполнения условия

$$M_{\text{макс}} \leq M_{\text{доп}}, \quad (17.2)$$

где $M_{\text{макс}}$ – максимальный момент из нагрузочной диаграммы двигателя;

$M_{\text{доп}}$ – допустимый по перегрузке момент электродвигателя, определяемый по паспортным данным ЭД.

При отсутствии паспортных данных двигателя можно воспользоваться нижеприведенными соотношениями.

Для двигателя постоянного тока нормального исполнения или синхронного двигателя нормального исполнения

$$M_{\text{доп}} = (2 - 2,5) \cdot M_{\text{н}};$$

для асинхронного двигателя с учетом возможного снижения напряжения питания на 10%

$$M_{\text{доп}} = 0,81 \cdot M_{\text{к}}.$$

Асинхронные короткозамкнутые двигатели дополнительно проверяются по пусковому моменту. Для нормального пуска должно выполняться условие:

$$M_{\text{с макс}} < M_{\text{п}},$$

где $M_{\text{с макс}}$ – максимальный момент статической нагрузки, при котором должен выполняться пуск привода;

$M_{\text{п}}$ – пусковой момент двигателя.

Проверка по нагреву, сводящаяся к оценке фактической температуры изоляции обмоток двигателя и сравнению ее с допустимой, также выполняется с использованием нагрузоч-

ных диаграмм двигателя. Эта операция выполняется с использованием тепловой модели двигателя.

В тепловом отношении электрическая машина – сложный объект: она неоднородна по материалу, имеет рассредоточенные внутренние источники тепла, интенсивность которых зависит от режима, теплоотдача зависит от скорости и т.п. Именно эта сложность побуждает пользоваться на практике для относительно грубых оценок предельно простой моделью, построенной в предположении, что машина – однородное тело с постоянной теплоемкостью C , Дж/°С, с одинаковой температурой во всех точках ϑ , с теплоотдачей во внешнюю среду $A \cdot \tau$, пропорциональной коэффициенту теплоотдачи A , Дж/с·°С, и разности τ температуры машины ϑ и окружающей среды ϑ_{oc} , т.е. $\tau = \vartheta - \vartheta_{oc}$, °С. Тогда уравнение теплового баланса для некоторого интервала времени dt будет

$$\Delta P \cdot dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau. \quad (17.3)$$

Разделив обе части на $A dt$, получим:

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} \quad \text{или} \quad \tau + T_T \frac{d\tau}{dt} = \tau_{кон}, \quad (17.4)$$

где $T_T = C/A$ – тепловая постоянная времени;

$\tau_{кон} = \Delta P/A$ – конечное (установившееся) значение превышения температуры.

Очевидно, что переменная, характеризующая запас тепловой энергии, изменяется по экспоненте (рис. 17.2), являющейся решением уравнения (17.4):

$$\tau = (\tau_{нач} - \tau_{кон}) e^{-t/T_T} + \tau_{кон}. \quad (17.5)$$

Отметим, что постоянная времени T_T , вообще говоря, не постоянная величина. В начальной части нагрева, когда греются лишь активные части, главным образом медь обмоток, и тепло не успевает распространиться по всему телу машины, процесс идет быстрее, чем по уравнению (17.5), т.е. $T_T' < T_T$ – пунктир на рис. 17.2. Для самовентилируемых машин теплоот-

дача зависит от скорости, уменьшаясь с ее уменьшением, причем разница может быть существенной – в 2 и более раза.

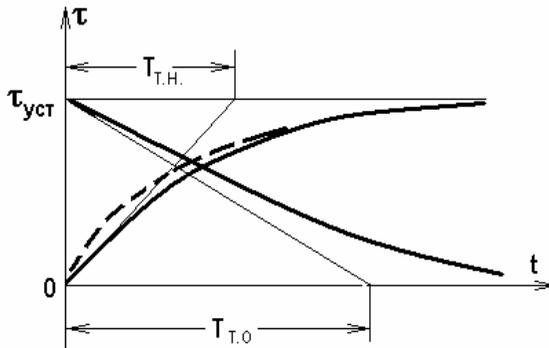


Рис. 17.2. Характеристики нагрева – охлаждения ЭД

Найденные закономерности нагрева и охлаждения двигателей позволяют выделить характерные стандартные режимы работы электроприводов [2].

