

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Почему такое пристальное внимание уделяется асинхронному электроприводу, где в качестве электродвигательного устройства применяется асинхронный электродвигатель (АД), а более того АД с короткозамкнутым (КЗ) ротором, хотя исторически электропривод постоянного тока появился раньше? В блистательном ряду имен ученых, заложивших основы электромеханического преобразования электрической энергии, стоят: датчанин Х. Эрстед, показавший возможность взаимодействия магнитного поля и проводника с током в 1820 г. (получившего впоследствии названия закона электромагнитной индукции), француз А. Ампер, математически оформивший это взаимодействие (в 1820 г.), англичанин М. Фарадей, доказавший в 1821 году на экспериментальной установке возможность построения электродвигателя. Это отечественные ученые – академики Б.С. Якоби и Э.Х. Ленц, которым впервые удалось создать в 1834 году электродвигатель постоянного тока. В 1838 г. Б.С. Якоби разработал новый электродвигатель постоянного тока мощностью в 1 л.с, имеющий все элементы современной машины, который нашел практическое применение в приводе пассажирской лодки, перевозившей 12 пассажиров со скоростью до 5 км/ч против течения Невы. Уже на этой первой еще несовершенной модели электропривода обнаружились весьма значительные преимущества его по сравнению с господствовавшим в то время паровым приводом – это отсутствие парового котла, запасов топлива и воды.

Дальнейший импульс развитию электропривода дала замена неэкономичного источника электроэнергии – гальванической батареи итальянца А. Гальвани (1737-1798) на промышленный тип электрического генератора постоянного тока (ГПТ), разработанного в 1870 г. сотрудником французской фирмы «Альянс» З.Граммом, применившего принцип обратимости электрических машин, открытый академиком Э.Х. Ленцем ещё в 1833 году. Работа З. Грамма способствовала дальнейшему внедрению электропривода в различные отрасли

хозяйства. Вот некоторые примеры. Наш соотечественник электротехник В.Н. Чиколев (1845-1898 гг.) создает электропривод для дуговых ламп (1879 г.), швейной машины (1882 г.) и вентилятора (1886 г.), отмеченные золотыми медалями на Всероссийских выставках. Происходит внедрение электропривода постоянного тока в военно-морском флоте: подъемник боеприпасов на броненосце «Сисой великий» (1890-1894 гг.), первый рулевой электропривод на броненосце «12 Апостолов» (1892 г.). В 1895 году А.В. Шубин разработал систему «генератор-двигатель» для рулевого управления, установленный в дальнейшем на броненосцах «Князь Суворов», «Слава» и др. Французский военный инженер Марсель Депре в 1881 г. теоретически обосновал передачу электроэнергии на расстояние и в 1882 г. построил первую линию электропередачи (ЛЭП) длиной в 57 км и мощностью 3 кВт.

Проникает электропривод и в ткацкое производство на подмосковные текстильные фабрики Морозова, Липгардта, Прохоровскую мануфактуру. Отмечаются случаи использования электропривода в городском транспорте – трамвае в городах Киеве, Казани и Нижнем Новгороде (1892 г.) и несколько позже в Москве (1903 г.) и Петербурге (1907 г.).

Появившийся практический опыт требовал теоретического осмысления для последующего освещения путей развития электропривода. И здесь значительную роль сыграл научный труд нашего соотечественника Д.А. Лачинова (1842-1903 гг.), опубликованный в 1880 году в журнале «Электричество» под названием «Электромеханическая работа». 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 считается годом рождения науки об электроприводе.

Наряду с электроприводом постоянного тока пробивал себе дорогу в жизнь и электропривод переменного тока. Так, в 1841 году англичанин Ч. Уитсон построил однофазный син-

