

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. ТЮКОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2015

УДК 621.3(075.8)
Т 981

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А.В. Сапсалева*
канд. техн. наук, доцент *Г.А. Шанишуров*

Работа подготовлена на кафедре электромеханики

Тюков В.А.

Т 981 Электромеханические системы : учебное пособие / В.А. Тюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – 92 с.

ISBN 978-5-7782-2756-9

В учебном пособии излагаются введение в теорию систем, физические основы электромеханики, вопросы построения электромеханических систем, свойства исполнительных двигателей, устройств электромеханики и их характеристики. Рассмотрены способы и законы управления движением в электромеханических системах.

Учебное пособие предназначено для студентов и магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника», ориентированных на профиль «Электромеханика», и может быть полезно аспирантам специальности «Электромеханика и электрические аппараты».

УДК 621.3(075.8)

ISBN 978-5-7782-2756-9

© Тюков В.А., 2015
© Новосибирский государственный
технический университет, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Система как целое, составленное из частей, включает в себя множество элементов, связанных друг с другом и образующих целостность и единство. Исследование их проводится в рамках системного подхода, где изучаются общность признаков и свойств, методы их математического описания. Именно поэтому дисциплины, посвященные изучению систем отдельного направления, называют междисциплинарными. Электромеханические системы – это совокупность электромагнитных, электрических и механических устройств, элементов, в которых электромагнитные и механические процессы взаимосвязаны и не могут протекать независимо друг от друга. Дисциплина «Электромеханические системы» внесена в планы подготовки специалистов по направлению «Электроэнергетика и электротехника», модуль «Электротехника», и представлена в программах подготовки выпускников многих университетов России как просто теоретическая (математическая), так и прикладной направленности.

Существующие в настоящее время учебные пособия по электромеханическим системам излагают в основном математическую теорию линейных систем, основанную на решении обыкновенных дифференциальных уравнений. Это связано с тем, что теория основных элементов систем построена на теории цепей с привлечением допущений, которые не позволяют математически описать реальные физические процессы. Свойства различных устройств зависят от совокупности интегральных параметров, определить которые невозможно без знания распределения электромагнитного поля. Поскольку непосредственно решать уравнения поля сложно, параметры рассчитывают также на основе упрощенного представления поля, которое базируется на системе допущений. Методики расчетов, использующие эти допущения, позволяют получить удовлетворительные результаты при умеренных электромагнитных нагрузках со слабо выраженной нелинейностью сред, при не особенно высоких требованиях к точности расчета. Соответственно отказ от обычных допущений сделал бы математические

методы исследования, в том числе с применением вычислительной техники, вообще непригодными.

Предлагаемое учебное пособие готовится к изданию в двух частях. Первая часть содержит краткое введение в теорию систем, рассматриваются принципы системного подхода к созданию различных систем. Системы предназначены для преобразования электрической энергии в механическую энергию, поэтому даются основы теории, характеристики и свойства различных исполнительных двигателей: асинхронных, синхронных, двигателей постоянного тока и специальных конструкций. Вопросы, имеющие значение для понимания процесса управления движением, излагаются в такой последовательности: строится модель электромеханического преобразователя энергии, в которой в качестве переменных фигурируют потоки энергии, вводится классификация режимов с позиции традиционной энергетики и приводятся элементы теории электромеханики.

В следующем пособии будут затронуты вопросы строгого математического описания электромеханических процессов, которое требует знания положений векторного анализа и теории поля, определяющих общую суть электромеханического преобразователя энергии, и современные способы управления движением. В связи с изменением учебного плана издание учебного пособия по дисциплине «Электромеханические системы» приводится в сокращенном виде.

Используемые специальные обозначения:

H – вектор напряженности магнитного поля;

j – вектор плотности тока;

D – вектор электрического смещения (электрической индукции);

E – вектор напряженности электрического поля;

B – вектор магнитной индукции;

F – вектор силы;

dl – элемент длины проводника с током – вектор.

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ СИСТЕМ

В1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ

В последние годы методологию выбора научно обоснованных решений технических и социальных проблем связывают с такими понятиями, как общая теория систем, системный подход, комплексный подход, системный анализ и др.

Создание сложных технических систем, проектирование народно-хозяйственных комплексов и управление ими, анализ экологической ситуации и многие другие направления инженерной, научной и хозяйственной деятельности требовали проведения исследований, которые носили бы нетрадиционный характер.

Теория систем возникла как обобщение именно тех принципов и закономерностей, которые в значительной степени могут быть применимы к объектам разной природы.

Она изучает общность свойств и признаков сложных систем, методы их математического описания независимо от того, объектом изучения каких научных дисциплин стали эти системы. Именно поэтому общую теорию систем называют междисциплинарным научным направлением.

Фундаментальное понятие теории систем – это понятие «система». Несмотря на то что термин «система» появился в научной литературе давно, фактически он столь же неопределенный, как и «множество» или «совокупность». Буквально система – целое, составленное из частей. Системой считается объект, обладающий четырьмя свойствами: целостностью, исчислимостью, существенными связями между элементами, наличием организации интегративных качеств.

Элемент – простейшая неделимая часть системы, или предел членения системы при решении конкретной задачи.

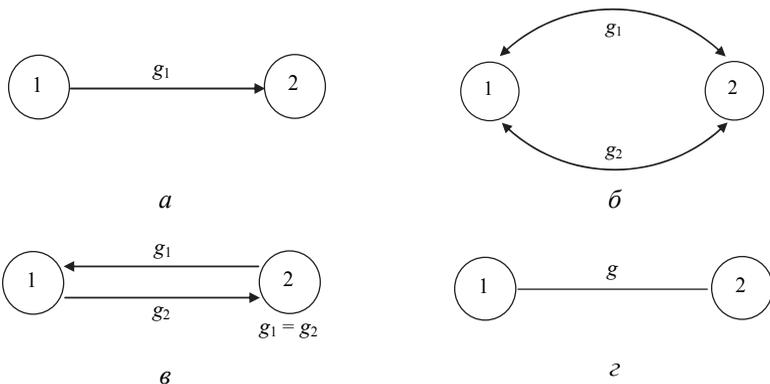
Подсистема – множество более крупных, чем элементы, но более детальных, чем система в целом, составляющих. Возможность деления на подсистемы связана с вычленением совокупностей взаимосвязанных

элементов, способных выполнять относительно независимые функции, т. е. обладающих свойством целостности.

При этом надо иметь в виду, что элементы существуют лишь в системе. Вне системы – это объекты, которые обладают лишь системнозначимыми свойствами, дающими этому объекту потенциальную возможность быть включенным в систему.

Система характеризуется тем, что между ее элементами или их свойствами реализуются устойчивые связи, которые по мощности (силе) превосходят связи (отношения) данных элементов с элементами, не входящими в данную систему. Указанное свойство отличает систему от простого набора элементов и выделяет ее из окружающей среды в виде целостного образования [12].

Связь – физический канал, по которому обеспечивается обмен между элементами системы и системы с окружающей средой. Обмен возможен веществом, энергией, информацией и т. д. По физическому наполнению связи бывают вещественными, энергетическими, информационными, смешанными и физически ненаполненными. К физически ненаполненным связям относятся связи типа: равно ($=$), больше ($>$), меньше ($<$), принадлежит (\in), не принадлежит (\notin) и т. д. По направлению различают связи прямые, обратные и нейтральные.



Виды связей:

a – прямая; *b* – прямая и обратная; *v* – прямая и контрсвязь; *z* – нейтральная

Важной характеристикой связи является ее мощность (сила). Система существует как некоторое целостное образование тогда и только тогда, когда мощность (сила) существенных связей между элементами

системы больше, чем мощность (сила) связей этих элементов с окружающей средой [8].

Наиболее просто оценивается сила (мощность) энергетических связей между элементами по интенсивности потоков энергии. Для этого определяются общие количества энергии, циркулирующие в системе в единицу времени, и количество энергии, проходящее через определенный канал связи между элементами за ту же единицу времени. Их отношение и покажет мощность связи [13].

В2. КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ СИСТЕМ

Как правило, на первое место выдвигают классификацию систем по их происхождению. По этому признаку можно выделить три класса систем.

Естественные системы, существующие в объективной действительности, т. е. в живой и неживой природе, возникающие в результате естественных процессов, в которых связи образуются «природным» образом.

Искусственные системы, созданные человеком как средство достижения поставленной цели, в которых связи образованы в результате человеческой деятельности, хотя некоторые из них могут иметь естественную природу (машины, механизмы, приборы, научные теории, системы знаний о природе и т. п.).

Смешанные системы. В качестве примеров подклассов смешанных систем можно привести экономические подсистемы (комплексы машина – человек-оператор), биотехнические системы, в которые входят живые организмы и технические средства, автоматизированные системы управления (человеко-машинные системы управления) и т. п.

Методы теории систем применимы к любым отраслям знаний. Поэтому системы можно классифицировать по виду отражаемого объекта, выделяя среди них *технические, биологические, социальные, экономические* и т. п.

По отношению к движению все системы можно разделить на два класса. Характеристики системы могут изменяться в процессе ее функционирования. В этом процессе могут изменяться связи, которые могут возникать и исчезать.

Таким образом, в каждый момент времени система характеризуется определенным набором свойств [14].

Совокупность всех характеристик каждого элемента системы и связей в ней в определенный момент времени называют **состоянием системы**.

При функционировании системы ее состояние может изменяться, т. е. система находится в движении.

Динамическими называют системы, структура и связи которых изменяются в течение рассматриваемого интервала времени.

Статическими называют системы, не подверженные изменениям во времени.

Реальные системы являются динамическими, поэтому статические системы – это абстракции, идеализации, используемые при моделировании таких свойств систем, изменение которых во времени для рассмотрения несущественно.

В3. УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ

Все технические и технологические системы должны быть управляемы. Под управлением будем понимать процесс организации такого целенаправленного воздействия на структуру системы и ее связи, в результате которого изменяется функционирование системы и обеспечивается достижение поставленной цели.

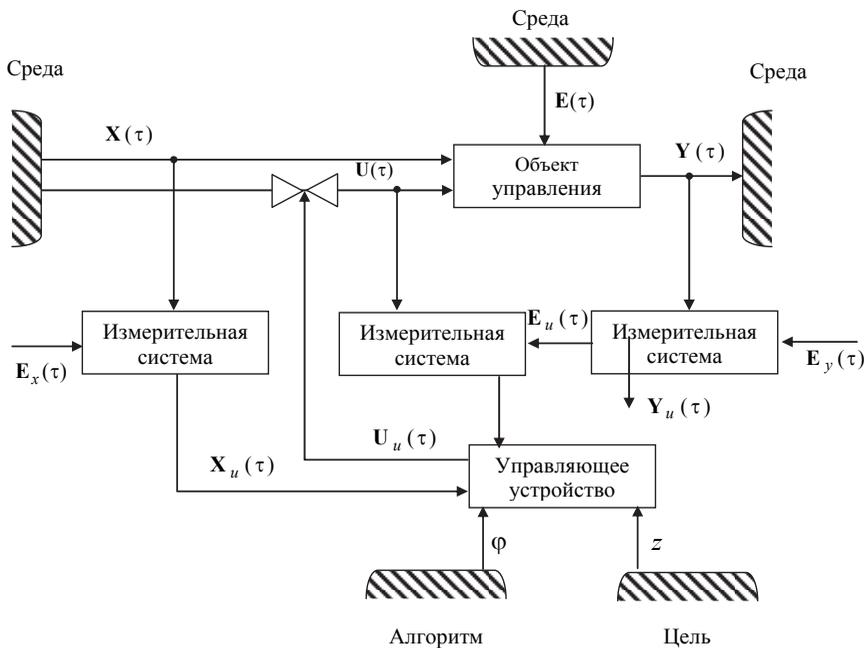
Система, в которой осуществляется процесс управления, называется **системой управления**.

В общем виде структура управления технической или технологической системой представлена на рисунке. Обобщенная схема системы управления содержит:

- входы и выходы;
- управляющее воздействие и объект управления;
- измерительные системы возмущений;
- управляющие устройства для целенаправленного влияния на выходные параметры в соответствии с алгоритмом управления.

В процессе управления система динамически взаимодействует с внешней средой и может быть количественно оценена через свои входы и выходы. Вектор входных параметров обозначим $X_{\text{вх}}(\tau)$, а выходов – $Y_{\text{вых}}(\tau)$.

Обычно среди векторов входных параметров выделяются следующие группы переменных параметров.



Обобщенная схема системы управления

Входные переменные (контролируемые возмущения) $X(\tau)$. К этой группе относятся такие переменные, которые измеряются, а следовательно, и наблюдаются, но возможность воздействия на них отсутствует. В связи с этим такую группу входных параметров называют иногда контролируруемыми возмущениями.

Управляющие переменные (управляющие воздействия) $U(\tau)$. Под управляющими переменными понимают такие входные параметры, с помощью которых можно целенаправленно влиять на вектор выходных параметров. Отметим, что управляющие переменные всегда наблюдаемы и остаются ресурсами управления для их изменения.

Возмущающие переменные (возмущения) $E(\tau)$ – случайным образом изменяющиеся во времени неконтролируемые параметры. Относительно входа $E(\tau)$ выдвигаются обычно лишь определенные предположения, гипотезы, но непосредственно этот вход не измеряется. В частности, это колебания нагрузки.

Таким образом, объект управления имеет три входа: наблюдаемый, но не управляемый $X(\tau)$, управляемый, а следовательно, и наблюдаемый $U(\tau)$ и ненаблюдаемый $E(\tau)$. Все эти входные параметры влияют на выходные, т. е. в любой момент времени выходные параметры объекта управления $Y(\tau)$ являются функцией векторов $X(\tau)$, $U(\tau)$, $E(\tau)$.

Измерительные системы, указанные на рисунке, позволяют контролировать некоторые переменные векторы $X(\tau)$, $U(\tau)$, $Y(\tau)$ или их комбинации. В большинстве случаев размерность этих векторов, характеризующих истинное состояние процесса, больше соответствующей размерности их измеренных значений X_u , U_u , Y_u . Последнее связано с тем, что часть переменных невозможно измерить из-за отсутствия необходимых технических средств измерения, а некоторые из них в принципе измерить невозможно. При этом неопределенность вносится погрешностями измерений, случайными возмущениями, действующими на измерительные системы E_y , E_x , E_u .

Эта информация всегда будет неполной из-за ограниченных возможностей всякой системы сбора информации и необходимости затрат на нее.

В процессе исследования систем обычно приходится рассматривать не систему (чаще ввиду сложности), а формальное описание ее существенных особенностей. В этом случае реальная система заменяется моделью. Разработку моделей и последующее их использование называют моделированием систем. В основе моделирования лежат математические модели.

Математическая модель – система математических выражений, описывающих существенные характеристики моделируемой системы. Вид математической модели зависит как от природы реальной системы, так и от задач исследования и требуемой достоверности и точности решения задач. Поскольку математические модели абстрактны, они широко используются в системных исследованиях [13].

Математическая модель объекта является его идеализацией. Поэтому приходится применять те или иные допущения, упрощения, значимость которых можно оценить лишь по конечному результату. Возникает задача «настройки» математической модели на реальный объект, или идентификации модели. Главная задача идентификации модели – параметрическая идентификация – определение именно таких

значений параметров, результаты расчета которых совпадают с экспериментом. Существенны процессы превращения энергии в электромеханических преобразователях (ЭМП) энергии.

В4. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Принципы системного подхода – некоторые утверждения общего характера, обобщающие опыт разработки сложных систем:

- принцип конечной цели – абсолютный приоритет конечной (глобальной) цели;
- принцип единства – совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности частей (элементов);
- принцип связности – рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением;
- принцип модульного построения – выделение подсистем (блоков, модулей) в системе и рассмотрение ее как совокупности модулей;
- принцип иерархии подсистем (элементов) и (или) их ранжирование;
- принцип развития – учет изменяемости, способности к развитию, замене частей, накоплению информации;
- принцип децентрализации – сочетание принимаемых решений и управление централизацией и децентрализацией;
- принцип неопределенности – учет неопределенности и случайностей в системе.

Отметим, что хотя все перечисленные принципы так или иначе затрагиваются практически при любом изложении системного подхода, их формулировки пока не стали общепринятыми.

Рассмотрим введенные принципы более подробно.

Принцип конечной цели означает, что в целенаправленной системе все должно быть подчинено именно ей. Любая попытка совершенствования, изменения и управления в такой системе должна оцениваться с учетом того, помогает или мешает она достижению конечной цели. Это накладывает особую ответственность на выбор цели и ее четкую трактовку. Расплывчатые, не полностью определенные конечные цели обуславливают неясности в структуре и управлении системой и, как следствие, неверные действия.

В несколько измененной трактовке принцип конечной цели применяют и к системам, которые не являются целенаправленными. В этом

случае понятие конечной цели заменяют понятиями основной функции, основного назначения, свойства системы.

Следующие три принципа тесно взаимосвязаны, их иногда даже объединяют в один принцип – единства связи. Но имеются причины, по которым их полезно рассматривать отдельно. Во-первых, принцип единства – ориентация на «взгляд внутрь» системы или ее части, а принцип связности – на «взгляд изнутри». В разные моменты исследований полезна либо та, либо другая ориентация. Во-вторых, рекомендуемое в принципе единства расчленение системы с сохранением целостных представлений о ней на практике отличается от процедуры выявления возможных связей, рекомендуемой в принципе связности.

Принцип модульного построения указывает на возможность рассмотрения вместо части системы совокупности ее входных и выходных воздействий. Он утверждает, что полезно абстрагироваться от излишней детализации при сохранении возможности адекватного описания системы [17].