Продолжительный режим S1 характеризуется условием

$$t_p > 3 \cdot T_{Т.н.}, \quad (17.6)$$

т.е. за время работы t_p температура перегрева достигает установившегося значения, продолжительность паузы роли не играет (рис. 17.3-а).

Кратковременный режим S2, при котором

$$t_p \ll 3 \cdot T_{Т.н.}, \quad t_o > 3 \cdot T_{Т.о.}, \quad (17.7)$$

т.е. за время работы перегрев не успевает достичь установившейся величины, а за время паузы t_o двигатель охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 17.3-б).

Повторно-кратковременный режим S3 соответствует условиям

$$t_p \ll 3 \cdot T_{Т.н.}, \quad t_o \ll 3 \cdot T_{Т.о.}, \quad (17.8)$$

т.е. за время работы перегрев не достигает $\tau_{уст}$, а за время паузы не становится равным нулю. При достаточно долгом повто-

рении циклов процесс устанавливается, т.е. температура пере-

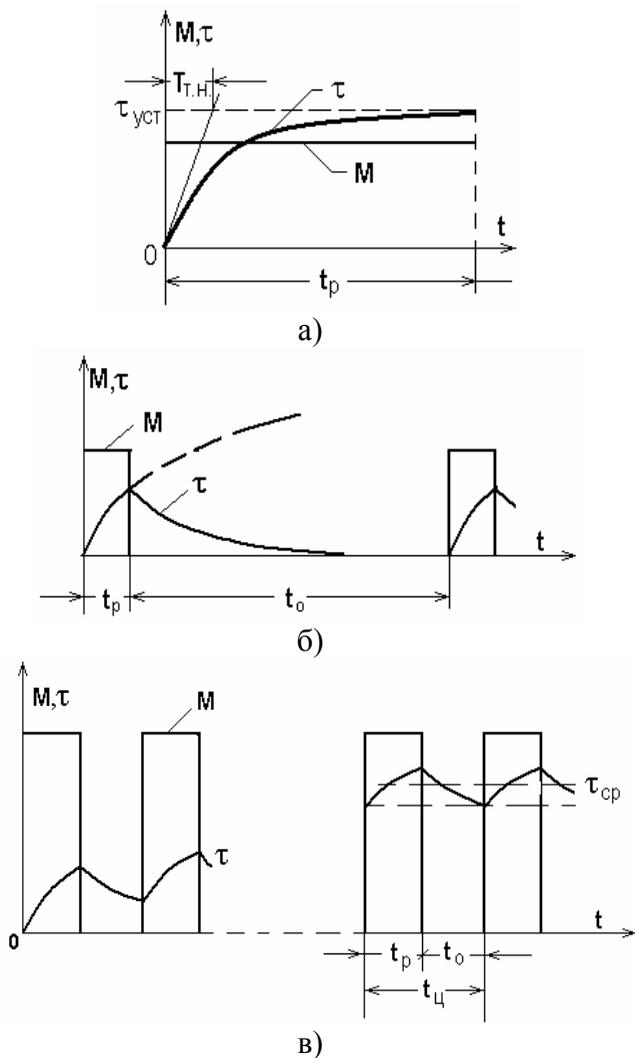


Рис. 17.3. Диаграммы продолжительного S1 (а), кратковременного S2 (б) и повторно-кратковременного S3 (в) режимов

ва в начале и конце цикла одинакова и ее колебания происходят около среднего уровня τ_{cp} (рис. 17.3-в). Повторно-кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения ε или *ПВ*

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_o}, \text{ ПВ} = \varepsilon \cdot 100\%. \quad (17.9)$$

При повторно-кратковременном режиме ограничивается как ε ($\varepsilon \leq 0,6$), так и время цикла ($t_{\text{ц}} \leq 10$ мин).