хронный электродвигатель, который, правда, не нашел практического применения из-за трудностей при пуске. В 1876 г. П.Н.Яблочков (1847-1894 гг.) разработал несколько конструкций синхронных генераторов для питания изобретенных им свечей, а также изобрел трансформатор. Следующим шагом на пути к электроприводу переменного тока явилось открытие в 1888 году итальянцем Г. Феррарисом и югославом Н. Теслой явления вращающегося магнитного поля, что положило начало конструированию многофазных электродвигателей. Г. Феррарисом и Н. Теслой были разработаны модели двухфазных двигателей. Однако двухфазный ток в Европе широкого распространения не получил в связи с разработкой более совершенной трехфазной системы русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским (1862-1919 гг.) в 1889 году. В этом же, 1889 году, 8 марта он запатентовал асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, а несколько позднее и с фазным ротором. Уже в 1891 г. на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне М.О. Доливо-Добровольский продемонстрировал асинхронные двигатели мощностью 0.1 кВт (вентилятор); 1.5 кВт (ГПТ); 75 кВт (насос). Для этого им были разработаны трехфазный генератор и трехфазный трансформатор, конструкция которого остается основной и в наше время. В результате этих 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 (порядка 75% от общей потребляемой энергии электроприводами). Первые в России трехфазные приводы переменного тока были установлены в 1893 г. в Шепетовке и на Коломенском заводе, где к 1895 году насчитывалось 209 электродвигателей общей мощностью 1507 кВт.

В настоящее время электропривод занял господствующее положение в народном хозяйстве и потребляет порядка 2/3 всей производимой электрической энергии в стране.

Так что же такое электропривод? Согласно ГОСТ Р 50369-92: «**Электрическим приводом** называется электромехани-

ческая система, предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин, целенаправленного управления этими процессами и состоящая из *передаточного, электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств*» (рис. В.1).

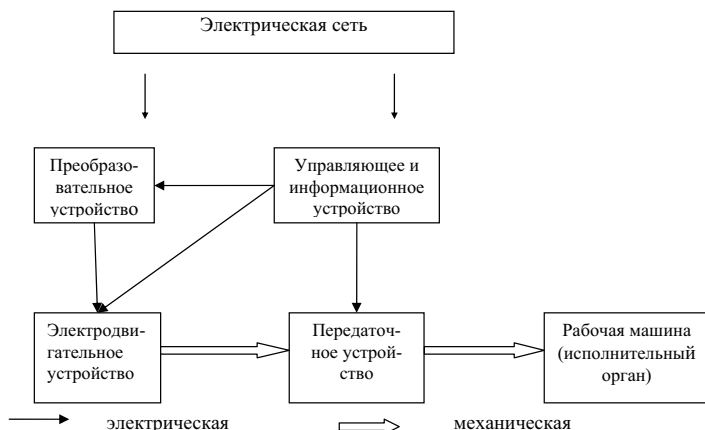


Рис. В.1. Состав устройств электрического привода

**Электродвигательное устройство** преобразует электрическую энергию в механическую, формируя совместно с передаточным устройством заданные формы движения рабочих органов. Электродвигатели отличаются по принципу действия, роду тока и исполнению.

Электрические машины условно делят:

а) по мощности;

1. Микромашины – до 0.6 кВт
2. Машины малой мощности – до 100 кВт
3. Машины средней мощности – до 1000 кВт
4. Машины большой мощности – свыше 1000 кВт

б) по скорости вращения;

1. Тихоходные – до 500 об/мин
2. Средней скорости – до 1500 об/мин

3. Быстроходные – до 3000 об/мин
4. Сверхбыстроходные – до 150000 об/мин
- в) по номинальному напряжению;
  1. Низковольтные двигатели – до 1000 В
  2. Высоковольтные двигатели – свыше 1000 В

**Преобразовательное устройство** служит для связи системы электропривода с источником электрической энергии, для преобразования одной формы электрической энергии в другую. Оно предназначается для управления потоком электрической энергии, поступающей из сети в целях регулирования режимов работы двигателя и механизма, и представляет собой энергетическую исполнительную часть системы управления электроприводом. В качестве преобразовательного устройства могут применяться полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный, преобразователи частоты и др.

Преобразовательные устройства различают по роду тока:

- постоянного тока;
- переменного тока.

По способу преобразования различают:

- электромеханическое преобразовательное устройство;
- статическое преобразовательное устройство.