Принцип иерархии акцентирует внимание на целесообразности отыскания или создания в системе иерархического (доминирующего) характера связей между элементами. Исследователь должен решать, в каком порядке он будет рассматривать части системы, а наладчик начинает поиск неисправностей в системе с тестов, определяющих наиболее типичные отказы. Этот принцип широко используется при проектировании, проведении исследований технических систем [9].

Понятие развития, изменяемости при сохранении качественных особенностей или усовершенствования систем закладывается, как правило, в основу создания системы. При модульном построении такое развитие обычно сводится к замене и добавлению модулей (частей), с этим связаны, в частности, модернизация, усовершенствование оборудования, технологии.

Принцип децентрализации рекомендует, чтобы управляющие воздействия и принимаемые решения исходили не только из одного центра. Ситуация, когда все управления исходят из одного центра, называется полной централизацией. Такое положение считается оправданным лишь при особой ответственности за все происходящее в системе. Однако система с полной централизацией будет негибкой, приспособляющейся, не обладающей «внутренней активностью». Кроме того, чем выше степень децентрализации решений в системе, тем сложнее они согласуются для достижения глобальной цели. При этом естественно возникает вопрос об оптимальной степени централизации

системы. Общий принцип такого сочетания прост: степень централизации должна быть минимальной, обеспечивающей выполнение поставленной цели.

Принцип неопределенности утверждает, что можно иметь дело и с системами, в которых нам не все известно или понятно. Это может быть система с невыясненной структурой, с непредсказуемым ходом процессов, с неизвестными внешними воздействиями. Существует несколько способов учета неопределенности в системе. В частности, можно оценивать «наихудшие» или в каком-то смысле «крайние» возможные ситуации. Этот способ обычно называют методом гарантированного результата (оценки); по информации о вероятностных характеристиках случайностей (математическому ожиданию, дисперсии и другим оценкам) можно оценить вероятностные характеристики выхода систем.

Все эти принципы обладают очень высокой степенью общности, т. е. отражают отношения, значительно абстрагированные от конкретного содержания прикладных проблем. Интерпретация принципов для данного частного случая может приводить и к обоснованному выводу о незначимости какого-либо из принципов или об отсутствии условий для его применения. Так, в системе может не быть иерархии, она может считаться полностью определенной. Связи могут быть настолько очевидны, что не требуется специально их рассматривать. Многократное применение исследователями принципов системного подхода в разных ситуациях приводит к тому, что у них вырабатывается особый тип мышления, который принято называть системным. Такое мышление характеризуется умением более правильно ставить и решать задачи, связанные с разработкой систем. Особенно это необходимо при создании систем науки и образования, для которых следует ввести принцип эквивалентности. Использование этих принципов будет показано позднее при решении задач моделирования систем [11].

В5. СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цивилизованная жизнь неразрывно связана с движением и электричеством как наиболее удобной для преобразования и управления формой энергии. В свою очередь движение и электричество составляют суть электромеханики. Следовательно, электромеханика всегда будет сопровождать процессы жизнедеятельности человечества, так как взаимное преобразование механической и электрической энергии создает

основу научно-технического прогресса, определяющую развитие мощной энергетики, промышленности, транспорта, бытовой техники [2].

Освоение природных ресурсов, превращение энергии из одного вида в другой, использование техники в многочисленных технологических процессах неизбежно приводят к созданию электромеханических систем. Устройства электромеханики играют определяющую роль не только в традиционных системах преобразования электрической энергии в энергию движения, но и в новой экологически чистой энергетике, в перспективной авиакосмической технике, в высокоскоростном транспорте и новых системах вооружения. Электромеханика активно расширяет свои границы за счет интеграции с электроникой (электромеханотроника), благодаря созданию новых типов электромеханических преобразователей энергии, накопительных комплексов и развитию магнитной гидродинамики. В результате создаются электромеханические системы, способные к реализации принципов системного подхода и обладающие свойствами: целостностью, исчислимостью, наличием существенных связей между элементами и наличием интегративных качеств.

Г Л А В А 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

В настоящей главе рассмотрены физические процессы в электро-механических устройствах и принципы их технической реализации, необходимые для понимания работы и свойств конкретных преобразователей энергии.

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электромеханика изучает взаимодействие электромагнитных и механических систем с целью преобразования энергии, управления объектами и получения информации. Основой электромеханических процессов считается движение электрических и ферромагнитных элементов в электромагнитном поле. Обычно используют допущение о независимости магнитного и электрического поля, и движение элементов учитывается отдельно в этих полях [7]. Под электромеханической системой следует понимать совокупность электромагнитных, электрических и механических устройств, в которых электромагнитные и механические процессы взаимосвязаны и не могут протекать независимо друг от друга.

Понятие электромеханической системы весьма широко и включает в себя как различные электромеханические преобразователи энергии, электромеханические механизмы и приборы, так и совокупность электропривода и рабочей машины. Всякое движение в электромеханических системах определяется взаимодействием электромагнитных и механических элементов. Силовое взаимодействие элементов сопровождается превращением механической энергии в электрическую либо электрической энергии в механическую энергию, или энергию движения [19].

Области применения электромеханических систем разнообразны – от миниатюрных с мощностью в несколько милливольт до крупных энергосистем мощностью до 1200 МВт. Широкое многообразие элек-

тромеханических систем приводит к необходимости изучать общие принципы, особенности конструкций отдельных устройств электромеханики и их свойства.

Наиболее общий метод решения задач в электромеханике состоит в определении взаимодействия тел, несущих ток или заряд, в электромагнитном поле – полевой подход [1]. Этот подход опирается на решение уравнений электродинамики или теорию электромагнитного поля, в классическом варианте – уравнений Максвелла. Однако необходимость определения граничных условий делает этот подход весьма трудоемким. Практический метод решения задач в электромеханике заключается в том, что электромеханическое устройство рассматривается как совокупность электрических и магнитных цепей с сосредоточенными параметрами и использует гипотезу «квазистационарности» [7]. Такие допущения применяются, когда скорости протекания физических процессов и частоты изменения величин относительно невелики, что позволяет формулировать динамические уравнения на основе параметров, определенных с помощью измерений или расчетов статистического поля.

Это дает возможность строить различные обобщенные модели электромеханических систем на основе уравнений, где в электрические цепи входят электродвижущие силы, зависящие от механических скоростей (ЭДС движения), наряду с ЭДС, зависящими от магнитных потоков и их производных от времени. Уравнения механического движения содержат составляющие, являющиеся функциями электрических величин [17]. Поскольку в большинстве случаев электромеханические процессы связаны с относительным движением проводящих элементов в магнитном поле, то основные элементы конкретного преобразователя – индуктор и якорь могут быть как движущиеся (вращающиеся), так и неподвижные.

Анализ устройств электромеханики базируется на следующей информации.

Во-первых, на знании распределения магнитного и электрического полей для решения пространственных полевых задач и расчета параметров, магнитных и электрических цепей, с помощью которых реализуются базовые явления и эффекты электромагнитного поля.

Во-вторых, на расчете электромагнитных сил и моментов, действующих на активные элементы устройства.

В-третьих, на определении энергетических характеристик устройств с учетом возникающих в них потерь.

Перечисленные вопросы в общем виде служат основой дальнейшего анализа конкретных типов электромеханических преобразователей и систем [2].

1.2. ЯВЛЕНИЯ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

В основе всех физических явлений электромагнетизма лежат силовые взаимодействия между зарядами. Явление взаимодействия между двумя неподвижными зарядами определяется силой, которая пропорциональна произведению их величин и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, – закон Кулона, установленный в 1765 г.

Явление силового взаимодействия между двумя параллельными проводниками с токами открыл А. Ампер в 1820 г. Сила пропорциональна произведению токов (движущихся зарядов) и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками – закон Ампера. Принято, что в пространстве между проводниками образуется магнитное поле, которое взаимодействует с током в проводнике. В результате появилась возможность установить величину магнитной индукции – это магнитная индукция такого поля, которое действует на элемент длиной в 1 метр (м) с током в 1 ампер (А) с силой в 1 ньютон (Н).

Явление электромагнитной индукции открыто в 1831 г. М. Фарадеем – возникновение электрического тока в проводнике при изменении магнитного потока через контур проводника (это явление было известно Дж. Генри, но М. Фарадей первый опубликовал открытие). Соответственно был установлен закон электромагнитной индукции: всякое изменение магнитного потока, сцепленного с замкнутым контуром, вызывает наведение в контуре ЭДС (e), при этом не имеет значения, чем вызвано изменение магнитного поля (формулировка закона, уточненная Максвеллом), т. е.

$$e = -d\Phi/dt \text{ или } e = -d\Psi/dt,$$

где Φ – магнитный поток, сцепленный с витком контура; Ψ – потокосцепление со всеми витками контура. Если число витков равно w , то $\Psi = w\Phi$.

При линейной зависимости между током и потоком, где отсутствуют ферромагнитные участки цепи, по которым замыкается магнитный поток, вводится коэффициент пропорциональности L – индуктивность контура, тогда $\Psi = Li$ и $e = -Ldi/dt$.

Явление взаимодействия двух неподвижных зарядов определяется силой, которая пропорциональна произведению их величин и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, и взаимодействие между двумя проводниками с токами определяется силой, пропорциональной произведению токов (движущихся зарядов) и обратно пропорциональной расстоянию между проводниками. Явление электромагнитной индукции обеспечивает восприятие действия магнитного поля путем создания электродвижущей силы в замкнутом контуре при изменении потокосцепления, сцепленного с данным контуром.

Такое качественное описание электромагнитных явлений без привлечения строгого математического аппарата принято в настоящее время в электромеханике [23].

1.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Все электромагнитные явления полностью описываются дифференциальными уравнениями в частных производных и векторной форме, представленными Максвеллом в 1870 г., который создал теорию электромагнитного поля, как результат обобщения уже известных к тому времени экспериментов.

Первое уравнение устанавливает связь между движущимися зарядами и напряженностью магнитного поля:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t,$$

где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; \mathbf{j} – вектор плотности тока; \mathbf{D} – вектор электрического смещения (электрической индукции).

Второе уравнение устанавливает связь между изменяющимся магнитным полем и напряженностью электрического поля:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t,$$

где \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{B} – вектор магнитной индукции.

Третье уравнение подчеркивает, что магнитное поле непрерывно:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Четвертое уравнение устанавливает связь электрического поля с зарядами:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \epsilon,$$

где ρ – объемная плотность зарядов; ε – электрическая постоянная конкретной среды, так как электромагнитное поле всегда распределено в пространстве, т. е. в определенной среде [16].

Влияние среды (материала) различно на составляющие электромагнитного поля – электрическое поле и магнитное поле. Характеристики сред: γ – удельная электропроводность (проводники); μ – магнитная проницаемость (магнитопроводы) и ε – электрическая постоянная (изоляция).

В результате в описании процессов в электромагнитном поле присутствуют материальные уравнения:

- для магнитного поля $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$, где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля;
- для электрического поля $\mathbf{j} = \gamma \cdot \mathbf{E}$, в проводящей среде, где \mathbf{j} – вектор плотности электрического поля (тока);
- для электрического поля $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$, в вакууме или диэлектрике.

1.4. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМА ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Уравнения Максвелла позволяют установить количественные (интегральные) соотношения – законы, на которых основана работа всех электромеханических устройств. Законы, записанные в интегральной форме, служат основой для всех практических расчетов в электромеханике, для разработки методических рекомендаций по проектированию различных электромеханических устройств: электрических машин и аппаратов, трансформаторов, магнитных усилителей и модуляторов.

Закон полного тока:

$$\oint \mathbf{H} d\ell = \Sigma I,$$

т. е. циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равна полному току, охватываемому этим контуром, и согласуется с уравнением $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$ для проводящей среды.

Закон полного тока используется при расчете магнитных цепей, где интеграл представляется суммой намагничивающих сил участков, по которой определяется необходимая намагничивающая сила (НС) цепи, создаваемая обмоткой, $\Sigma H_k \ell_k = F = \Sigma F_k$, k – номер участка, ℓ_k – длина участка.

Закон электромагнитной индукции: всякое изменение магнитного поля, сцепленного с замкнутым контуром, вызывает наведение в контурах ЭДС, при этом не имеет значения, чем вызвано изменение магнитного поля, т. е.

$$e = - d\Psi/dt.$$

Закон электромагнитных сил устанавливает связь между электромагнитным полем и движущимися зарядами или током. На элемент проводника с током в магнитном поле действует электромагнитная сила. Если ток равномерно распределен по проводнику, то сила

$$\mathbf{F} = I [\mathbf{dl} \cdot \mathbf{B}],$$

где \mathbf{F} – вектор, перпендикуляр к плоскости, образованной векторами: \mathbf{dl} – элемент длины проводника с током I в векторном поле \mathbf{B} магнитной индукции.

Более подробно взаимодействие можно описать в следующем виде. В проводнике, движущемся в магнитном поле \mathbf{B} в направлении, например, dx со скоростью \mathbf{v} , заряды, находящиеся в проводнике, перемещаются с той же скоростью. На движущийся элемент dl проводника с зарядом dq действует сила:

$$d\mathbf{F} = dq[\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}].$$

Магнитное поле действует только на движущийся заряд, и соответственно на проводник с током в магнитном поле всегда действует сила.

Закон полного тока определяет создание магнитного поля в любом электромеханическом устройстве при наличии тока в контурах.

Закон электромагнитной индукции обеспечивает восприятие действия магнитного поля путем создания ЭДС при изменении потоко-сцепления какого-либо контура.

Закон электромагнитных сил объясняет возникновение движения [17].

Г Л А В А 2

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В главе приводятся сведения по подходам к описанию теории устройств электромеханики, даны представления о конструктивном исполнении, принципах действия и эксплуатации электромеханических преобразователей. В электромеханических системах, направленных на преобразование электрической энергии в механическую энергию, преобразователи обеспечивают управляемое движение, без которого невозможно превращение энергии одного вида в другой. В настоящем учебном пособии рассматривается только этот тип устройств – исполнительные двигатели. Причем приводятся кратко основы теории, свойства и характеристики двигателей, необходимые для работы их в электромеханических системах.

2.1. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВА

При изучении различных процессов преобразования энергии основное внимание обращается на электромагнитный процесс, включающий в себя превращение электрической энергии в механическую и наоборот, поэтому говорят об электромеханических преобразователях (ЭМП).

При этом основное внимание уделяется устройствам с магнитным полем, т. е. «работающим от тока», об устройствах с электрическим полем, т. е. работающим от напряжения, даются только общие представления. Связано это с тем, что в настоящее время не существует электротехнических материалов, способных допускать такие же плотности запасенной энергии, как у магнитных материалов.

Сравнение плотностей электрического и магнитного полей $\frac{1}{2}\varepsilon E^2$ и $\frac{1}{2}\mu H^2$ показывает, что энергия запасается пропорционально диэлектрической проницаемости (постоянной) $\varepsilon \approx 10^{-11}$ Ф/м и магнитной

проницаемости (постоянной) $\mu \approx 10^{-6}$ Гн/м [16]. Изучение ЭМП опирается на два различных исходных представления:

- на закон сохранения энергии, где соотношения между силами получают путем применения принципа виртуальной работы;
- на определение кинетической и потенциальной энергии, когда соотношения между силами получают при помощи уравнений Лагранжа.

На основе уравнений, описывающих процессы в ЭМП, по с аналогии с электрической цепью можно получить эквивалентную электрическую схему. Такая аналогия позволяет применить методы решения и некоторые основные представления о поведении систем, известных электромеханикам, к расчету переходных и установившихся режимов и характеристик ЭМП.

Имеется определенная трудность в классификации электромеханических преобразователей, вызванная тем, что они существуют с обмотками, фиксированными относительно неподвижных и подвижных частей. И, кроме того, возникает эффект движущихся полей за счет движения вращающихся частей ЭМП. Поэтому существует две обобщенные модели ЭМП, которые математически эквивалентны, но подходы к их созданию различны [15].

1. Описание одной модели основано на применении эквивалентной электрической схемы с вращающейся частью, которая доведена до совершенства в «примитивной машине». Впервые модель предложена в 1942 г. Кроном, работавшим тогда в компании General Electric. С применением модели анализ всех машин проводится по единой методике на основе электрических и механических уравнений равновесия.

2. Описание модели идеализированной вращающейся машины с точки зрения теории электромагнитного поля, предложенной Уайтом и Вудсоном, отличается от модели Крона только методикой получения важных параметров модели машины и ее основных характеристик [10]. В идеализированной модели машины устанавливают происхождение полей \mathbf{E} (электрическое поле) и \mathbf{H} (магнитное поле) в воздушном зазоре этой модели, затем определяют потоки энергии, распределяющиеся вдоль и поперек воздушного зазора, вычисляют соответствующие векторы Пойнтинга (полной энергии электромагнитного поля) и интегрируют их по выбранным поверхностям. Анализируя поле, можно вычислить запасенную энергию, а также различные индуктивности, характеризующие конкретную машину.

Сравнивая эти модели, можно показать, что одна модель является по существу математически преобразованной версией другой [17].

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКА КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Всякий электромеханический преобразователь (ЭМП) состоит из двух совершенно необходимых частей:

1) магнитной, предназначенной для локализации магнитного поля в заданном объеме;

2) электрической, выполняющей две функции:

- во-первых, создание магнитного поля;
- во-вторых, восприятие действия созданного в ЭМП магнитного поля в форме наведения ЭДС в обмотках.

Кроме того, к электрической части следует отнести и различные преобразователи частоты, непосредственно с ней связанные (коллектор, электронный коммутатор и т. д.). Кстати, в машинах постоянного тока коллектор выполняет функцию электромеханического преобразователя частоты.

Магнитная часть состоит из подвижного и неподвижного элементов и может быть реализована в основных ЭМП в четырех вариантах.