Существуют еще четыре стандартных режима, которые базируются на перечисленных выше основных: S4 и S5 отличаются от S3 учетом динамических моментов при пуске и торможении, S6 и S7 соответствуют S1, но при переменной нагрузке (S6) и с учетом пуска и торможения (S7). Стандартный режим S8 отражает самый общий случай периодического изменения M и ω .

На основании изложенного можно заключить, что наличие ограниченного числа номинальных режимов, на которые рассчитаны двигатели, и исключительное многообразие реальных нагрузочных диаграмм электропривода требует разработки инженерных методов оценки допустимости по нагреву нагрузок двигателей в режимах, отличных от номинального. Наиболее общим случаем является работа электропривода в циклическом режиме с переменной в пределах каждого цикла нагрузкой. (Режимы с постоянной нагрузкой можно рассматривать как частный случай циклических режимов, не имеющих переменной составляющей.) При этом потери в двигателе также являются переменными в течение цикла работы, и изменения превышения температуры двигателя определяются, при прочих равных условиях, зависимостью $\Delta P_r(t)$. Общий анализ оценки температурного режима, не связанного с конкретным видом $\Delta P_r(t)$, приведен в соответствующей научно-технической литературе [2]. Этот анализ дает подход к эквивалентированию режимов двигателя в тепловом отношении.

Для большинства режимов электроприводов механизмов надежно выполняется неравенство $T_{ц}/T_{н} \ll 1$ и лежит в пределах $0,2 \dots 0,01$. $T_{ц}$ – время цикла, с; $T_{н}$ – постоянная времени нагрева, с. В этих условиях выполняется неравенство $\Delta P_{Т,ср} \leq \Delta P_{Т,н}$ или

$$\Delta P_{Т,ср} = \frac{\sum_i \Delta P_{Т_i} \cdot t_i}{T_{ц}} \leq \Delta P_{Т,н}. \quad (17.10)$$

Это соотношение является основой для *метода средних потерь*. Из приведенной формулы вытекает следующий порядок проверки эквивалентности в тепловом отношении режима, в котором предполагается работа того или иного двигателя и номинального режима этого двигателя.

Например, по нагрузочной диаграмме механизма определяем среднюю мощность

$$P_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \cdot t_i}{T_{ц}} \quad (17.11)$$

где P_i – мощность на валу двигателя на i -м интервале.

Затем $P_{ср}$ умножаем на коэффициент запаса $k = 1,1 - 1,3$ и получаем расчетную мощность $P_{расч}$. На основании $P_{расч}$ по каталогу предварительно выбираем соответствующий ЭД. По кривой КПД двигателя в функции нагрузки находим потери мощности для каждого интервала нагрузочной диаграммы и строим зависимость $\Delta P_{Т} = f(t)$. Затем находим средние потери за цикл, которые и сопоставляем с номинальными по формуле

$$\Delta P_{Т,ср} \leq \Delta P_{Т,н} = \frac{P_{н} \cdot (1 - \eta_{н})}{\eta_{н}}, \quad (17.12)$$

где $P_{н}$, $\eta_{н}$ – соответственно номинальная мощность и КПД двигателя.

Если это неравенство выполняется с большим запасом, то это означает, что выбранный двигатель будет недоиспользован по нагреву и, следовательно, по мощности.

Если возникают затруднения с определением КПД двигателя в зависимости от нагрузки, то можно воспользоваться для проверки выбранного двигателя *методом эквивалентного тока*, основанным на замене действительного тока эквивалентным постоянным током, который вызывает в двигателе те же потери, что и фактически протекающий ток.

Если используется двигатель постоянного тока, то выделяющаяся в нем средняя мощность потерь равна:

$$\Delta P_{T,cp} = \Delta P_{Tc} + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{я}}, \quad (17.13)$$

где ΔP_{Tc} – мощность постоянных потерь нагрузки;

$I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{я}}$ – переменные потери мощности, зависящие от нагрузки.