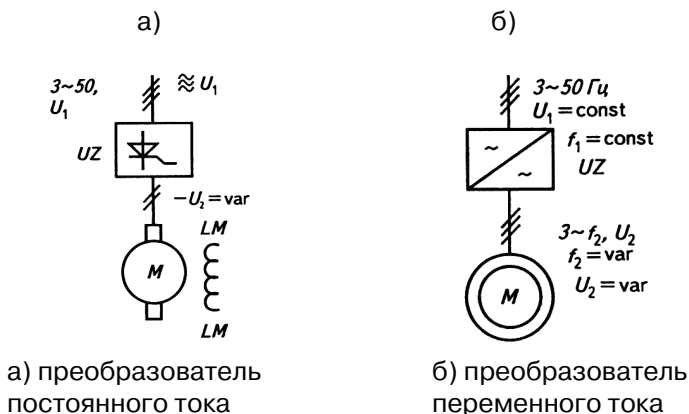


Рис. В.2. Примеры статических преобразовательных устройств

Рассмотрим некоторые примеры статических преобразовательных устройств постоянного и переменного тока (рис.В.2).

**Передаточное устройство** предназначено для преобразования форм движения и передачи механической энергии от двигательного устройства к рабочим органам. Оно содержит механические передачи (редукторы, клиноременные передачи) и соединительные муфты, необходимые для передачи вырабатываемой двигателем механической энергии исполнительному механизму.

**Управляющее и информационное устройства** предназначены для формирования заданных законов управления потоком энергии и движения рабочих органов машин. Эти устройства представляют собой информационную слаботочную часть системы управления, предназначенную для фиксации и обработки поступающей информации о задающих воздействиях и состоянии системы и выработки на её основе сигналов управления преобразовательным, электродвигательным и передачным устройствами.

**Управляющее устройство** (система управления) – это совокупность функционально связанных между собой электромагнитных, электромеханических, полупроводниковых элементов. Высокоточные электроприводы могут содержать в системе управления вычислительные машины.

**Информационное устройство** есть совокупность датчиков электрических и неэлектрических параметров электропривода.

Таким образом, электрический привод представляет собой единую электромеханическую систему, электрическая часть которой состоит из электродвигательного, преобразовательного, управляющего и информационного устройств, а механическая часть включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма.

Современный электропривод отличается большим диапазоном мощностей двигателей – от долей ватта до 50000 кВт в единице, диапазоном регулирования скоростей до 10000:1 и более, применением как тихоходных двигателей (сотни об/мин), так и сверхскоростных (до 200000 об/мин). Электро-

привод является основой автоматизации технологических объектов в промышленности, сельском хозяйстве, космосе и т.д.

Электрический привод является крупнейшим потребителем электрической энергии, необходимой для работы машин и механизмов во всех отраслях народного хозяйства. В связи с этим энергетические показатели как уникальных, так и массовых электроприводов малой и средней мощности имеют важнейшее народнохозяйственное значение в решении экономических проблем, вопросов рационального расходования электроэнергии.

Так, почему же электропривод переменного тока получил преимущество перед электроприводом постоянного тока? Ответ следует искать из сравнения данных по металлоемкости, трудозатратам, стоимости двигателей постоянно-го и переменного тока.

Приводы переменного тока имеют существенное преимущество по сравнению с приводами постоянного тока - отсутствие коллектора, меньший в 2-3 раза удельный расход электротехнической стали и стоимость электродвигателя.

По данным /2/ сбыт трёхфазных электродвигателей переменного тока в 1,85 раза опережает двигателей постоянного тока.

Не следует забывать, что на смену простого нерегулируемого электропривода (ЭП) по технико-экономическим соображениям приходит регулируемый ЭП, позволяющий обеспечить экономию электроэнергии, соблюдение технологического режима в строгом соответствии с изменяющейся производственной ситуацией. При этом, если в 1987 году доля мирового производства высокоточных электроприводов постоянного тока составляла 33% от общего числа регулируемых электроприводов, то по прогнозам дальнейшая доля мирового производства высокоточных электроприводов постоянного тока не превышает 5%. Иными словами, будущее применяемых регулируемых электроприводов определяется развитием электроприводов переменного тока и, в первую очередь, асинхронного электропривода, обусловленного превосходными эксплуатационными свойствами асинхронного двигателя.