Основные конструктивные решения магнитной части реализованы:

1 – в асинхронных (индукционных) машинах;

2 – в машинах постоянного тока;

3 – в синхронных машинах;

4 – в коллекторных электрических машинах переменного тока.

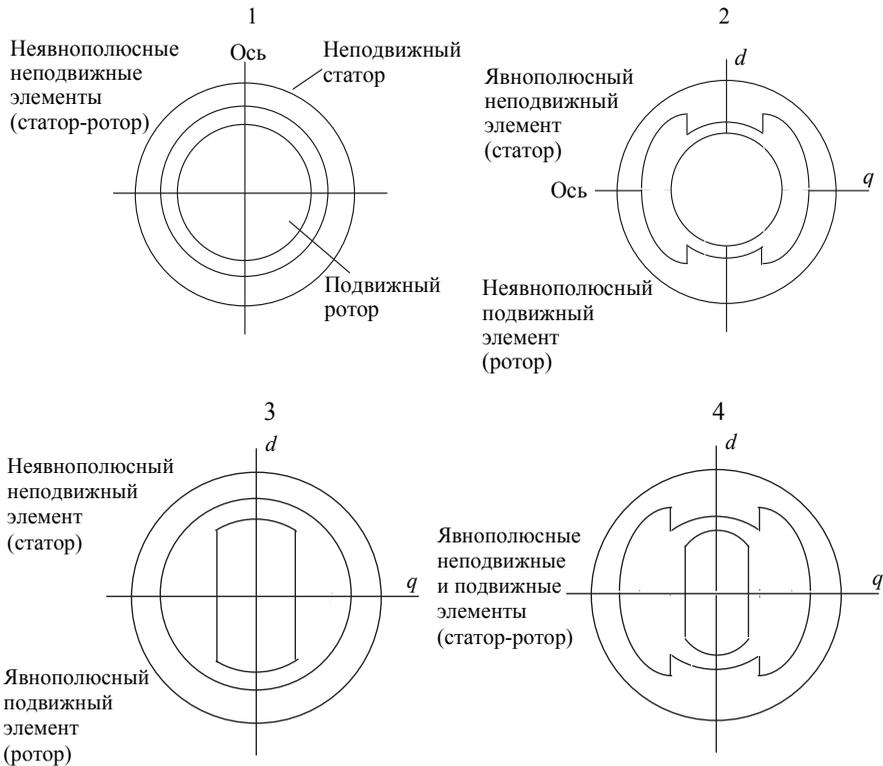
Конечно, имеется огромное количество специальных электрических машин, в которых используются конструкции элементов в различных сочетаниях [17].

Электрическая часть выполняется в виде обмоток, определенным образом расположенных на магнитной части. Обмотки, создающие магнитное поле, называют обмотками возбуждения и располагают чаще всего на полюсах. В машинах постоянного тока на полюсах неподвижной части – статоре; в синхронных машинах на вращающейся (подвижной) части – роторе. При этом обмотка выполняется в виде катушек на полюсах.

Обмотки, воспринимающие действие магнитного поля, называют чаще всего якорными или вторичными, и их располагают на неявнополюсном статоре или роторе в специальных пазах. Эти распределенные в пространстве воздушного зазора обмотки, охватывающие полюсное

деление и имеющие пространственный сдвиг осей на угол $\frac{2\pi}{m}$, способны создавать вращающееся магнитное поле. Соответственно

в вариантах: 1 – распределенные обмотки на статоре и на роторе в асинхронных двигателях (на статоре – обмотка возбуждения, на роторе – обмотка якоря); 2 – распределенная обмотка на роторе (якоре) в двигателях постоянного тока; 3 – распределенная обмотка на статоре в синхронных двигателях. В варианте 4 обе обмотки сосредоточены, и их функции трудно разделить, особенно, если они электрически соединены. Вариант 2 дополняется коллектором или электронным коммутатором (для маломощных машин).



Основные конструктивные решения магнитной части

С позиции электромеханического преобразования энергии выделяют два основных составных элемента:

- индуктор – совокупность элемента магнитной части и обмотки, создающей магнитное поле (например, в вариантах 2, 4 – статора

с обмоткой возбуждения), в варианте 3 – ротор с обмоткой возбуждения, в варианте 1 – статор с обмоткой, подключенной к электрической сети.

- якорь – совокупность элемента магнитной части и обмотки, воспринимающей действие магнитного поля (варианты 1, 2 – ротор с обмоткой в асинхронных двигателях, якорь в двигателях постоянного тока, 3 – статор с обмоткой в синхронных двигателях). В варианте 2 к якору можно отнести и коллектор [17].

2.3. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Анализ электромеханических преобразователей показывает, что функции преобразования энергии выполняются при периодическом пространственном изменении магнитного поля, т. е. $\frac{\partial \Psi}{\partial \gamma} \neq 0$, так как только в этом случае $M_{эм} \neq 0$, $P_{эм} \neq 0$. Здесь γ – угол поворота. Магнитные поля (потокосцепления), индуктивности и взаимные индуктивности не могут быть монотонно возрастающими функциями токов и угла поворота подвижной части (ротора), и, следовательно, единственным возможным является случай их периодического изменения в зависимости от взаимного перемещения индуктора и якоря. При этом можно перемещать индуктор просто механически или перемещать (вращать) магнитное поле, созданное обмотками [5]. Создание вращающихся магнитных полей в электрических двигателях осуществляют многофазными обмотками, т. е. при $m \geq 2$. Для этого требуется также многофазная сеть – источник питания. Необходимо выполнить всего два условия.

1. Обмотка должна быть m -фазная и подключена к m -фазному источнику питания.

2. Оси фаз обмотки располагают в двигателе с пространственным сдвигом на угол $\alpha = \frac{2\pi}{m}$ электрических градусов, равным временному сдвигу фаз источника.

Для трехфазной обмотки: $m = 3$, $\alpha = 120^\circ$, $\varphi_\Phi = 120^\circ$.

Для двухфазной обмотки: $m = 2$, $\alpha = 90^\circ$, $\varphi_\Phi = 90^\circ$.

Тип исполнительного двигателя и способ управления им в значительной мере определяют как структуру управления электромеханической системы, так и достигаемые при этом показатели.

2.4. НАГРЕВ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Нагрев электродвигателей связан с потерями мощности, которые определяют степень нагрева двигателя. Допустимую температуру всегда выбирают для наиболее нагретой части изоляции. Обычно контролируют температуру по изменению сопротивления обмотки.

Среднее превышение температуры обмотки можно определить по формуле

$$\Theta = (R_n - R_x) / R_x (235 + T_x) + T_x - T_{\text{окр}},$$

где Θ – среднее превышение температуры обмотки, °С; R_n – сопротивление обмотки при нагрузке; R_x – сопротивление обмотки в холодном состоянии; T_x – температура обмотки в холодном состоянии; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

В установившемся режиме (постоянная нагрузка, частота вращения, температура окружающей среды и т. д.) двигатель работает в условиях теплового равновесия. Это означает, что образовавшаяся в нем энергия потерь (теплота) под воздействием разности температур без остатка передается окружающей среде и, следовательно, температура отдельных частей двигателя не изменяется.

Особенностью электрических машин является неразрывное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т. е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. Металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до (400...500) °С и выше, а верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет (90...180) °С. В настоящее время в электрических машинах применяются изоляционные материалы классов нагревостойкости: *E*, *B* и *F* (ГОСТ 8865–70). Диэлектрические свойства изоляционных материалов с течением времени ухудшаются. При длительной эксплуатации изоляция усыхает, уменьшается ее механическая прочность, снижается пробивное напряжение. Этот процесс называют старением изоляции. Интенсивность старения во многом зависит от температуры. Чем выше рабочая температура, тем интенсивнее происходит старение и уменьшается срок службы изоляции. Предельно допустимый нагрев частей электрической машины зависит от класса нагревостойкости

изоляции. При определении температуры обмоток методом сопротивления превышения температуры не должны быть больше: 65 °С – для частей машины с изоляцией класса нагревостойкости *A*; 80 °С – класса *E*; 90 °С – класса *B*; 110 °С – класса *F* и 135 °С – класса *H*. Когда температура охлаждающей среды отлична от 40 °С, предельно допустимые превышения температур частей электрической машины пересчитываются.

Нагрев во времени зависит от теплоемкости двигателя и может продолжаться несколько часов. В кратковременных и повторно-кратковременных режимах двигатель за время нагрузки не успевает нагреться до установившейся температуры, поэтому он работает с большей нагрузкой на валу и большей подводимой мощностью. Для большинства производственных механизмов (компрессоры, вентиляторы, картофелеочистки и др.) применяются асинхронные двигатели общего применения продолжительного режима работы. Для подъемников, кранов, кассовых аппаратов применяются двигатели повторно-кратковременного режима работы. Двигатели кратковременного режима работы используются для машин, применяемых во время ремонтных работ, например электрических талей и кранов [3].

В первом приближении для оценки нагрева двигатель представляется как однородное тело с источниками тепла (потерями), равномерно распределенными внутри его объема. Процесс нагрева исследуется при постоянной нагрузке двигателя. С момента включения двигателя возникающие потери частично передаются окружающей среде ($p_{\text{окр}}$), а другая часть вызывает возрастание температуры ($p_{\text{нагр}}$):

$$\sum p = p_{\text{окр}} + p_{\text{нагр}}.$$

При $\sum p = \text{const}$ в момент включения $p_{\text{окр}} = 0$ и $\sum p = p_{\text{нагр}}$ полностью идет на нагрев. С увеличением температуры двигателя теплоотдача в окружающую среду и $p_{\text{окр}}$ возрастают, соответственно $p_{\text{нагр}}$ уменьшается. При тепловом равновесии $p_{\text{нагр}} = 0$, и тогда $\sum p = p_{\text{окр}}$. Таким образом, определенная доля потерь, выделяющихся в машине с момента ее включения, расходуется на нагрев самой машины, а остальные потери рассеиваются с поверхности в охлаждающую среду. По мере нагрева машины температура ее поверхности повышается, все большая часть тепла передается в окружающую среду и нагрев

машины замедляется. При длительной работе с неизменной нагрузкой наступает тепловое равновесие, при котором уже все выделенные внутри машины потери рассеиваются в охлаждающую среду, а нагрев машины прекращается. Такой режим называют установившимся тепловым режимом. Он характеризуется установившейся температурой машины, $T = \text{const}$. Время, за которое устанавливается тепловое равновесие, называют постоянной времени нагрева.

Двигатель имеет элементы конструкции, изготавливаемые из материалов с различной теплоемкостью. Для вычисления постоянной величины времени нагрева тела (T_B) определяется результирующая теплоемкость композиционного тела. Теплоемкость тела с удельной теплоемкостью (c) и массой (m) выражается через $C_T = mc$. Величина теплоемкости определяет теплосодержание конкретного объема элемента и соответственно влияет на скорость нарастания температуры в отдельных частях машины. Можно найти результирующее термическое сопротивление композиционного тела R_T , и тогда постоянная времени нагрева будет $T_B = R_T C_T$.

Прежде всего контролируют температуру обмоток для прогнозирования нагрева и определения перегрева, для этого потери разделяют на постоянные потери, не зависящие от изменения нагрузки, и переменные, зависящие от изменения нагрузки. Далее рассчитываются эквивалентные греющие потери – фиктивные потери в обмотке, которые вызывают такое же превышение температуры, как и реальные потери в двигателе. Данные многочисленных измерений позволяют с достаточной для практики точностью записать:

$$P_{\text{экв}} = P_{\text{обм}} + k_1 P_{\text{ст}} + k_2 P_{\text{мех}},$$

где $P_{\text{обм}}$, $P_{\text{ст}}$ и $P_{\text{мех}}$ – потери в обмотках, в стали и механические. При этом из опыта устанавливают коэффициенты: $k_1 = (0,5 \dots 0,8)$ – определяет влияние на нагрев обмотки потерь в магнитопроводе, а $k_2 = (0,05 \dots 1)$ – влияние потерь механических.

Результирующее термическое сопротивление можно найти следующим образом. Допустимый перегрев $\Theta_{\text{доп}}$ для данного класса изоляции регламентируется Госстандартом и всегда задан. При известных эквивалентных греющих потерях ($P_{\text{экв}}$) легко определить термическое сопро-

тивление из $\Theta_{\text{доп}} = R_{\text{T}} p_{\text{экв}}$. Следовательно, величина постоянной времени нагрева в стационарных режимах может быть рассчитана достаточно просто. Необходимо только рассчитать результирующую теплоемкость композиционного тела. При изменении нагрузки, частоты вращения, температуры окружающей среды изменяются и потери, которые определяют превышение температуры. Если нагрузка двигателя в течение коротких промежутков времени (сравнимых с постоянной времени нагрева) периодически изменяется, то возникает необходимость определять переходные процессы нагрева. Эти вопросы выходят за рамки учебного пособия.

Эквивалентные греющие потери, возникающие на различных этапах нагрузки, могут быть определены по паспортным данным исполнительных двигателей. Полные потери активной мощности при номинальной нагрузке:

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

Разделив их на *постоянные* p_0 и *переменные (нагрузочные)* $p_{\text{нг}}$ и введя коэффициент нагрузки $k_{\text{нг}} = P_{\text{нг}} / P_{\text{H}}$, получим:

$$\eta = (1 - p_{\text{H}}) / (k_{\text{нг}} P_{\text{H}} + p_{\text{H}}) = \left[1 - (p_0 + k_{\text{нг}}^2 p_{\text{нг}}) \right] / (k_{\text{нг}} P_{\text{H}} + p_0 + k_{\text{нг}}^2 p_{\text{нг}}).$$

В каталогах и справочниках указываются значения КПД при частичных нагрузках. Располагая этими данными, нетрудно найти КПД для любой нагрузки, построив кривую $\eta = f(k_{\text{нг}})$. Зная КПД электродвигателя для данной нагрузки, можно определить полные потери активной мощности:

$$\sum p = k_{\text{нг}} P_{\text{H}} (1 / \eta - 1).$$

Обычно постоянные p_0 – потери холостого хода, которые определяют как

$$p_0 = (\sum p - k_{\text{нг}}^2 p_{\text{H}}) / (1 - k_{\text{нг}}^2).$$

Представленные расчеты позволяют определить тепловое состояние (приблизительно) двигателя, не прибегая к сложным тепловым расчетам [17].

2.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зависимости угловой скорости от момента, $\omega = f(M)$, называют механическими характеристиками. Двигатель работает с постоянной скоростью, если момент двигателя равен приведенному к валу двигателя моменту нагрузки: $M_{\text{ДВ}} = M_{\text{НГ}}$.

Направление момента двигателя положительно при совпадении со скоростью движения. Направление момента нагрузки положительно, если противоположно скорости.

Исполнительные двигатели различают по виду механических характеристик – зависимостей угловой скорости от момента: $\omega = f(M)$.

Синхронные двигатели имеют $\omega = f(M) = \text{const}$, статизм (жесткость) характеристики: $c = d\omega/dt = 0$.

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения (в том числе асинхронные в пределах до максимального скольжения) имеют линейную зависимость. Статизм определяется как $c = (\omega_{\text{H}} - \omega_0) / M_{\text{H}} = \text{const}$.

У двигателей последовательного возбуждения (и частотно-регулируемых асинхронных) зависимость угловой скорости от момента имеет гиперболический характер, т. е. момент обратно пропорционален квадрату (примерно) угловой скорости ω :

$$M / M_{\text{H}} = \omega_{\text{H}}^2 / \omega^2 \quad \text{или} \quad \omega = \omega_{\text{H}} \sqrt{M_{\text{H}} / M}.$$

Тогда статизм характеристики

$$c = d\omega / dM = (\omega_{\text{H}} / M_{\text{H}}) 0,5 (M_{\text{H}} \sqrt{M_{\text{H}}}) / (M \sqrt{M})$$

зависит от нагрузки (до 50 %) [9].

Механическая мощность равна произведению момента вращения на угловую скорость. Она в точности равна преобразуемой электромеханической мощности [3].

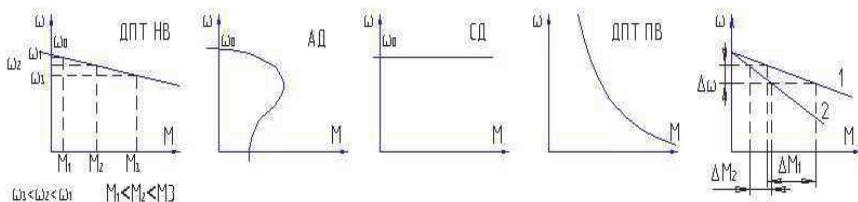
Обозначения на приведенных графиках:

ДПТ НВ – двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения;

АД – асинхронные двигатели;

СД – синхронные двигатели;

ДПТ ПВ – двигатели постоянного тока последовательного возбуждения.



Графики (качественные) механических характеристик и понятие жесткости

Жесткость механической характеристики в геометрическом смысле – это наклон механической характеристики двигателя. Графики механических характеристик показывают, что скорость двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения линейно уменьшается при возрастании момента, так как проявляется влияние падения напряжения в обмотке якоря. В асинхронных двигателях на участке до критического скольжения изменение скорости аналогично двигателям постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Синхронные двигатели имеют характеристику, где скорость не зависит от момента, а характеристика двигателей постоянного тока последовательного возбуждения близка к гиперболе из-за действия магнитного поля возбуждения, создаваемого током обмотки якоря. Поэтому эти двигатели нельзя включать без нагрузки.

Г Л А В А 3

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В этой главе рассмотрены основные положения электрических двигателей общепромышленного применения и включены вопросы, недостаточно подробно описанные в доступной литературе. Уточняются принципы действия, особенности конструктивного исполнения, свойства и характеристики различных типов используемых двигателей. Краткий обзор особых требований к исполнительным двигателям: низкие значения номинальной угловой скорости при повышенных значениях вращающего момента; возможность реверса; способность длительной работы в непрерывных динамических режимах; высокие удельные показатели; совместимость с автономными источниками питания; бесконтактность (при работе в агрессивных средах); длительный срок службы и невысокая стоимость.