Так как средняя мощность потерь за цикл может быть рассчитана по формуле (17.10) то, заменяя потери мощности на каждом участке через соответствующие постоянную и переменную составляющие, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta P_{T,cp} &= \frac{\Delta P_{T1} \cdot t_1 + \Delta P_{T2} \cdot t_2 + \dots + \Delta P_{Tn} \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}, \\ &= \frac{k + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{я}}}{k + I_1^2 \cdot R_{\text{я}}} \cdot t_1 + \frac{k + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{я}}}{k + I_2^2 \cdot R_{\text{я}}} \cdot t_2 + \dots + \frac{k + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{я}}}{k + I_n^2 \cdot R_{\text{я}}} \cdot t_n \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} &k \pm I_{\text{ЭКВ}}^2 R_{\text{я}} = \\ &= \frac{k \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} + \frac{R_{\text{я}} \cdot (I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n)}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}. \end{aligned}$$

Отсюда эквивалентный ток

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \quad (17.14)$$

или в общем случае

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \cdot \int_0^{T_{\text{ц}}} i^2(t) dt}. \quad (17.15)$$

Найденный эквивалентный ток сопоставляем с номинальным током двигателя. Если $I_{\text{ЭКВ}} = I_n$ то двигатель отвечает условиям полного использования его по нагреву.

Следует отметить, что метод эквивалентного тока предполагает независимость потерь в стали и механических потерь от нагрузки и постоянство сопротивления главной цепи двигателя на всех участках графика нагрузки, поэтому при несоблюдении этих условий применять его нельзя.

Часто для проверки двигателя по нагреву приходится пользоваться графиками момента или мощности, развиваемой двигателем. При неизменном магнитном потоке, когда момент двигателя пропорционален току для выбора двигателя можно воспользоваться *методом эквивалентного момента*, который для ступенчатого графика определяется по формуле

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}. \quad (17.16)$$

Эквивалентный момент сопоставляем с номинальным моментом двигателя. Если $M_{\text{ЭКВ}} = M_n$, двигатель оказывается полностью использованным по нагреву.

Проверка по нагреву методом эквивалентного момента приемлема для двигателей постоянного тока независимого возбуждения, а также асинхронных и синхронных двигателей, работающих с номинальным магнитным потоком.

Если нагрузочная диаграмма электропривода задана графиком мощности, развиваемой двигателем, то проверка его по

нагреву может быть произведена в том случае, когда между мощностью и током существует прямая пропорциональность. Эквивалентную мощность для ступенчатого графика определяем по формуле

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (17.17)$$

и сравниваем с номинальной мощностью двигателя; при этом при $P_{\text{экв}} = P_n$ двигатель полностью использован по нагреву.

Метод эквивалентной мощности может быть использован для проверки по нагреву асинхронных и синхронных двигателей, а также двигателей постоянного тока независимого возбуждения, работающих с номинальным потоком и постоянной или мало меняющейся скоростью.

Основное соотношение метода средних потерь (17.10) было получено для случая постоянной и равной номинальной теплоотдаче $A = \text{const}$, поэтому в таком виде не может быть применено с целью эквивалентирования режимов для двигателей с самовентиляцией в условиях снижения их скорости в течение цикла.

Пусть теплоотдача на участках цикла t_i равна $A_i = \beta_{A_i} \cdot A$. Тогда, пренебрегая колебаниями температуры, уравнение баланса тепловой энергии за цикл можно записать в виде

$$\sum_i A_i \cdot \tau'_{\text{ср}} \cdot t_i = \sum_i \Delta P_{T_i} \cdot t_i, \quad (17.18)$$

где левая часть – это количество теплоты, отданной внешней среде за цикл, а правая – количество теплоты, выделившейся в машине за это же время.

После преобразований получаем основное соотношение метода средних потерь для режимов с переменной теплоотдачей в виде

$$\frac{\sum \Delta P_{T_i} \cdot t_i}{\sum \beta_{A_i} \cdot t_i} \leq \Delta P_H, \text{ или в такой записи } \frac{\Delta P_{T, \text{cp}}}{\beta_{A_{\text{cp}}}} \leq \Delta P_H. \quad (17.19)$$

При $\beta_{A_i} = \text{const} = 1$ (17.19) обращается в (17.10).