Например, внедрение регулируемого асинхронного электропривода мощностью 11 кВт на станции подкачки /1/, предназначенной для подачи холодной питьевой воды в жилой район с населением 5026 человек, где в течение суток расход воды менялся почти в 6 раз, позволило обеспечить даже при резком изменении расхода поддержание заданного давления в гидросистеме путём регулирования угловой скорости электродвигателя насоса с помощью преобразователя частоты. При сравнении с нерегулируемым режимом насоса были получены следующие результаты:

- экономия электроэнергии 54% (за счет оптимизации расхода энергии);
- экономия холодной питьевой воды 34% (за счет отсутствия избыточного давления ночью).

Современный асинхронный электропривод не уступает по своим регулировочным возможностям электроприводу постоянного тока. Так, применяемый на практике метод векторного управления (ВУ) позволяет поддерживать частоту вращения с точностью 0.01% и электромагнитный момент с точностью 3...5%, при этом перегрузочная способность привода достигает 150...200%, а диапазон регулирования скорости в замкнутых системах векторного управления достигает 10000.

В предлагаемой работе ставилась, на первый взгляд, достаточно простая задача: изложить на понятном для студентов уровне основы теории и практики систем управления асинхронным электроприводом переменного тока, все настойчивее заменяющим электропривод постоянного тока.



# ГЛАВА 1. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ: КОНСТРУКЦИЯ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

## 1.1. Конструкция асинхронного двигателя

Из асинхронных электрических машин наибольшее распространение получили *асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором*, простые по конструкции и надежные в эксплуатации (рис. 1.1 а). Асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором состоит из трёх основных частей: неподвижного статора с трехфазной обмоткой, вращающегося ротора с короткозамкнутой обмоткой и станины, выполняющей только конструктивные функции (рис. 1.1 б)

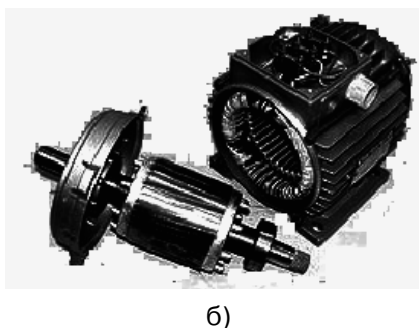
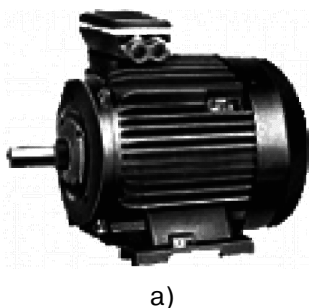


Рис. 1.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Активными элементами статора (рис.1.2), предназначенными для создания вращающегося магнитного поля, являются магнитопровод 1 и обмотка 2. Станина 3 фиксирует активные части в определенном положении и с помощью лап неподвижно закрепляется на фундаменте.

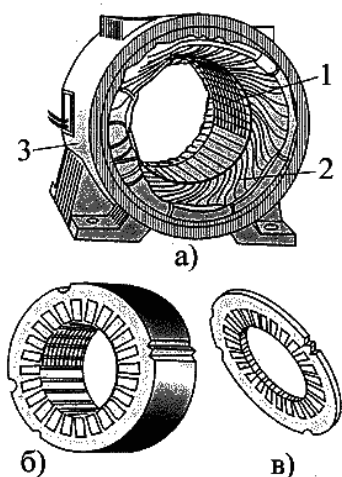


Рис.1.2. Элементы статора

Сердечник статора 1 (рис. 1.2 а) запрессовывают в литую станину 3 и укрепляют стопорными винтами.

Обмотка статора 2 выполнена в виде ряда катушек из проводников круглого или прямоугольного сечения. Проводники, находящиеся в пазах, соединяются, образуя ряд катушек, которые разбивают на одинаковые группы по числу фаз и располагают симметрично вдоль окружности статора. В каждой такой группе все катушки электрически соединяются, образуя одну фазу обмотки, т. е. отдельную электрическую цепь. При больших значениях фазного тока или при необходимости переключения отдельных катушек фазы могут иметь несколько параллельных ветвей. Простейшим элементом обмотки является виток, состоящий из двух проводников, размещенных в пазах, находящихся друг от друга на некотором расстоянии. Обычно витки, образованные проводниками, лежащими в одних и тех же пазах, объединяют в одну или две катушки. В соответствии с этим различают одно- и двухслойные обмотки. Наибольшее распространение получили двухслойные обмот-