В мире ежегодно выпускается примерно семь миллиардов электродвигателей. В основном это двигатели переменного тока, которые потребляют около 70 % общего количества произведенной электроэнергии. Поэтому в настоящее время первостепенное значение наряду с задачами оптимального конструирования асинхронных, синхронных двигателей и их разновидностей приобретает задача оптимального моделирования электроприводов переменного тока, которое поможет оптимизировать конструкцию электромеханических преобразователей [4].

В современном мире вопросам энергоэффективности уделяется особое внимание. Объясняется это отчасти тем, что решение данной задачи может привести к достижению основных целей международной энергетической политики: повышению энергетической безопасности; снижению вредного экологического воздействия при использовании энергоресурсов; повышению конкурентоспособности промышленности в целом.

По данным РАО «ЕЭС России», около 46 % вырабатываемой электроэнергии в России потребляется промышленными предприятиями.

Половина этой энергии посредством электродвигателей преобразуется в механическую энергию. В процессе преобразования энергии часть ее теряется в виде тепла. Величина потерянной энергии определяется энергетическими показателями двигателя. Применение энергоэффективных электродвигателей позволяет существенно снизить потребление энергии и уменьшить содержание углекислого газа в окружающей среде. Известно, что с ростом энергоэффективности увеличивается и срок службы двигателя, так как потери снижаются.

Способы повышения энергоэффективности двигателя связаны с применением электротехнических сталей с улучшенными магнитными свойствами и уменьшенными магнитными потерями; использованием дополнительных технологических операций (например, отжиг для восстановления магнитных характеристик сталей, как правило, ухудшающихся после механообработки); применением изоляции с повышенной теплопроводностью и электрической прочностью и улучшением аэродинамических свойств вентиляционных систем; увеличением точности обработки и изготовления узлов и деталей двигателя и использованием высококачественных подшипников. Естественно, применение двигателей совместно с частотными преобразователями, системами регулирования, управления и защиты также повышает энергоэффективность двигателей [14].

3.1. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Наибольшее распространение имеют трехфазные асинхронные двигатели. Широкое применение асинхронного короткозамкнутого двигателя обусловлено его свойствами: высокие надежность и срок службы, меньшая стоимость, простота изготовления и эксплуатации в сочетании с высокими регулировочными и динамическими показателями превращают асинхронный частотно-регулируемый электропривод в доминирующий тип регулируемого электропривода, массовое применение которого позволит решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

3.1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Действие асинхронного двигателя представляется в следующем виде:

- Обмотка статора подключается, например, к трехфазной сети и создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения $n_1 = \frac{f_1}{p}$,

где f_1 – частота тока в обмотке;

- если обмотка ротора замкнута, то магнитное поле, созданное обмоткой статора, наводит в обмотке движущегося ротора ЭДС с частотой f_2 , вызывающей ток в проводящих контурах ротора частоты f_2 и собственное магнитное поле ротора, которое будет вращаться относительно ротора с частотой $n'_2 = \frac{f_2}{p}$, при многофазной обмотке ротора.

Если ротор неподвижен (следовательно, $n_2 = 0$), то $f_2 = f_1$ и

$$n'_2 = n_1 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p};$$

- при взаимодействии полей обмоток создаются результирующее магнитное поле и электромагнитный момент, под действием которого ротор движется в сторону вращения поля статора. Поля взаимодействуют всегда, когда они неподвижны относительно друг друга. Так как $n_2 \neq 0$, то поле ротора всегда вращается относительно ротора с частотой n'_2 и суммарная частота вращения магнитного поля в пространстве, равная $n_2 + n'_2 = n_1$, остается неизменной и называется *синхронной* частотой;

- следовательно, частота тока в обмотке ротора зависит от частоты вращения ротора, $n_2 = n_1 - n'_2$ и $n'_2 = n_1 - n_2$. Для связи частот вращения магнитного поля и ротора вводится понятие относительной частоты вращения $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, называемой скольжением. В результате по-

лучают простые соотношения: для частот вращения полей $n'_2 = n_1 s$ и для частот токов в обмотках $f_2 = f_1 s$. При достижении частоты вращения ротора, равной синхронной частоте, ток в роторе будет равен

нулю, электромагнитный момент не образуется, т. е. преобразование энергии становится невозможным, поэтому такая электрическая машина названа *асинхронной* [6, 15].

3.1.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

В асинхронных машинах обмотка статора создает вращающееся (бегущее) магнитное поле (возбуждения), частота вращения поля всегда синхронная – $n_1 = f_1 / p$, зависит только от частоты тока в обмотке статора и числа пар полюсов. При этом угловая синхронная скорость равна $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 / p = 2\pi \cdot n_1$. Обмотка ротора (КЗ, или фазная) должна быть всегда замкнута, в ней наводится ЭДС и создается ток в обмотке ротора (во вторичной цепи) с частотой f_2 и соответственно вращающееся (бегущее) магнитное поле, частота вращения которого относительно ротора (обмотки ротора) $n'_2 = f_2 / p$.

Если частота вращения ротора $n_2 = 0$, то $f_2 = f_1$, поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга, следовательно, взаимодействуют, создавая электромагнитный момент, под действием которого ротор приводится во вращение с частотой вращения n_2 (угловой скоростью $\omega_2 = 2\pi n_2$). Для описания взаимодействия полей вводится скольжение – относительная разность угловых скоростей магнитного поля и ротора:

$$s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1.$$

При $\omega_2 = 2\pi n_2 \neq 0$ и $\omega'_2 = 2\pi \cdot f_2 / p = 2\pi n'_2$, и всегда справедливо равенство

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega'_2,$$

т. е. угловая скорость вращения ротора плюс угловая скорость вращения магнитного поля, созданного обмоткой ротора, относительно вращающегося ротора равны угловой скорости вращения магнитного поля – синхронной скорости.

При равенстве скоростей вращения ротора и магнитного поля статора ($s = 0$) ЭДС и ток в обмотке ротора равны нулю, электромагнитный момент отсутствует, и ротор вновь начинает отставать от магнит-

ного поля статора. Ротор и магнитное поле вращаются несинхронно, а двигатель – асинхронный.

Возможны следующие режимы работы асинхронных (индукционных) машин:

1) при $s = 1$, $n_2 = 0$, $f_1 = f_2$, $\omega_2 = 0$ – короткое замыкание или режим пуска;

2) при $s = 0$, $n_2 = 0$, f_1, ω_2 – синхронная скорость, а $f_2 = 0$ – идеальный холостой ход создается искусственно, – реально он невозможен для асинхронных (индукционных) двигателей. Реальный холостой ход в отсутствие нагрузки при $s \neq 0$ ($s \approx 0,005$), $n_2 \approx 0,995n_1$, $f_2 = sf_1$; $\omega_2 \approx 0,995\omega_1$;

3) при $0 < s < 1$, $n_2 = n_1(1 - s)$, $\omega_2 = \omega_1(1 - s)$, $f_2 = sf_1$ – режим двигателя, ротор вращается в направлении вращения магнитного поля со скоростью (угловой) меньше синхронной;

4) при $-\infty < s < 0$, $n_2 > n_1$, $\omega_2 > \omega_1$, $f_2 = sf_1$ – режим генератора, ротор вращается в направлении вращения магнитного поля со скоростью (угловой) больше синхронной;

5) при $s > 1$, $n_2 < 0$, $\omega_2 < 0$, $f_2 = sf_1$ – режим электромагнитного тормоза, ротор вращается противоположно направлению вращения магнитного поля.

Режимы работы асинхронных машин полностью представляются зависимостью электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$, подробно описанной в учебниках по электрическим машинам [3, 6, 15].

3.1.3. ЭНЕРГЕТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Распределение потока энергии в асинхронных двигателях изучают с помощью энергетической диаграммы, представленной ниже.

Потребляемая мощность асинхронного исполнительного двигателя от источника питания всегда определяется следующим образом:

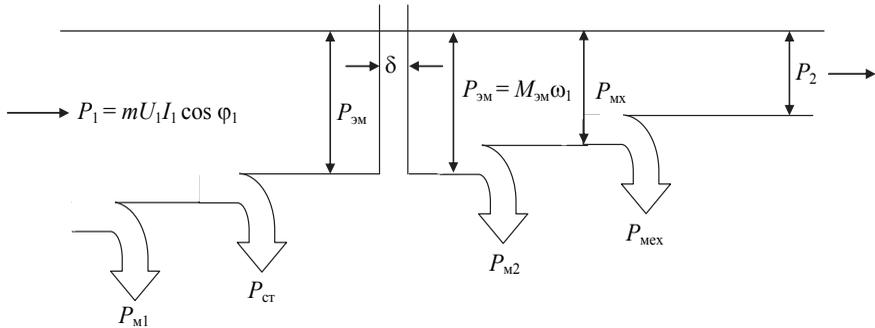
$$P_1 = mU_1 I_1 \cos \varphi.$$

Электрические потери – переменные и зависят от нагрузки:

- *в обмотке статора:* $P_{m1} = mI_1^2 R_1$. Как правило, параметры обмотки статора известны. Эти потери можно также определить по массе

и плотности тока $P_{M1} = 2,42 j_1^2 G$; G – масса, кг; j – плотность тока в проводниках обмотки статора, A/m^2 ;

- в обмотке ротора: $P_{M2} = m(I_2')^2 R_2'$, если известны параметры схемы замещения обмотки ротора. Однако потери в обмотке ротора вычисляются через электромагнитную мощность в определенной последовательности.



Энергетическая диаграмма

Для расчета электромагнитной мощности необходимо найти потери в обмотке статора и потери в стали магнитной цепи и вычесть из потребляемой мощности:

$$P_1 - (P_{M1} + P_{ст}) = P_{эм}.$$

Электромагнитная мощность пропорциональна нагрузке и зависит, естественно, от скольжения. Произведение электромагнитной мощности на скольжение есть потери в обмотке ротора при данной нагрузке: $P_{эм}s = P_{M2}$.

Потери в стали статора. Потери в магнитной части связаны с перемагничиванием стали с частотой тока и наведением вихревых токов в элементах конструкции магнитной части. Эти потери зависят от величины индукции и частоты. Для расчетов потерь определяют для каждой марки стали удельные потери на килограмм массы при индукции в одну тесла и частоте 50 Гц:

$$P_{ст} = p_{уд} B^2 G.$$

Потери в стали постоянны при неизменных величинах напряжения и частоты и не зависят от нагрузки.

Механические потери – это затраты энергии на преодоление сил трения и вентиляцию, зависят в основном от квадрата скорости вращения – $P_{\text{мх}} \equiv n^2$. Определяются экспериментально или по приближенным формулам.

Для конкретного режима работы можно рассчитать механические потери в такой последовательности. При известном коэффициенте полезного действия $P_2 = P_1 \eta$ потери в стали ротора практически отсутствуют, так как частота вращения ротора близка к частоте вращения магнитного поля, $P_{\text{стр}} \approx 0$.

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}}(1 - s) - P_2.$$

Здесь P_2 – полезная механическая мощность.

Распределение и соотношение мощностей (энергий) наглядно показывает энергетическая диаграмма. Легко установить связь мощностей с электромагнитным моментом. Электромагнитную мощность определяют как произведение электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$ на синхронную угловую скорость ω_1 :

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_1.$$

Соответственно

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{м1}} + P_{\text{ст}}) = M_{\text{эм}} \omega_1.$$

Так как полная механическая мощность $P_{\text{мх}} = M_{\text{эм}} \omega_2$, то электромагнитная мощность может быть определена как

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх}} + P_{\text{м2}}, \text{ или } M_{\text{эм}} \omega_1 = M_{\text{эм}} \omega_2 + P_{\text{м2}}.$$

Откуда $P_{\text{м2}} = M_{\text{эм}}(\omega_1 - \omega_2)$ и при $M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \omega_1$ электрические потери в цепи ротора:

$$P_{\text{м2}} = P_{\text{эм}} s.$$

Электрические потери в цепи ротора можно представить также как

$$P_{\text{м2}} = P_{\text{эм}} s = M_{\text{эм}} \omega_1 s = m_2 I_2 E_{2s} \cos \varphi_2;$$

ЭДС в цепи определяется из соотношения

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 K_{02} \Phi_m$$

и электромагнитный момент в соответствии с величинами в цепи ротора

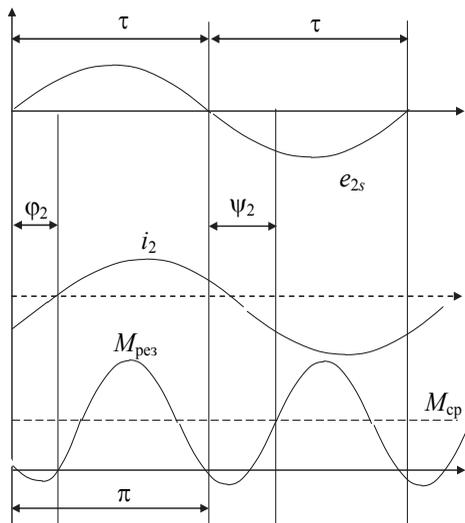
$$M_{эм} = \frac{m_2}{\omega_1 s} 4,44 f_1 s w_2 K_{02} \Phi_m I_2 \cos \varphi_2.$$

Здесь m_2 – число фаз; K_{02} – обмоточный коэффициент; I_2 – ток в фазе и φ_2 – угол сдвига по фазе между ЭДС и током. Известно, что

$$\omega_1 = 2\pi f_1; \quad 4,44 = \sqrt{2} \cdot \pi.$$

Электромагнитный момент равен произведению максимального значения магнитного потока на активную составляющую тока в цепи ротора при постоянных конструктивных параметрах обмотки ротора.

Угол сдвига по фазе между ЭДС и током в цепи ротора зависит от характера цепи ротора. В естественном состоянии характер цепи ротора активно-индуктивный.



Пространственные распределения ЭДС, тока и момента

Вывод значения электромагнитного момента позволяет утверждать, что $M = KI_2E_2 \cos j_2$, где K – постоянный коэффициент, определяемый параметрами цепи (обмотки). Так как электродвижущая сила пропорциональна индукции результирующего вращающегося поля $E_{2s} \equiv B_{рез}$, то на дуге $\pi - \varphi_2$ вращающий момент соответствует режиму двигателя, на дуге φ_2 возникает тормозной момент, а при $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ средний вращающий момент равен нулю: $M_{cp} = 0$.

На рисунке представлены пространственные распределения ЭДС и тока в цепи ротора и образование электромагнитного момента на полюсном делении [17].

Среднее значение электромагнитного момента зависит от величины реактивного сопротивления цепи ротора и уравнивается моментом нагрузки.

3.2. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронная машина, включенная в сеть, переходит в двигательный режим при создании тормозного механического момента на валу. За счет потребления активной мощности в машине образуется вращающий электромагнитный момент, и двигатель сохраняет постоянную частоту вращения ротора. Синхронные двигатели рассчитывают для работы в режимах перевозбуждения с опережающим номинальным коэффициентом мощности, при конкретной статической перегружаемости. В данный раздел включены в основном вопросы, недостаточно подробно изложенные в доступной литературе [3, 15].

3.2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Последовательность действий, определяющих работу синхронного двигателя, можно представить в следующем виде.

1. Магнитное поле возбуждения создается индуктором, оно всегда неподвижно относительно индуктора. Как правило, индуктор располагается на вращающейся части двигателя – роторе.

2. При подключении обмотки статора (якоря) к многофазной сети ток обмотки с частотой f_1 создает вращающееся магнитное поле с ча-

стотой вращения $n_1 = \frac{f_1}{p}$. При неподвижном индукторе (роторе) $n_2 = 0$ магнитное поле возбуждения также неподвижно, поля статора и ротора перемещаются относительно друг друга и поэтому не взаимодействуют, следовательно, электромагнитный момент равен нулю, $M_{эм} = 0$. Синхронный двигатель не имеет собственного пускового момента. Режим двигателя обеспечивается созданием условий для сохранения неподвижности полей статора и ротора (индуктора и якоря). Используется асинхронный или частотный способ пуска.

3. Но если частота вращения ротора (индуктора) искусственно достигнет частоты вращения магнитного поля якоря $n_1 = \frac{f_1}{p}$, то поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга, при взаимодействии полей возникнет электромагнитный момент, пропорциональный ЭДС, создаваемой полем возбуждения в обмотке статора, и току в обмотке статора (якоря). Физически момент обеспечивается притяжением полюсов якоря и индуктора (статора и ротора).

4. В синхронном двигателе поле возбуждения необходимо перемещать относительно неподвижных контуров статора (обмоток) или обеспечить перемещение контуров (проводников, обмоток) в магнитном поле возбуждения. Тогда в обмотке статора наводится ЭДС с частотой $f_1 = n_2 p$. Магнитное поле вращается с частотой $n_1 = \frac{f_1}{p} = \frac{n_2 p}{p} = n_2$ – частоты вращения ротора и магнитного поля равны, двигатель – синхронный.

3.2.2. РАБОТА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Двигатель работает с сетью большой мощности, поэтому активную потребляемую мощность синхронных двигателей определяет механический момент нагрузки. Следовательно, активная составляющая тока в обмотке статора (якоря) зависит от механической мощности и только ею регулируется. Реактивная мощность и ее характер изменяются регулированием тока возбуждения. При этом активная мощность (активный ток) не изменяется. Если сеть сохраняет величину напряжения и

частоту (U и $f - \text{const}$) неизменными, то зависимость тока якоря I_1 от тока возбуждения I_B представляется U -образной характеристикой. Характеристика определяется при постоянной электромагнитной мощности ($P_{\text{эм}} - \text{const}$). По U -образным характеристикам, определенным при разных электромагнитных мощностях, получают зависимость тока возбуждения I_B от тока якоря $I_B = f(I_1)$, которую называют регулировочной характеристикой.