При применении методов эквивалентных величин в случаях, когда мощность постоянных потерь на всех участках цикла неизменна и выбирается двигатель номинального режима S1 выражения в знаменателях (14-53), (14-55) и (14-56) примут вид:

$$t_1 \cdot \beta_{A_1} + t_2 \cdot \beta_{A_2} + \dots + t_n \cdot \beta_{A_n} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \beta_{A_i}. \quad (17.20)$$

Примерные значения β_{A_i} для двигателей различного исполнения приведены в табл. 17.1.

Таблица 17.1

исполнение двигателя	β_A
закрытый с независимой вентиляцией	1
закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ... 0,98
закрытый самовентилируемый	0,45 ... 0,55
самовентилируемый защищенный	0,25 ... 0,35

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное назначение данного конспекта лекций – сформировать у студентов базовые знания по электроприводу для последующего углубленного изучения специальных дисциплин.

Предложенная методика изложения учебного материала по разделам учебного курса, дополненная практическими и лабораторными занятиями, а также вопросами для самоконтроля, дает студенту целостное представление о содержании и концепции изучаемого курса.

Помимо этого, студент имеет возможность самостоятельно освоить разделы учебной дисциплины. Изучая курс «Электрический привод» при таком комплексном подходе, студент, обучающийся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», впервые может осознанно определиться – насколько правильно была выбрана им специальность.

Имея на руках подобный материал по всем разделам учебной дисциплины, студент тщательнее готовится к практическим и лабораторным занятиям. Предварительно ознакомившись с теоретическим материалом по конспекту лекций, ему будет значительно лучше воспринимать содержание лекции, а также заранее подготовить вопросы по интересующим темам. Все это, в конечном счете, будет способствовать повышению качества обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 50369-92. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ. Термины и определения.
2. Ключев В.И. Теория электропривода : Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода : Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
4. Дмитриев О.А., Фролов Ю.М., Еремкин И.П., Романов А.В. Лабораторный практикум по электроприводу : Учебное пособие. Воронеж. Воронеж. гос. тех. ун-т., 2005. 105 с.
5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
6. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. / Н.А. Бабанов, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др. В 2 ч. Ч. I: Теория линейных систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. А.А. Воронова. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лекция 1. История развития электропривода как отрасли науки и техники	5
Лекция 2. Электрический привод – основной элемент систем комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в машинном производстве ..	14
..... Лекция 3. Механическая часть электропривода	20
Лекция 4. Электрические машины постоянного тока	26
Лекция 5. Механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения	33
Лекция 6. Регулирование скорости в двигателе постоянного тока	39
... Лекция 7. Энергетика работы двигателя постоянного тока, режимы торможения	45
..... Лекция 8. Механические и электромеханические характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	56
Лекция 9. Асинхронные электродвигатели переменного тока	65
Лекция 10. Механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя	73
Лекция 11. Регулирование скорости в асинхронных электродвигателях	79
Лекция 12. Характеристики асинхронных электродвигателей в тормозных режимах	87
..... Лекция 13. Синхронная машина переменного тока ..	91
Лекция 14. Приведение кинематической схемы электропривода к расчетной схеме	97
Лекция 15. Динамические свойства механической части электропривода	107

Лекция 16. Динамика двухмассовой упругой механической части электропривода	116
..... Лекция 17. Методика выбора двигателя при проек- тировании электроприводов	127
Заключение	140
Библиографический список	141

Учебное издание

Романов Андрей Владимирович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

В авторской редакции

Выпускающий редактор И.В. Медведева

Компьютерный набор А.В. Романова

Подписано в печать 01.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л 8,9. Уч.-изд. л. 6,7. Тираж 150 экз.

Зак. №

Воронежский государственный технический университет
394026 Воронеж, Московский просп., 14