Магнитопровод 1 выполняют из листов электротехнической стали (рис.1.2 б), изолированных один от другого изоляционной лаковой пленкой, окалиной и пр. В результате этого уменьшается вредное действие вихревых токов, возникающих в стали статора при вращении магнитного поля. Листы статора имеют паза открытой, полузакрытой или закрытой формы, в которых располагаются проводники соответствующих обмоток. В статоре чаще всего применяют полузакрытые паза прямоугольной или овальной формы (рис.1.2 в), в машинах большой мощности — открытые паза прямоугольной формы.

ки. Проводники обмотки статора укрепляют в пазах текстолитовыми клиньями, которые закладывают у головок зубцов. Стенки паза покрывают листовым изоляционным материалом (электрокартоном, лакотканью и пр.).

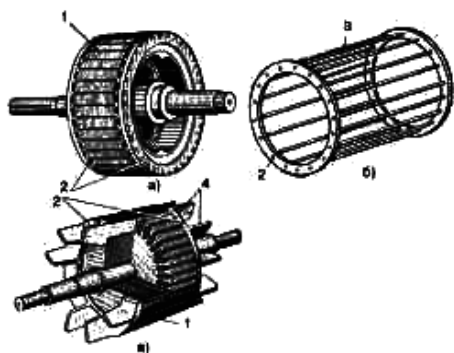


Рис. 1.3. Элементы короткозамкнутого ротора

Отдельные катушки обмотки статора могут соединяться «звездой» или «треугольником». Начала и концы обмоток каждой фазы выводят к шести зажимам двигателя.

**Ротор** (рис.1.3 а) подобно статору выполняют из листов электротехнической стали, изолированных один от другого изоляционной лаковой пленкой, окалиной для

уменьшения вредного действия вихревых токов, возникающих в стали ротора при вращении магнитного поля. Листы ротора имеют пазы открытой, полузакрытой или закрытой формы, в которых располагаются проводники обмоток. Обмотка ротора 3 выполнена в виде беличьей клетки (рис. 1.3 б). Она сделана из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами 2 (рис. 1.3 б). В двигателях мощностью до 100 кВт стержни беличьей клетки обычно получают путем заливки расплавленного алюминия в пазы сердечника ротора (рис.1.3 в). Вместе со стержнями беличьей клетки отливают и соединяющие их торцовые короткозамыкающие кольца. Для этой цели пригоден алюминий, так как он обладает малой плотностью, достаточно высокой электропроводностью и легко плавится.

Стержни этой обмотки вставляют в пазы ротора без какой-либо изоляции, так как напряжение в короткозамкнутой обмотке ротора равно нулю. Паза короткозамкнутого ротора обычно выполняют полузакрытыми, а в машинах малой мощности - закрытыми (паз имеет стальной ободок, отделяющий его от воздушного зазора). Такая форма паза позволяет хорошо укрепить

проводники обмотки ротора, хотя и несколько увеличивает ее индуктивное сопротивление. Обмотка ротора выполнена бесконтактной (она не соединена ни с какой внешней цепью), что определяет высокую надежность такого двигателя.

Сердечник ротора напрессовывают на вал ротора, который вращается в шариковых подшипниках, установленных в двух подшипниковых щитах.

**Воздушный зазор** между статором и ротором имеет минимальный размер, допускаемый с точки зрения точности сборки и механической жесткости конструкции. Такой зазор обеспечивает уменьшение магнитного сопротивления магнитной цепи машины, а следовательно, уменьшение намагничивающего тока для создания в двигателе магнитного потока. Снижение намагничивающего тока позволяет повысить коэффициент мощности двигателя.

Обычно двигатели имеют вентиляторы, насаженные на вал ротора. Они осуществляют принудительную вентиляцию нагретых частей машины (обмоток и стали статора и ротора), позволяя получить от двигателя большую мощность. В двигателях с короткозамкнутым ротором лопасти вентилятора часто отливают совместно с боковыми кольцами беличьей клетки (см. рис. 1.3 в).