Величина ЭДС, наводимая в обмотке якоря (статора), зависит от частоты вращения индуктора (ротора) n_2 и максимальной величины магнитного потока индуктора (от тока возбуждения). Мгновенное значение ЭДС всегда равно $e = -d\psi/dt$. Действующее значение ЭДС в фазе обмотки при перемещении индуктора как в синхронном двигателе, так и в синхронном генераторе, будет

$$E = 4,44 f_B W_{\text{эф}} \Phi_m ,$$

где коэффициент, приводящий мгновенное (максимальное) значение ЭДС к действующему значению, равен $4,44 = \sqrt{2} \cdot \pi$; $f_B = p n_2$ – частота ЭДС, созданная вращающимся полем индуктора; $W_{\text{эф}}$ – эффективное число витков обмотки статора; Φ_m – максимальное значение магнитного потока, сцепленного с фазой обмотки.

В синхронном двигателе основное взаимодействие связано с магнитным полем возбуждения и полем реакции якоря. Поле реакции якоря создается током обмотки статора, взаимодействует с магнитным полем возбуждения, в результате чего образуется результирующее магнитное поле синхронного двигателя. Кроме того, существуют поля рассеяния обмотки статора. Действия магнитных полей учитывают с помощью индуктивных сопротивлений.

Синхронные двигатели обычно неявнополюсной конструкции, что позволяет учитывать взаимодействие полей с помощью синхронного индуктивного сопротивления $X_{\text{син}}$. Пространственная ориентация магнитных полей связана с линиями симметрии индуктора. Соответственно поле возбуждения с осью полюса – продольной осью d , а поле реакции якоря с линией симметрии между полюсами – поперечной осью q .

Такая ориентация магнитных полей позволяет установить угол между осями магнитных полей возбуждения и результирующего маг-

нитного поля. Этот угол зависит от нагрузки двигателя и назван углом нагрузки θ . Электромагнитная мощность может быть представлена как функция угла нагрузки θ :

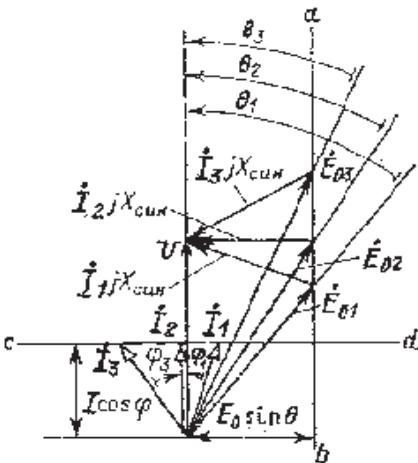
$$P_{эм} = mU_1 E_B \sin\theta / X_c,$$

где U_1 – напряжение сети; E_B – ЭДС, созданная потоком возбуждения.

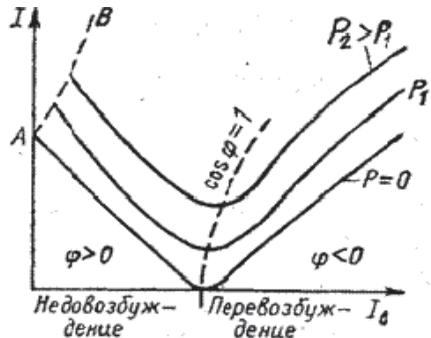
Влияние изменения нагрузки и магнитного поля возбуждения на процессы в синхронном двигателе наглядно показывают векторные диаграммы и графики зависимостей тока обмотки статора (тока якоря) I_1 от тока возбуждения I_B , при постоянной нагрузке.

Двигатель работает с источником большой мощности, напряжение U которого неизменно и изображено на векторной диаграмме вектором, совпадающим с осью ординат. Величина нагрузки задается активной составляющей тока якоря на уровне линии cd , параллельной оси абсцисс. Ток обмотки якоря создает магнитное поле реакции якоря, которое наводит в обмотке статора ЭДС – E_a .

Магнитное поле реакции якоря, взаимодействуя с полем возбуждения, образует результирующее магнитное поле, которое наводит в обмотке статора ЭДС – E_0 .



Векторная диаграмма



U-образные характеристики

Проекция ЭДС E_0 на ось абсцисс равна $E_0 \sin \theta$, при данной нагрузке ограничивается линией ab . Геометрическая сумма ЭДС E_0 и E_a с учетом падения напряжения на индуктивном сопротивлении обмотки якоря равна напряжению сети. В синхронных двигателях ЭДС в обмотке статора представляют как падение напряжения на индуктивных сопротивлениях реакции якоря x_a и рассеяния x_s . Сумму индуктивного сопротивления реакции якоря с индуктивным сопротивлением рассеяния x_s обмотки якоря называют синхронным индуктивным сопротивлением $X_{\text{син}} = (x_a + x_s)$.

Такое представление позволяет записать для цепи статора уравнение в виде $U_1 = E_0 + jX_{\text{син}} I_1$. Векторная диаграмма построена в соответствии с данным уравнением при различных токах возбуждения, определяющих характер цепи статора.

Влияние изменения магнитного поля возбуждения на величину реактивного тока якоря определяется видом U -образных характеристик. Зависимость определяется при неизменной частоте и неизменном напряжении сети и показывает соотношение магнитных полей обмотки якоря (статора) и возбуждения для обеспечения равенства напряжения сети U_c и напряжения на зажимах синхронного двигателя, созданного собственными полями (U_1).

Напряжение на зажимах синхронного двигателя (U_1) определяется как векторная сумма ЭДС, созданных полем возбуждения и полями реакции якоря и вектором падения напряжения на собственном (активно-индуктивном) сопротивлении обмотки якоря.

Когда $U_1 = U_c$, магнитное поле возбуждения нормально, т. е. ток возбуждения I_b достаточен для обеспечения равенства напряжений, или говорят ток возбуждения нормальный $- I_{b, \text{норм}}$. При этом ток якоря (I_1) минимален, так как имеет только активную составляющую, а коэффициент мощности равен единице. При уменьшении тока возбуждения магнитное поле возбуждения не может обеспечить равенства напряжений, т. е. $U_1 < U_c$, и, следовательно, в токе I_1 появляется реактивная составляющая I_p , которая создает дополнительное магнитное поле, усиливающее поле возбуждения. При увеличении тока возбуждения поле возбуждения становится избыточным, т. е. $U_1 > U_c$, и, сле-

довательно, в токе I_1 появляется составляющая I_p , которая создает дополнительное магнитное поле, уменьшающее поле возбуждения. В результате:

1) $U_1 = U_c$, ток возбуждения $I_{в.норм}$ – нормальный, СД – нормально возбужден, ток якоря чисто активный, $\cos \varphi = 1$, СД потребляет из сети только активную мощность;

2) $U_1 < U_c$, ток возбуждения $I_{в} < I_{в.норм}$, СД – недо возбужден, в токе I_1 появляется составляющая I_p , которая создает дополнительное магнитное поле, усиливающее поле возбуждения, $\cos \varphi < 1$, СД потребляет из сети активную и реактивную мощность;

3) $U_1 > U_c$, ток возбуждения $I_{в} > I_{в.норм}$, СД – перевозбужден, в токе I_1 появляется составляющая I_p , которая создает дополнительное магнитное поле, ослабляющее поле возбуждения, $\cos \varphi < 1$, СД потребляет из сети активную и отдает в сеть реактивную мощность;

4) максимальная, или предельная, мощность синхронного двигателя зависит от приложенного к обмотке статора напряжения (сети) и от ЭДС, созданной в обмотке магнитным полем возбуждения.

3.2.3. ЭНЕРГЕТИКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Потребляемая из сети активная электрическая мощность

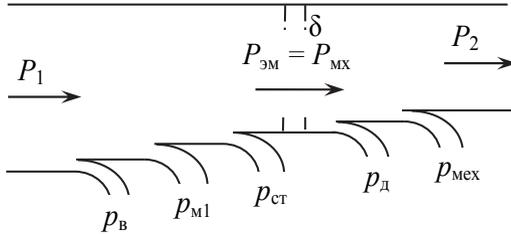
$$P_1 = mI_1U_1 \cos \varphi,$$

где φ – угол между фазным напряжением и фазным током. Потери в обмотке и стали статора определяются аналогично индукционным двигателям. Следовательно, электромагнитная мощность равна $P_{эм} = P_1 - (p_{м1} + p_{ст})$. Часть этой мощности $p_{в}$ расходуется на возбуждение машины статическими системами возбуждения, а также рассеивается в виде электрических потерь $p_{м1}$ в обмотке якоря и магнитных потерь $p_{ст}$ в магнитопроводе якоря. Подробнее показано в энергетической диаграмме.

Электромагнитная мощность передается через зазор вращающимся магнитным полем на ротор в виде полной механической мощности. Естественно, что полная механическая мощность равна электромагнитной мощности: $P_{мх} = P_{эм}$. Из этой мощности компенсируются

механические $p_{\text{мех}}$ и добавочные $p_{\text{д}}$ потери мощности в роторе и формируется полезная механическая мощность:

$$P_{\text{мх}} = P_2 + p_{\text{д}} + p_{\text{мех}} \cdot$$



Энергетическая диаграмма синхронного двигателя

Так как $P_{\text{мх}} = P_{\text{эм}} = \omega M_{\text{эм}}$, то справедливо соотношение $M_{\text{эм}} = P_2 / \omega + (p_{\text{д}} + p_{\text{мех}}) / \omega$, или $M_{\text{эм}} = M_2 + M_{\text{стат}}$ – уравнение моментов.

Полезная механическая мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_{\text{мх}} - (p_{\text{д}} + p_{\text{мех}})$$

или, подставив выражение электромагнитной мощности,

$$P_2 = P_1 - \Sigma p,$$

где $\Sigma p = p_{\text{в}} + p_{\text{м1}} + p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}}$ – полные потери мощности в двигателе.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma p) / P_1 = 1 - \Sigma p / P_1.$$

3.2.4. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочими характеристиками двигателя называют зависимости потребляемой мощности P_1 , тока якоря I , полезного момента на валу M_2 , частоты вращения ротора n , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД η от полезной мощности на валу P_2 при постоянных токе возбуждения $I_{\text{в}}$, напряжении $U_{\text{с}}$ и частоте $f_{\text{с}}$ сети.

Частота вращения ротора неизменна при нагрузке двигателя до предела статической устойчивости, и зависимость $n = f(P_2)$ представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс.

Полезный момент на валу:

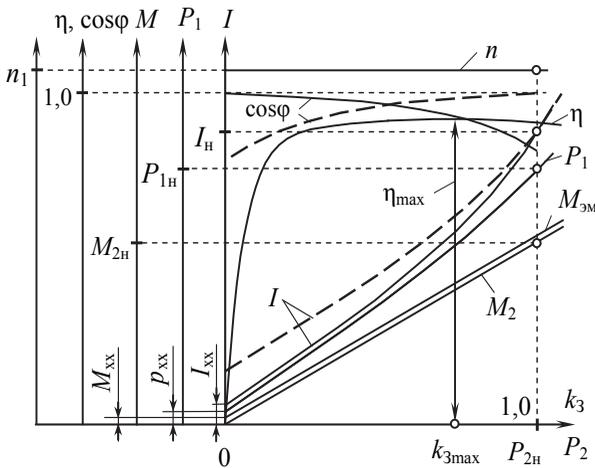
$$M_2 = P_2 / \omega = P_2 / 2\pi \cdot n,$$

при $\omega = 2\pi$, $n = \text{const}$ полезный момент линейно зависит от мощности P_2 .

Электромагнитный момент с учетом потерь на возбуждение, отнесенных к ротору:

$$M_{\text{эм}} = P_2 / \omega + (p_{\text{д}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{в}}) / \omega, \text{ или } M_{\text{эм}} = M_2 + M_{\text{стат}},$$

где $M_{\text{стат}}$ – момент холостого хода.



Рабочие характеристики двигателя

Если принять добавочные потери $p_1 = 0$ и учесть постоянство потерь на возбуждение $p_{\text{в}}$ и механических потерь $p_{\text{мех}}$, то момент холостого хода постоянен $M_{\text{стат}} = \text{const}$. Электромагнитный момент $M_{\text{эм}} = f(P_2)$ повторяет график полезного момента M_2 , смещенный вверх на величину $M_{\text{стат}}$.

В режиме холостого хода потребляемая двигателем из сети активная мощность P_1 практически равна постоянным потерям p_{xx} , так как электрические потери в обмотке якоря $p_{M1} \equiv I^2$ незначительны вследствие малого тока холостого хода I_{xx} .

Ток возбуждения отрегулирован так, что в режиме холостого хода ток I_{xx} активный и коэффициент мощности $\cos \varphi = 1,0$. При неизменных U_c, I_B и допущениях, что $(-\dot{E}_0 = -U = U_c)$, магнитодвижущие силы (намагничивающие) результирующего магнитного поля F_0 и поля возбуждения F_B неизменны.

С увеличением нагрузки растет угол θ и МДС якоря изменяются по величине и фазе (см. рисунок), так как конец вектора $F_{ав}$ перемещается по дуге окружности радиусом $F_B = \text{const}$. Вектор тока якоря I поворачивается вслед за вектором $F_{ав}$. Угол φ увеличивается с нагрузкой двигателя, а коэффициент мощности уменьшается. Ток якоря отстает от напряжения сети, и двигатель работает с отстающим $\cos \varphi$, потребляя из сети реактивную мощность. Если ток возбуждения отрегулировать так, что $\cos \varphi = 1,0$ при номинальной нагрузке ($P_2 = P_{2н}$), то при уменьшении нагрузки угол θ уменьшается. При уменьшении угла θ векторы МДС $F_{ав}$ и тока якоря I поворачиваются против часовой стрелки (см. рисунок). Угол φ увеличивается при уменьшении нагрузки двигателя, а коэффициент мощности уменьшается. Ток якоря опережает напряжение сети, и двигатель работает с опережающим $\cos \varphi$, отдавая в сеть реактивную мощность. Из-за реактивной составляющей ток холостого хода будет больше, чем в предыдущем случае ($\cos \varphi = 1,0$ при $P_2 = 0$). В общем случае характер изменения коэффициента мощности зависит от возбуждения двигателя.

С увеличением P_2 потребляемая активная мощность P_1 сначала растет практически линейно. В дальнейшем зависимость $P_1 = f(P_2)$ отклоняется от линейной вследствие более быстрого по сравнению с P_2 роста электрических потерь в обмотке якоря, пропорциональных I^2 или P_2^2 .

Ток якоря I при малых θ и φ практически линейно зависит от P_2 . Ток I возрастет в большей степени, чем P_2 , вследствие нелинейной

зависимости $P_1 = f(P_2)$ и увеличения реактивной составляющей тока в случае работы с $\cos \varphi = 1,0$ при $P_2 = 0$.

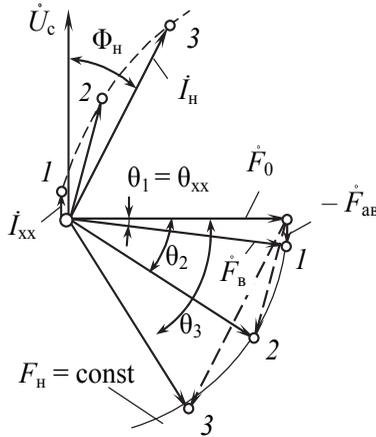


Рисунок к объяснению рабочих характеристик двигателя

Зависимость $\eta = f(P_2)$ такая же, как и в генераторном режиме. Синхронные двигатели проектируют так, чтобы КПД достигал максимума η_{\max} при значениях коэффициента загрузки $k_{3\max} = 0,6 \dots 1,0$.

Общий вывод. Электромагнитный момент синхронных двигателей практически линейно зависит от напряжения сети. Поэтому они менее чувствительны (более устойчивы) к снижению напряжения сети, чем асинхронные, электромагнитный момент которых пропорционален квадрату напряжения. Кроме того, статическую устойчивость двигателя при значительном снижении напряжения можно кратковременно повысить увеличением тока возбуждения. Направление реактивной мощности в синхронном двигателе определяется током возбуждения. Физические процессы, связанные только с изменением тока возбуждения, одинаковы в двигателях и генераторах [3, 6, 10, 15].

3.3. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип обратимости электрических машин просто усвоить на примере машины постоянного тока. В исходном состоянии машина постоянного тока включена в сеть с постоянным напряжением U . В генераторном режиме ЭДС машины больше напряжения сети ($E > U$), ток якоря поступает в сеть. На валу машины действует электромагнитный момент $M_{эм}$, направленный против вращающего механического момента $M_{мх}$. При снижении тока возбуждения I_B уменьшается поток Φ и ЭДС машины E , а следовательно, и ток в якоре. При значении ЭДС $E = U$ ток генератора и электромагнитный момент обратятся в нуль. При дальнейшем понижении ЭДС машины вновь появится разность величин E и U , и, так как $E < U$, то с противоположным знаком. В этом случае ток якоря $I_я$ изменит направление – из сети в машину. Поскольку направление тока I_B в обмотке возбуждения и полярность основных полюсов останутся прежними, то изменится знак электромагнитного момента $M_{эм}$. Электромагнитный момент становится вращающим, преодолевая механический момент сопротивления на валу $M_{мх}$ и преобразовывая подводимую к МПТ электрическую мощность в механическую. Но при этом якорь продолжает вращаться в прежнем направлении. Таким же образом поведет себя машина, если оставляя ток возбуждения неизменным, уменьшать частоту вращения якоря. Отсоединив первичный двигатель, получим нормальную схему двигателя параллельного возбуждения. Обратными действиями можно также плавно перевести машину из двигательного режима в генераторный режим.

3.3.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Поле возбуждения создается постоянным током (или магнитами) и всегда неподвижно относительно индуктора (статора). При перемещении якоря (проводников, обмоток) в магнитном поле возбуждения наводится ЭДС в обмотке якоря, электрически соединенной с коллектором. Электродвижущая сила в обмотке якоря пропорциональна частоте вращения якоря и магнитному потоку полюсного деления при постоянстве параметров обмотки якоря:

$$E = p / a N n_2 \Phi ,$$

n_2 – частота вращения якоря; Φ – магнитный поток полюсного деления; параметры обмотки; p – число пар полюсов; a – число параллельных ветвей; N – число проводников – образуют постоянный коэффициент $C_E = p / aN$. Соответственно, $E = C_E n_2 \Phi$. В машинах постоянного тока коллектор является электромеханическим преобразователем частоты.

Некоторые утверждения к принципу действия двигателя постоянного тока

1. Магнитное поле возбуждения неподвижно относительно индуктора.

2. При подключении обмотки якоря к источнику электрической энергии через коллектор в обмотке якоря появится ток, при взаимодействии которого с магнитным полем возбуждения образуется электромагнитный момент, пропорциональный магнитному потоку полюсного деления и току в обмотке якоря $M = C_M \Phi I_{\text{я}}$. Постоянная $C_M = C_E / 2\pi = (p / 2\pi a)N$ также определяется параметрами обмотки.

3. Поскольку поля якоря и возбуждения взаимодействуют только тогда, когда они неподвижны, направление вращения поля, созданного обмоткой якоря, противоположно вращению самого якоря. Если n_2 – частота вращения якоря, а частота тока непосредственно в обмотке f определяется частотой вращения якоря n_2 , т. е. $n_2 p = f$, то обмотка якоря создает вращающееся магнитное поле $n'_2 = f / p$. Только в таком представлении поля неподвижны относительно друг друга.

3.3.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассматривается энергетический процесс двигателя параллельного возбуждения в установившемся режиме при $n = \text{const}$ и напряжении на зажимах двигателя U . Если P_1 – полная электрическая мощность, подводимая к двигателю из сети; $I_{\text{я}}$ – ток в якоре и $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения, то

$$P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) = UI_{\text{а}},$$

здесь $I_{\text{а}}$ – полный ток, потребляемый из сети.

Часть этой мощности тратится на покрытие потерь в цепи якоря:

$$\Sigma p_{\text{я}} = p_{\text{мя}} + p_{\text{щ}} = r_{\text{мя}} I_{\text{я}}^2 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2,$$

где $r_{\text{мя}}$ – сопротивление обмотки якоря; $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте; $R_{\text{я}}$ – суммарное сопротивление цепи якоря; в цепи возбуждения $p_{\text{в}} = UI_{\text{в}}$.

Электромагнитная мощность это произведение ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ на ток якоря $I_{\text{я}}$: $P_{\text{эм}} = E_{\text{я}}I_{\text{я}}$, преобразовывается в полную механическую мощность $P_{\text{мх}}$. Следовательно,

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх}} = E_{\text{я}}I_{\text{я}} = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) - UI_{\text{в}} - \Sigma p_{\text{я}} = UI_{\text{я}} - R_{\text{я}}I_{\text{я}}^2.$$

Полезная механическая мощность P_2 , отдаваемая двигателем, меньше мощности $P_{\text{эм}}$ на величину мощности холостого хода p_0 , необходимой для покрытия потерь в стали якоря $p_{\text{ст}}$ механических $p_{\text{мех}}$ и добавочных потерь $p_{\text{д}}$, т. е.

$$P_2 = P_{\text{эм}} - p_0 = P_{\text{мх}} - (p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}}).$$

Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения легко изображается в соответствии с представленным выше уравнением. Электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \omega,$$

который является вращающим, уравновешивает тормозящие моменты: момент M_0 , соответствующий сумме потерь ($p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}}$), покрываемых за счет механической мощности; M_2 – момент нагрузки на валу, создаваемый рабочей машиной или механизмом; $M_{\text{дин}}$ – динамический момент. При этом

$$M_2 = P_2 / \omega.$$

Уравнение моментов на валу двигателя:

$$M_{\text{эм}} = M_2 + M_0 + M_{\text{дин}}.$$

Обозначив статический момент сопротивления $M_{\text{с}} = M_2 + M_0$, получим

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}}.$$

При установившемся режиме работы $n = \text{const}$, поэтому $M_{\text{дин}} = 0$ и $M_{\text{эм}} = M_{\text{с}}$.

Обычно M_0 мал по сравнению с M_2 , и поэтому приблизительно можно считать, что в установившемся режиме работы электромагнитный момент $M_{\text{эм}} = M$ является полезным моментом на валу и уравновешивается моментом M_2 .

Момент машины ($\text{Н} \cdot \text{м}$) определяется как функция мощности P и угловой скорости вращения ω .

3.3.3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Двигатели постоянного тока независимого или параллельного возбуждения потребляют из сети активную мощность:

$$P = U_{\text{с}} I_{\text{а}} = E_{\text{а}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 \Sigma R_{\text{я}} + U_{\text{с}} I_{\text{в}},$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение сети; $I_{\text{а}}$ – ток, потребляемый из сети; $E_{\text{а}} = C_E n_2 \Phi$ – ЭДС в обмотке якоря; $I_{\text{я}}$ – ток в обмотке якоря; $\Sigma R_{\text{я}}$ – суммарное сопротивление цепи якоря (в цепь могут быть включены дополнительные обмотки или сопротивления); $I_{\text{в}}$ – ток в обмотке возбуждения; n_2 – частота вращения якоря (ротора); C_E – постоянный коэффициент обмотки якоря.

В двигателях направление действия ЭДС якоря $E_{\text{а}}$ противоположно направлению тока якоря $I_{\text{я}}$, и поэтому ЭДС называют также противоэлектродвижущей силой якоря. Напряжение для цепи якоря двигателя:

$$U_{\text{с}} = E_{\text{а}} + I_{\text{я}} \Sigma R_{\text{я}}.$$

В режиме двигателя всегда $U_{\text{с}} > E_{\text{а}}$. Тогда ток якоря

$$I_{\text{я}} = (U_{\text{с}} - E_{\text{а}}) / \Sigma R_{\text{я}},$$

где $E_{\text{а}} = C_E n_2 \Phi$ – ЭДС в обмотке якоря.

Из уравнений напряжения, $E_{\text{а}}$ и тока, решая относительно n , находим уравнение электромеханической характеристики $n = f(I_{\text{я}})$

двигателя постоянного тока независимого или параллельного возбуждения:

$$n_2 = (U_c - I_a \Sigma R_a) / C_E \Phi .$$

В результате взаимодействия тока якоря с полем возбуждения возникает электромагнитный момент

$$M = C_M \Phi I_a ,$$

где постоянный коэффициент C_M связан с параметрами обмотки якоря – $C_M = C_E / 2\pi$, $C_E = pN / a$, электромагнитный момент пропорционален произведению магнитного потока на ток – общее правило для всех электрических машин.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения потребляют из сети полный ток I_a .

Потребляемая мощность равна

$$P = U_c I_a = E_a I_a + I_a^2 \Sigma R_a .$$

Ток якоря зависит от момента:

$$I_a = I_a = M / C_M \Phi .$$

Электромеханическая характеристика $n = f(I_a)$ двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

$$n_2 = U_c / C_E \Phi - \Sigma R_a M / C_E C_M \Phi .$$

Вид механической и скоростной характеристик двигателя при неизменном напряжении зависит от того, как меняется магнитный поток машины с изменением нагрузки двигателя. Вид этих характеристик различен для двигателей с разными способами возбуждения и приводится во всех учебных пособиях и учебниках по электрическим машинам [3, 6, 10, 15].

Уравнения частоты вращения двигателей постоянного тока показывают, что частота вращения якоря прямопропорциональна напряжению, непосредственно приложенному к обмотке якоря, и обратно пропорциональна магнитному потоку.

Уравнение частоты вращения двигателей постоянного тока позволяет установить способы регулирования частоты вращения для двигателей постоянного тока.

3.3.4. ДВИГАТЕЛИ С БЕСПАЗОВЫМ И ПОЛЫМ ЯКОРЕМ

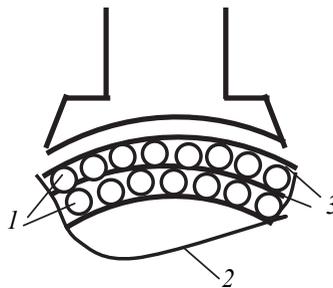
Во многих случаях к машинам постоянного тока предъявляются такие требования, которым машины нормальной конструкции, рассмотренные выше, не удовлетворяют. Это привело к созданию специальных типов машин постоянного тока.

В настоящем разделе рассмотрены лишь некоторые из них. Микро-двигатели постоянного тока, применяемые в автоматических устройствах для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение вала, называются исполнительными двигателями.

В зависимости от конструкции якоря исполнительные двигатели постоянного тока подразделяют на двигатели с якорем обычного типа, полым (печатным) и беспазовым (гладким) якорем.

Двигатели с якорем обычного типа отличаются от машин постоянного тока нормального исполнения шихтованной системой полюсов и ненасыщенной магнитной системой. Первое необходимо, поскольку эти двигатели в основном работают в переходных режимах, второе – для уменьшения влияния реакции якоря. Вместо шихтованных полюсов с обмоткой возбуждения в двигателях часто устанавливают постоянные магниты.

Для уменьшения влияния реакции якоря и ЭДС самоиндукции коммутационной секции и улучшения условий коммутации применяют двигатели с гладким якорем. Ниже представлен фрагмент такого двигателя. Обмотку 1 гладкого якоря укладывают на наружной (внешней) поверхности магнитопровода якоря 2. Ее выполняют в два слоя и заливают эпоксидной смолой с ферромагнитным наполнителем 3.



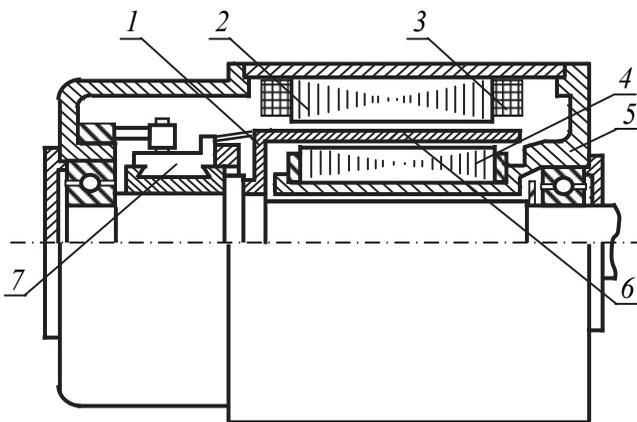
Фрагмент двигателя с гладким якорем

Микродвигатели этого типа имеют более высокое быстродействие по сравнению с машинами с зубчатым якорем из-за большей индукции

в воздушном зазоре (индукция не ограничивается насыщением зубцов) и меньшего момента инерции якоря. Уменьшение момента возможно за счет уменьшенного диаметра (при увеличенной длине). Последнее возможно, поскольку лучшие условия коммутации позволяют значительно увеличить длину и уменьшить диаметр якоря.

Значительно снижена инерция в двигателях с полым якорем. Магнитный поток в них создается обмоткой возбуждения или постоянными магнитами, якорь представляет полый стакан 1, расположенный между полюсами 2 с обмоткой возбуждения 3 и неподвижным ферромагнитным сердечником 4, который насаживают на втулку 5 подшипникового щита. Вместо сердечника внутри якоря может быть установлен неподвижный цилиндрический магнит. Обмотку якоря 6 укладывают на цилиндрический каркас и заливают эпоксидным компаундом, концы секций обмотки, как и в обычном двигателе, соединяют с пластинами коллектора 7. Обмотка может быть выполнена и фотохимическим способом (печатная обмотка). Момент инерции двигателей с полым якорем невелик, благодаря чему существенно повышается быстродействие.

Отсутствие насыщения в зубцах позволяет значительно увеличить индукцию в воздушном зазоре машины, т. е. ее магнитный поток и номинальный вращающий момент по сравнению с микродвигателями, имеющими якорь обычного типа, что также способствует повышению быстродействия двигателя.



Двигатель с полым якорем

Поскольку секции обмотки якоря окружены не ферромагнитным материалом, а воздухом, они имеют гораздо меньшую индуктивность, что существенно улучшает условия коммутации двигателя. Щетки в таких микродвигателях работают практически без искрения даже при кратковременных перегрузках, поэтому можно применять большие форсировки для ускорения переходных процессов.

Недостатком микродвигателей с полым якорем является необходимость значительного увеличения МДС обмотки возбуждения, так как немагнитный зазор у них гораздо больше, чем в обычных двигателях, что приводит к увеличению потерь в обмотке возбуждения. КПД рассматриваемых двигателей из-за отсутствия потерь мощности в стали имеет такую же величину, как и у микродвигателей с якорем обычной конструкции.

Разновидностью двигателя с полым якорем является двигатель с дисковым якорем, у которого печатная обмотка нанесена на немагнитный диск. Магнитный поток создается постоянными магнитами или электромагнитами, расположенными по одну сторону диска или с обеих сторон. В исполнительных двигателях постоянного тока обмотки якоря и главных полюсов питаются от двух независимых источников тока. Одна из них (условно называемая обмоткой возбуждения) подключена постоянно к источнику с неизменным напряжением U_B , а на другую (обмотку управления) подается напряжение управления U_y только при необходимости вращения вала двигателя. В зависимости от того, на какую обмотку подается управляющий сигнал, различают два способа управления исполнительными двигателями – якорное и полюсное.

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. При полюсном управлении меньше мощность управления, а при якорном – выходные характеристики параллельны и линейны.

Беспазовые якоря реализованы в выпускаемой промышленностью серии ПГ (серия П с гладким якорем) и серия ПГТ (серия П с гладким якорем и встроенным ТГ). Перегрузочные параметры по току λ_I и по моменту λ_M достигают величин $\lambda_I = \lambda_M = 4...5$.

Для двигателей с полым якорем требуется более мощная система возбуждения, соответственно, можно увеличить перегрузки по току λ_I и по моменту λ_M до величин $\lambda_I = 5...7$ и $\lambda_M = 10$. Выпускаются такие двигатели сериями под названием *серия ДПР*. Особенностью этой серии является низкое напряжение $U = 6, 12, 27$ В, частота вращения достигает величины $[n] = 9000$ об/мин [6, 7].

Г Л А В А 4

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

От свойств и характеристик электромеханической системы зависят производительность и качество выпускаемой продукции. Приходится выявлять необходимые характеристики и параметры, исследуя поведение рабочей машины при выполнении технологического процесса. Для более глубокого знакомства с условиями работы производственного механизма разрабатывается техническое задание, в котором учитываются все особенности технологического процесса и условия работы исполнительного механизма. В техническом задании должны найти отражение вопросы, касающиеся характера статического момента, необходимые пределы регулирования частоты вращения (скорости), плавности регулирования, стабильности скорости, допустимого ее отклонения от среднего значения, требуемого набора механических характеристик, условий пуска и торможения, характера переходных процессов и др. Система обеспечивает необходимые движения производственного механизма, управляя работой исполнительного двигателя. В настоящем учебном пособии приводятся классические подходы к управлению и регулированию частоты вращения исполнительного двигателя.

4.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Строится модель электромеханического преобразователя энергии, в которой в качестве переменных фигурируют потоки энергии, и вводится классификация режимов электромеханического преобразователя с позиции энергетики. В электромеханических системах воспроизведения движения основным элементом является исполнительный двигатель. В зависимости от свойств выбранного типа двигателя, возможностей пуска (разгона) и регулирования частоты вращения создается система управления двигателем [9].

В целом ЭМС должна обеспечить выполнение функций рабочего механизма.

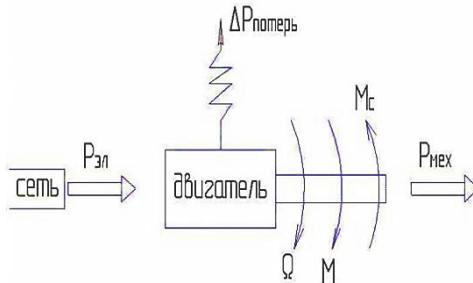


Схема рабочего механизма

На рисунке обозначено: $P_{эл}$ – потребляемая электрическая энергия; $P_{мех}$ – полезная механическая энергия; $\Delta P_{потерь}$ – энергия потерь; $P_{эл} - \Delta P_{потерь} - P_{мех} = 0$; $P_{эл} = UI$ – для двигателей постоянного тока (ДПТ); $P_{эл} = mU_{\phi} I \cos \varphi$; для двигателей переменного тока (АД), где m – число фаз (чаще всего 3).

Механическая мощность $P_{мех} = \omega M$, где M – вращающий момент. С энергетической точки зрения рассматривают работу в двигательном режиме, когда $P_{мех} > 0$, и тормозном режиме при $P_{мех} < 0$. Работа в режиме двигателя постоянного тока подробно рассмотрена в предыдущем разделе.

Тормозные режимы двигателей постоянного тока – режим рекуперативного торможения (РТ) и режим динамического торможения (ДТ).