**Конструкционная компоновка** асинхронной двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) представлена на рис. 1.4.

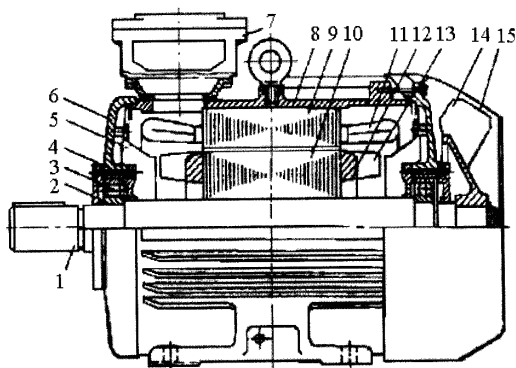


Рис. 1.4. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

На рис. 14 приведены следующие обозначения:

1 – вал; 2 – крышка подшипника наружная; 3 – подшипник; 4 – крышка подшипника внутренняя; 5 – щиток воздухонаправляющий; 6 – щит подшипниковый; 7 – вводное устройство; 8 – станина; 9 – сердечник статора; 10 – сердечник ротора; 11 – обмотка статора; 12 – обмотка ротора; 13 – вентиляционные лопадки ротора; 14 – вентилятор; 15 – кожух.

В приводах, где требуется регулирование развиваемого двигателем вращающего момента и частоты вращения ротора, применяются АД с фазным ротором. Конструкция такого двигателя схематически показана на рис. 1.5.

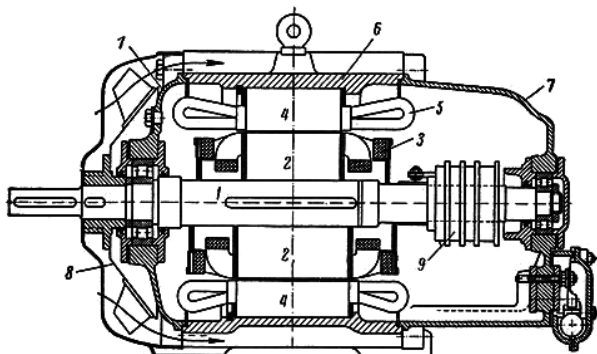


Рис. 1.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором

1 – щит подшипниковый; 2 – сердечник ротора; 3 – обмотка ротора; 4 – сердечник статора; 5 – обмотка статора; 6 – станина; 7 – щит подшипниковый; 8 – вентилятор; 9 – узел контактных колец

Его статор принципиально не отличается от рассмотренного варианта асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Ротор же содержит в пазах трёхфазную обмотку 5, концы которой выведены на контактные кольца 9. Последние размещены на валу жестко с помощью изолирующей втулки.

Токоосъем с колец обеспечивается щетками, щеткодержатели которых жестко закреплены на подшипниковом щите 7.

Наличие фазной обмотки на роторе позволяет в целях регулирования двигателя включать в роторную цепь различные регулирующие устройства: реостаты, дроссели, коммутирующие аппараты и т.п. АД с фазным ротором (АДФР) из-за наличия щеточного контакта требуют 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, кран-балки, тельферы и т.п.), в других регулируемых приводах.

## **1.2. Физические процессы в асинхронном электродвигателе**

Асинхронная электрическая машина представляет собой электромеханический преобразователь электрической энергии в механическую и обратно и подчиняется общим законам электромеханического преобразования энергии:

1) *для непрерывного преобразования энергии* необходимо, чтобы при угловой скорости ротора не равной нулю ( $\omega \neq 0$ ) по всем или части обмоток машины протекали переменные токи, которые могут быть получены от источников переменного тока;

2) *электромеханическая связь в электродвигателе* проявляется в наличии результирующей электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в обмотках машины, вследствие вращения ротора;

3) *процесс преобразования энергии* в электрической машине математически описывается совокупностью уравнений электрического равновесия обмоток машины и уравнением электромагнитного момента.

По своей природе асинхронный двигатель является универсальным преобразователем энергии, в котором происходит преобразование напряжения статора  $U_1$  в напряжение ротора  $U_2$ , частоты питания  $f_1$  в частоту тока ротора  $f_2$ , элек-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)