Основным признаком режима рекуперативного торможения является возврат энергии в сеть:

$$P_{эл} - \Delta P_{потерь} = P_{мех}, \quad P_{мех} < 0 \quad \text{и} \quad P_{эл} < 0.$$

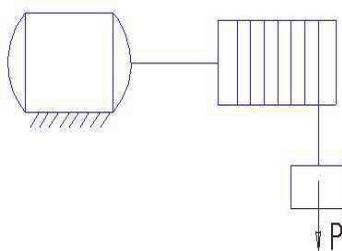
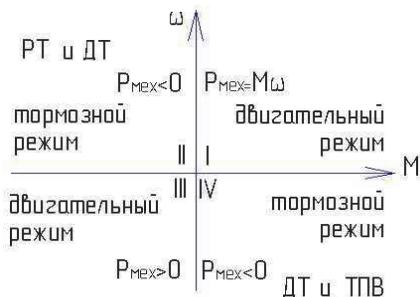
Для реализации такого режима в двигателе постоянного тока необходимо изменить знак тока или напряжения. Чаще всего изменяют знак тока, поскольку напряжение ответственно за направление вращения. Этот режим наиболее экономичен.

Основной признак режима динамического торможения – это нулевое взаимодействие с сетью $P_{эл} = 0$. $\Delta P_{потерь} = P_{мех}$. Условием реализации этого режима является $U = 0$ и $I_{я} < 0$ (изменение направления тока, иначе не будет момента). Этот режим также называют автономным или автогенераторным торможением.

Режим торможения противовключением (ТПВ) возникает, если двигатель подготовлен для вращения в одну сторону, а силами нагрузки (или по инерции) вращается в противоположном направлении:

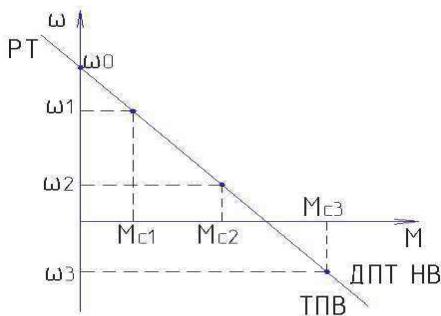
$$P_{эл} > 0, P_{мх} < 0, \omega, \Delta P_{потерь} = P_{эл} - P_{мх} \gg 0.$$

Для реверсирования асинхронного двигателя необходимо поменять местами две фазы. Это переключение можно провести почти мгновенно, путем контактного реверсора, тогда изменится направление вращения магнитного поля статора и произойдет торможение противовключением.



Интерпретация режимов торможения

Лебедка с грузом



Механическая характеристика

На рисунках ω_0 – точка идеального холостого хода.

При добавлении нагрузки уменьшается ω и увеличивается M_c ; M_{c3} и ω_3 возникают при максимальной нагрузке, при этом двигатель сначала остановится, а затем начнет вращаться в другую сторону.

4.2. ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Двигатель, будучи преобразователем энергии, рассеивает электро-энергию в электрической и магнитной частях своей конструкции, и разработчик системы вынужден ограничивать переменные, характеризующие состояние двигателя, чтобы не допустить его выхода из строя.

Номинальные режимы определяют расчетные параметры, характеризующие физические ограничения двигателя. Угловая скорость двигателя $\omega_{\text{НОМ}}$ – характеристика расчетной скорости. Используется также частота вращения $n_{\text{НОМ}}$ для определения допустимых механических нагрузок. При двух-, трехкратной скорости (частоте вращения) двигатель может выйти из строя, так как в обмотке возникают слишком большие центробежные усилия (обмотка рассчитана на допустимую частоту вращения). Механические усилия контролируются для всех вращающихся элементов.

Возможности двигателя ограничиваются током в обмотках двигателя ($I_{\text{НОМ}}$). Самое опасное для двигателя – нагревание под действием собственных потерь обмотки (достаточно сложно выводить тепло). С ростом температуры связано форсированное старение изоляции. Ток $I_{\text{НОМ}}$ – предельный ток по нагреванию для данного режима двигателя. Режимы работы определены Госстандартом и обозначаются S1–S8. Режимы различаются условиями охлаждения, и для каждого режима устанавливается свой номинальный ток.

Ограничивается также номинальный момент $M_{\text{НОМ}}$ – это момент, создаваемый двигателем при номинальном токе. Рост момента, механические усилия и токи в обмотках ограничиваются нагреванием двигателя. Обычно двигатель может вынести и десятикратный момент. Номинальная мощность $P_{\text{НОМ}} = \omega_{\text{НОМ}} M_{\text{НОМ}}$ – это механическая отдаваемая (полезная) мощность на валу исполнительного двигателя.

Эффективность преобразования энергии характеризуется номинальным КПД:

$$\eta_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / P_{\text{ПОТ}} = P_{\text{НОМ}} / (P_{\text{НОМ}} + \Delta P),$$

или

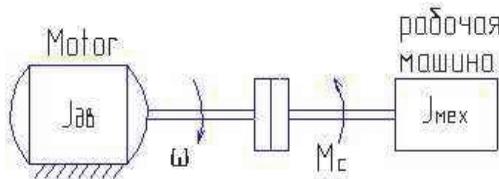
$$\eta_{\text{НОМ}} = (P_{\text{ПОТ}} - \Delta P) / P_{\text{ПОТ}} = 1 - \Delta P / P_{\text{ПОТ}} = 1 - \Delta P / (P_{\text{НОМ}} + \Delta P),$$

где $P_{\text{ПОТ}}$ – потребляемая мощность.

Для увеличения эффективности двигателя повышается рабочая температура обмотки за счет применения более теплостойкой изоляции. Установлены допустимые температуры для различных изоляционных материалов по нагревостойкости, оцениваемых классом. Классы изоляции: *A, B, H, F, C* (по возрастанию температуры), *C* – до 350 °С (керамика). Поиск путей эффективного охлаждения обмотки: различные способы охлаждения, оптимальные пути вывода тепла; создание внутри двигателя теплоемкой (водородной) среды. Принятые обозначения параметров по Госстандарту записываются следующим образом: мощность $P_{\text{ном}}$, угловая скорость ω [рад/с], частота вращения n [об/с]. Связь между ними следующая: $\omega = \pi n / 30 \approx 0,1n - n$ [об/мин], или $\omega = 2\pi n - n$ [об/с].

4.3. ПРИВЕДЕНИЕ НАГРУЗОК К ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ

Обычно используется следующая модель электропривода.



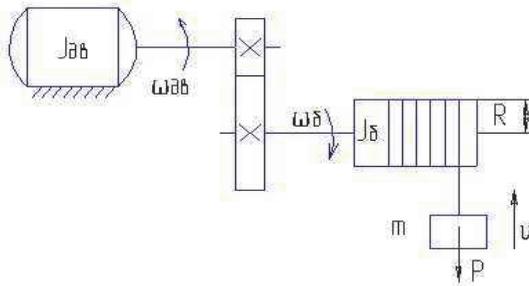
Двухмассовая модель электропривода

Используются следующие методы приведения различного вида движения к такой двухмассовой модели. Основное условие: $\omega_{\text{дв}} = \omega_{\text{рм}}$. Различны: моменты инерции J_1, J_2, \dots, J_n ; массы m_1, m_2, \dots, m_k ; частоты вращения $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$; линейные скорости: v_1, v_2, \dots, v_k .

Общим принципом приведения нагрузок к валу двигателя является закон сохранения энергии (кинетической и потенциальной). Вводится передаточное число a как отношение скоростей. Это показано на примере представленной ниже схемы.

$$a_{\text{ред}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{в}}}, \quad \omega_{\text{б}} = \frac{\omega_{\text{дв}}}{a},$$

$$v = \omega_{\text{б}} R = \frac{\omega_{\text{дв}} R}{a}.$$



Пример рабочего механизма

Определяются затраты энергии и на основе закона сохранения энергии составляются необходимые соотношения [9]:

$$A_{\text{пот}} = P v \Delta t, \quad A_{\text{пот}} = M_{\text{с}} \omega_{\text{дв}} \Delta t,$$

Δt – интервал времени подъема.

$$A_{\text{пот}} = A_{\text{пот}} \Rightarrow P v \Delta t = M_{\text{с}} \omega_{\text{дв}} \Delta t \Rightarrow \frac{P v}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{P \omega_{\text{дв}} R}{\omega_{\text{дв}} a} = P \frac{R}{a}, \quad M_{\text{с}} = P \frac{R}{a},$$

где P – вес груза; R – радиус обработки (барабана); a – передаточное число редуктора; R/a – радиус приведения.

После приведения нагрузок приводятся моменты инерции.

4.4. ПРИВЕДЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

Моменты инерции движущихся частей двигателя, редуктора и рабочей машины определяют динамические свойства системы. Поэтому необходимо приведение динамических нагрузок. Для этого определяется приведенный момент инерции механизма из условия сохранения кинетической энергии в приведенных массах, равной энергии движущихся частей рабочей машины.

$$A_{\text{кин}} = \frac{m v^2}{2}, \quad A_{\text{кин}} = \frac{J_{\text{б}} \omega_{\text{б}}^2}{2}, \quad A_{\text{кин}} = \frac{J_{\text{пр}} \omega_{\text{дв}}^2}{2},$$

$$A_{\text{кин пр}} = A_{\text{кин груза}} + A_{\text{кин бар}} \Rightarrow J_{\text{пр}} \omega_{\text{дв}}^2 = mv^2 + J_6 \omega_6^2 \Rightarrow J_{\text{пр}} = m \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2} + J_6 \frac{\omega_6^2}{\omega_{\text{дв}}^2}.$$

Используются связи $\frac{v}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{R}{a}$ и $\frac{\omega_6}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{1}{a}$, тогда $J_{\text{пр}} = \frac{mR^2 + J_6}{a^2}$.

Таким образом, $J_{\text{дв}} \gg J_{\text{пр}}$ и обеспечивается работоспособность системы.

4.5. РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

Тенденции современных систем связаны с исключением редукторов. Однако еще немало систем (ЭМС), в которых применение редуктора вполне обоснованно.

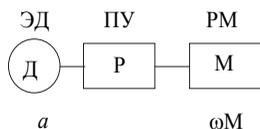


Схема с редуктором

Как правило, *механическая часть ЭМС* имеет жесткие кинематические звенья, и поэтому упрощенная модель системы включает: ЭД – электродвигатель, ПУ – передаточное устройство и РМ – исполнительный механизм, рабочая машина [17].

Для получения возможности расчетов следует привести моменты, сопротивление, инерционные массы к одной оси, т. е. заменить реальную систему моделью, в которой движущие моменты, моменты сопротивления и инерционные массы пересчитаны так, чтобы сохранились кинематические и динамические свойства системы.

Приведение моментов выполняется следующим образом.

Из равенства мощностей на валах Д–РМ (двигатель – рабочая машина)

$$M_c \omega_D = M_{\text{РМ}} \omega_{\text{РМ}},$$

где M_c – статический момент, приведенный к валу двигателя; $M_{\text{РМ}}$ – статический момент механизма; ω_D и $\omega_{\text{РМ}}$ – угловые скорости Д и РМ.

$$M_c = M_D = M_{PM} \frac{\omega_{PM}}{\omega_D} = M_{PM} / a ,$$

где a – передаточное число.

Если имеется несколько передач, то $a_\Sigma = a_1 a_2 a_3 \dots a_n = \prod_{i=1}^n a_i$. Моменты инерции относительно оси от расположения центра масс могут быть определены следующим образом:

$$J = \sum_{i=1}^k m_i r_i^2 ,$$

где r_i – наименьшее расстояние от центра тяжести массы m_i до оси вращения.

В практических расчетах пользуются понятием радиуса инерции $R_{и}$.

$$J = R_{и}^2 \sum_{i=1}^k m_i , \quad \text{или} \quad J = m R_{и}^2 .$$

Инерции простейших тел приводятся в справочниках.
Из равенства кинетической энергии

$$\frac{J_{пр} \omega_D^2}{2} = \frac{J_D \omega_D^2}{2} + \sum_{i=1}^k \frac{J_i \omega_i^2}{2} + \frac{J_{PM} \omega_{PM}^2}{2} ,$$

где $J_{пр}$ – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя; $J_D, J_1, \dots, J_k; J_{PM}$ – моменты инерции самого двигателя, передаточного устройства и РМ; $\omega_D, \omega_1, \dots, \omega_k, \omega_{PM}$ – скорости Д–ПУ–РМ (двигателя, передаточного устройства и рабочей машины). Отсюда

$$J_{пр} = J_D + \frac{J_1}{a_1^2} + \frac{J_2}{a_2^2} + \dots + \frac{J_{PM}}{a_{PM}^2} ,$$

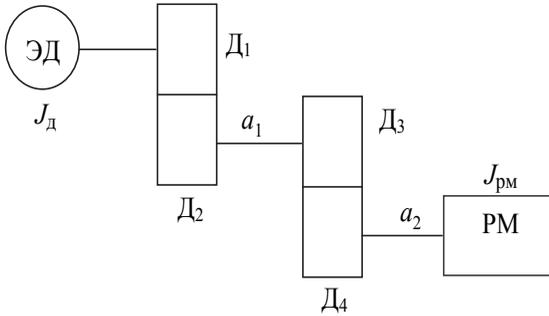
где a_1, \dots, a_2, a_m – передаточные числа между осями двигателя от элементов ПУ и РМ.

В практике пользуются соотношением

$$J_{\text{пр}} = \Delta J_{\text{Д}} + \frac{J_{\text{РМ}}}{a_{\text{РМ}}^2},$$

где $\Delta = 1, 1, \dots, 1, 3$ – учитывает моменты инерции передаточного устройства (редуктора), или

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{Д}} + J_{\text{ред}} + \frac{J_{\text{РМ}}}{a_{\text{РМ}}^2}.$$



Пример механической части ЭМС

Колеса можно считать сплошными цилиндрами с одинаковой шириной, изготовленными из одинакового материала. Момент инерции цилиндра $J_{\text{ц}} = \frac{m_{\text{ц}} r_{\text{ц}}^2}{2}$. Если ρ – плотность, V – объем, то получим:

$$J_{\text{ц}} = \frac{1}{2} \rho V \frac{D_{\text{ц}}^2}{4}; \quad V = \frac{1}{2} \frac{\pi D_{\text{ц}}^2}{4} b \rho \frac{D_{\text{ц}}^2}{4} = \frac{\pi}{4} b \rho D_{\text{ц}}^2 = K_{\text{и}} D_{\text{ц}}^2,$$

$$\begin{aligned} J_{\text{ред}} &= K_{\text{и}} D_1^4 + \frac{K_{\text{и}} D_2^4}{a_1^2} + \frac{K_{\text{и}} D_3^4}{a_2^2} + \frac{K_{\text{и}} D_4^4}{a_1^2 a_2^2} = \\ &= J_1 + \frac{J_2}{a_1^2} + \frac{J_3}{a_1^2} + \frac{J_4}{a_{\text{рез}}^2}. \end{aligned}$$

Допустим, что $a_{ред} = 40$. При этом максимальное передаточное число одной пары колес не превышает 10 (статическая величина для зубчатых передач). Редукция $a_{ред} = 40$ может, например, достигаться рядом a_1 и a_2 :

a_1	4	5	6	7	8	10
a_2	10	8	6,6	5,7	5	4

При этом последним членом можно пренебречь:

$$J'_{ред} = J_1 + \frac{J_2}{a_1^2} + \frac{J_3}{a_1^2} + \approx J_1 \left(1 + \frac{D_2^4}{D_1^4 a_1^2} + \frac{D_3^4}{D_1^4 a_1^2} \right).$$

Так как $\frac{D_2}{D_1} = a_1$, то обычно $\frac{D_3}{D_1} = 1$ и $J_{ред} = J_1 \left(1 + a_1^2 + \frac{1}{a_1^2} \right)$. При $a_1 = 2J'_{ред} = J_1(1 + 4 + 0,25)$ и, следовательно, можно вычислить $J_{ред} = J_1(1 + a_1^2)$. Всегда стремятся выполнить инерцию минимальной $J_{ред} \rightarrow \min$; или $a_1 \rightarrow \min$, т. е. выбор – за соотношением $a_1 = 4$, а $a_2 = 10$.

Как видим, момент инерции редуктора $J_{ред}$, приведенный к валу Д – двигателя при $a \geq 40$ зависит от первых двух пар.

Поэтому в редукторах, используемых в ЭМС, $a_1 < a_2 < a_3 < \dots < a_n$.

4.6. УЧЕТ ПОТЕРЬ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

Общие потери механической части ЭМС состоят из потерь в двигателе и потерь в редукторе. Как известно, в любом двигателе можно определить электромагнитную мощность, т. е. мощность, созданную в воздушном зазоре, если от $P_{потр}$ или P_1 вычесть потери ΣP , компенсируемые сетью: $P_{эм} = P_1 - \Sigma P$.

Для $M_{дв}$ положительное направление совпадает с положительным направлением ω , а для M_c это направление считается отрицательным.

$$J_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial t} = M - M_c, \quad - \text{основные уравнения движения двигателя,}$$

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} \quad \text{пр}$$

где $M = [\text{Н} \cdot \text{м}]$, $\omega = [\text{рад/с}]$, $J = [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$.

Электромагнитная мощность преобразуется в полную механическую мощность, включая механические потери $P_{\text{мх}}$:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх}} = P_2 + \sum SP_{\text{мх}}.$$

Потери в общем случае могут быть представлены так:

$$\sum SP_{\text{мх}} = P_{\text{мх}\sim} + P_{\text{мх}\sim}$$

постоянной и переменной частями.

Ясно, что справедливо выражение

$$\frac{P_{\text{эм}}}{\omega} = \frac{P_2}{\omega} + \frac{P_{\text{мх}\sim}}{\omega} + \frac{P_{\text{мх}\sim}}{\omega},$$

или

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{рм}} + M_{0\text{д}} + M_{\text{пд}}.$$

Почти всегда $M_{\text{пд}} \approx K\omega^2$, а при малых отношениях скорости $M_{\text{пд}} \approx \mu\Delta\omega$, здесь μ – коэффициент внешнего вязкого трения.

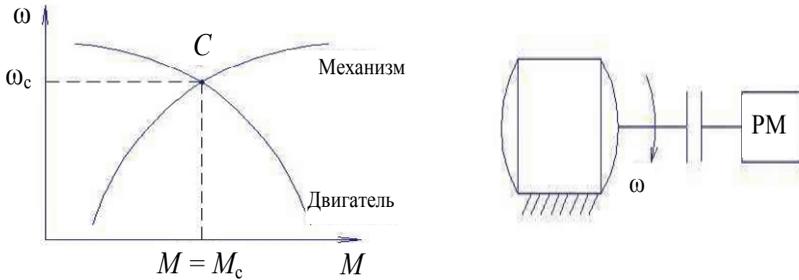
В передаточных устройствах (редукторах) потери также разделяют на постоянные, не зависящие от полезной нагрузки, и переменные, зависящие от передаваемой нагрузки.

В справочниках даются зависимости КПД одноступенчатых зубчатых передач. Тогда приведенный статический момент определяют как

$M_{\text{ст}} = M_{\text{рм}} \prod_{i=1}^k J_i^{-1} \eta_i^{-1}$; $a_{\text{пу}} = a_1 \dots a_k$ – передаточные отношения отдельных ступеней; $\eta_{\text{пу}} = \eta_1 \dots \eta_k$ – коэффициент полезного действия (КПД).

4.7. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ

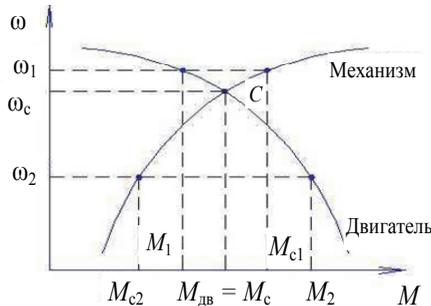
Для представления об устойчивости следует прежде всего изобразить в одних осях механическую характеристику исполнительного двигателя и рабочей машины (механизма) [11].



Механические характеристики исполнительного двигателя и рабочей машины
Валы обоих устройств вращаются с одинаковой скоростью.

Из основного уравнения движения $J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$ в точке C

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow \omega = \text{const}.$$



Определение устойчивости режима

Такие точки, где скорость привода неизменна, называют стационарными (установившимися) точками. Но это не значит, что привод будет устойчиво работать в этой точке. Если при небольших отклонениях скорости от стационарной точки привод возвращается в эту точку самостоятельно, то это точка устойчивого режима. И, наоборот, если

при небольших отклонениях привод стремится удалиться от этой точки, то точка не будет устойчивой.

Возможны и другие ситуации: $\omega_1 > \omega_c, M_{c1} > M_{1\omega}$, $J \frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_{c1} \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$, т. е. ω уменьшается, пока не вернется в точку C , где $M = M_c$. Аналогичная картина получается и в случае, когда мы притормозим двигатель: $\omega_2 < \omega_c, M_2 > M_{c2\omega}$, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, ω увеличивается, пока не вернется в точку C .

Таким образом, можно утверждать, что точка C – устойчива.

Если в стационарной точке жесткость механической характеристики двигателя меньше жесткости механической характеристики рабочей машины $\omega < \omega_c$, то эта точка устойчива, и наоборот [9].

4.8. ФОРМИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

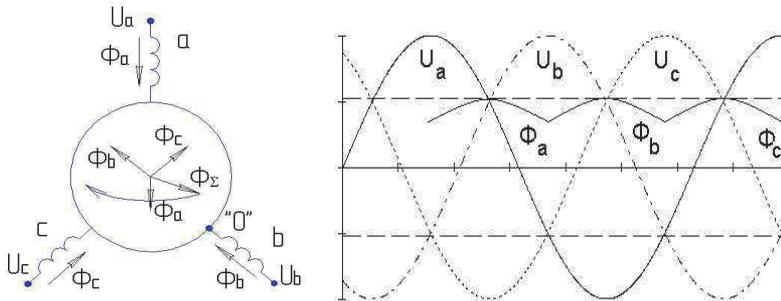
Асинхронные двигатели относятся к электрическим машинам индукционного типа, поэтому в зарубежной литературе их называют также *Induction Motor*.

Трехфазная система обмоток позволяет сформировать вращающееся магнитное поле, в котором находятся проводники ротора. Потоки, создаваемые любой фазой обмотки, синусоидальны и сдвинуты на $2\pi/3$ электрических градусов относительно друг друга, так же как и напряжения. В результате результирующий (суммарный) магнитный поток Φ_Σ будет представлять собой вращающийся вектор постоянного модуля, проекции которого на магнитные оси фазных обмоток синусоидальны.

Вращающееся магнитное поле наводит ЭДС и токи в проводниках ротора, которые, в свою очередь взаимодействуя с магнитным полем статора, создают электромагнитный момент. Величина этого момента зависит от скорости поля статора и сопротивления ротора.

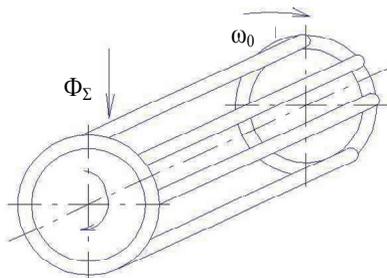
Если ω_1 – угловая скорость магнитного поля (синхронная скорость), а ω_2 – угловая скорость ротора, то при $\omega_1 = \omega_2$ момент не создается.

Многофазная система обмоток позволяет сформировать вращающееся магнитное поле, в котором находятся проводники ротора. Легко представить на электрической схеме фаз обмотки статора и схеме магнитных потоков.



$$U_a \approx E \frac{d\Phi}{dt}$$

Электрическая схема фаз обмотки статора и магнитные потоки



Пример короткозамкнутой обмотки ротора типа «беличья клетка»

Для работы асинхронного двигателя, как известно, принципиально необходимо отставание ротора от магнитного поля статора, которое определяется скольжением s .

Скольжение – относительная разность скоростей вращения магнитного поля и вращающейся части двигателя – ротора:

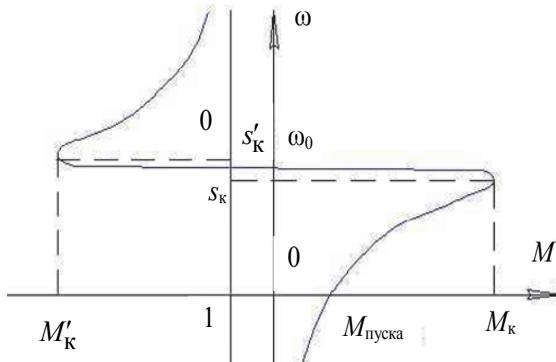
$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega}$$

Обычно номинальное скольжение находится в пределах: $s_{\text{ном}} = 0,03 \dots 0,07$.

Зависимость электромагнитного момента от скольжения достаточно точно описывается упрощенной формулой [15]:

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}},$$

где $s_{\text{к}}$ – критическое скольжение, а $M_{\text{к}}$ – критический момент, критические точки зависимости.



Графическое представление механической характеристики и зависимости момента от скольжения

Анализ: $s = 0$ – идеальный холостой ход, при $\omega_2 = \omega_0(\omega_1)$; $s = 1$ – короткое замыкание обмотки ротора, пусковой режим, при $\omega_2 = 0$. Критические точки определяются из приближенных формул. При $s \ll s_{\text{к}}$, когда скольжение значительно меньше критического, получим $\frac{s}{s_{\text{к}}} \rightarrow 0$,

тогда момент практически равен $M \approx \frac{2M_{\text{к}}s}{s_{\text{к}}}$. При $s \gg s_{\text{к}}$, когда скольжение существенно больше критического, получим $\frac{s_{\text{к}}}{s} \rightarrow 0$,

тогда момент практически равен $M \approx \frac{2M_{\text{к}}}{s}$.

момент будет $M \approx \frac{2M_{кск}}{s}$. Показывает связь с физическим процессом в роторе.

На жесткой части характеристики (рабочей части) скольжение мало, частота тока (f_p) в обмотке ротора низкая (порядка 3...7 Гц). Основную роль в ограничении токов ротора играет активное сопротивление ротора.

$$I_p = \frac{E}{R_p^2 + X_p^2},$$

где X_p – индуктивное сопротивление при малой частоте в цепи ротора невелико; $X_p = \omega_p L \omega_p = 2\pi \cdot f_p$, f_p – частота тока в обмотке ротора.

При уменьшении этой частоты уменьшаются ЭДС и ток в цепи ротора, поэтому основную роль играют активное сопротивление ротора и активная составляющая тока, которая определяет величину момента.

$$X_p \ll R_p \rightarrow I_p \approx \frac{E}{R_p}.$$

Мягкий участок характеристики формируется за счет ограничения тока индуктивным сопротивлением ротора, которое растет по мере роста скольжения. С уменьшением токов ротора уменьшается и момент. Разгон вначале происходит по мягкой характеристике [21].

4.9. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Начало частотному управлению положил академик М.П. Костенко [10], который установил закон управления амплитудой и действующим значением напряжения. Чтобы обеспечить оптимальный режим работы асинхронного двигателя при всех значениях частоты и нагрузки, относительное напряжение двигателя необходимо изменять пропорционально произведению относительной частоты на корень квадратный из относительного момента двигателя. Этот закон частотного управления можно записать уравнением

$$\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}},$$

или в относительных единицах: $u^* = f^* \sqrt{M^*}$.

Закон был получен в пренебрежении падением напряжения в активных сопротивлениях статора и насыщением магнитной цепи. В соответствии с законом напряжение необходимо регулировать так, чтобы коэффициент статической перегружаемости $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$ оставался одинаковым при разных частотах [17]. Так как максимальный момент изменяется пропорционально квадрату потока в воздушном зазоре Φ , то для этого необходимо, чтобы

$$\frac{\Phi'^2}{\Phi''^2} = \frac{M'}{M''}, \text{ или } \phi^* = \sqrt{M^*}.$$

Но в первом приближении $\frac{U'}{U''} \approx \frac{\Phi' f_1'}{\Phi'' f_1''}$, откуда и следует основное уравнение.

При управлении по данному закону характеристики асинхронного двигателя описываются следующими простыми соотношениями:

- поток в воздушном зазоре

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}}, \quad \phi^* = \sqrt{M^*};$$

- активная составляющая тока статора

$$\frac{I_a}{I_{a \text{ НОМ}}} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}};$$

- полезная мощность двигателя

$$\frac{P}{P_{\text{Н}}} = \frac{f_1}{f_{1 \text{ НОМ}}} \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}};$$

- относительное скольжение

$$\frac{s}{s_H} = \frac{f_{1\text{НОМ}}}{f_1} = \frac{1}{\alpha}, \quad s^* = 1 / f^*;$$

- коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}} + P_{\text{Э.НОМ}} \frac{f_{1\text{НОМ}}}{f_1} + P_{\text{Г.НОМ}} + P_{\text{В.НОМ}} \frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}} + P_{\text{ТР}} \frac{M_{\text{НОМ}}}{M} \sqrt{\frac{f_1}{f_{1\text{НОМ}}}}},$$

где $P_{\text{Э.НОМ}}$, $P_{\text{Г.НОМ}}$, $P_{\text{В.НОМ}}$ и $P_{\text{ТР}}$ – соответственно потери в меди, в стали на гистерезис, в стали на вихревые токи и механические при номинальной частоте.

При указанных выше допущениях в двигателе активный ток и ток холостого хода изменяются по закону:

$$\frac{I_{1a}}{I_{1a\text{НОМ}}} \approx \frac{I_0}{I_{0\text{НОМ}}} \approx \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}}.$$

Положение вектора тока статора, а следовательно, и коэффициент статической перегружаемости, т. е. отношение максимального момента к моменту на валу двигателя при том же напряжении, будут неизменными при всех частотах и угловых скоростях двигателя, абсолютное скольжение s имеет постоянное значение, а потери близки к минимальному уровню.

Асинхронный двигатель обычно сконструирован для определенных значений частоты $f_{1\text{НОМ}}$, момента $M_{\text{НОМ}}$ и напряжения на зажимах $U_{\text{НОМ}}$. Изменять при новом значении момента M следует напряжение U и частоту f_1 так, чтобы удовлетворялось соотношение пропорциональности, тогда двигатель будет работать при практически неизменном коэффициенте мощности $\cos \varphi$, коэффициенте перегружаемости λ и скольжении. Коэффициент полезного действия по приведенному выше соотношению зависит только от изменения частоты $f_1 / f_{1\text{НОМ}}$ и практически не зависит от изменения момента на валу $M / M_{\text{НОМ}}$, если насыщение магнитной цепи двигателя не слишком велико.

Проанализируем возможные изменения при применении закона.

1. Если двигатель будет работать не при номинальной частоте, а при новом, пониженном, ее значении, то закон будет учитывать изменения нагрузки. С уменьшением частоты нагрузка также уменьшается из-за сопутствующего почти пропорционально частоте снижения угловой скорости, поэтому нет смысла сохранять магнитный поток двигателя на том же уровне. Поток можно уменьшить настолько, чтобы сохранить прежний номинальный коэффициент статической перегружаемости, т. е. запас статической устойчивости.

2. Уменьшение потока с уменьшением нагрузки при том же запасе устойчивости дает снижение потерь в стали двигателя и повышает экономичность привода с частотным управлением и часто меняющейся нагрузкой по сравнению с асинхронным двигателем при постоянной частоте. Уменьшение потока с уменьшением момента, как известно, имеет место и у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Диапазон регулирования скорости вращения двигателя по рассматриваемому закону ограничен сверху и снизу.

3. Верхняя граница определяется насыщением магнитопровода машины. С ростом отношения u^* / f^* растет магнитный поток машины и резко увеличивается ток намагничивания $I_{0\mu}$, что и ограничивает допустимое значение этого соотношения. Поэтому применение закона практически ограничено нагрузками, не слишком превышающими предельный момент двигателя.

4. Поток изменяется в зависимости от абсолютного скольжения s пропорционально квадратному корню из момента двигателя. Нижняя граница диапазона регулирования зависит от момента статического сопротивления при трогании тела с места. Очевидно, при возрастании частоты и напряжения от нуля двигатель будет неподвижен до тех пор, пока частота ротора, равная частоте статора (ротор неподвижен), не достигнет такого значения, при котором момент двигателя превысит момент трогания неподвижного привода.

Практическое применение основного закона ограничивают трудности непосредственного измерения момента на валу двигателя.

Задача упрощается в применении к вентиляторной нагрузке, т. е. к таким видам механических характеристик, у которых момент статического сопротивления зависит от скорости или (с точностью до скольжения) от частоты. Благодаря этому отпадает необходимость в непосредственном измерении момента.

4.10. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Изучение процессов в асинхронных машинах в соответствии с классической теорией осуществляется с помощью схем замещения [15].

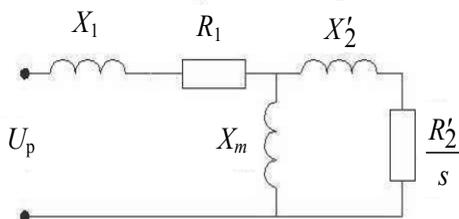


Схема замещения асинхронного двигателя

На рисунке: X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; X_m – индуктивное сопротивление намагниченного контура; X_2' – индуктивное сопротивление вторичной обмотки; R_2' – активное сопротивление вторичной обмотки (обмотки ротора).

Соотношения, связывающие характерные точки механической характеристики с параметрами схемы замещения:

- максимальный (критический) момент

$$M_k = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]};$$

- критическое скольжение.

$$s_k = \frac{\pm R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

Существуют различные способы регулирования.

1. *Частотный способ* – изменение частоты питания статора с помощью специального источника питания. Этот способ наиболее перспективен и подробно рассмотрен в предыдущем разделе.

2. *Фазовый способ* – изменение напряжения статора без изменения частоты. У этого способа плохая энергетика, зато хороший источник питания, использующий фазовый принцип управления.

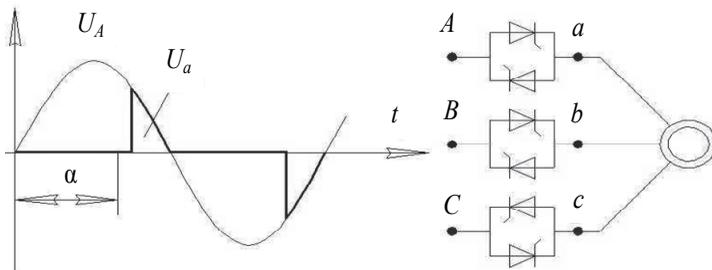
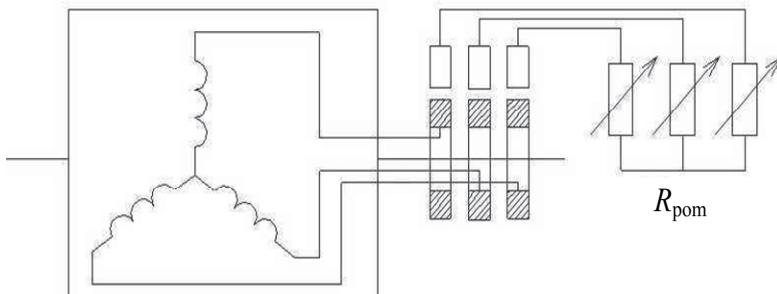


Схема фазового принципа управления

Изменяя угол α , можно менять напряжение, приложенное к обмотке двигателя.

3. *Изменение сопротивления обмоток* – особенно эффективно изменение сопротивления в обмотке ротора. Для этого используют двигатель с фазным ротором (в конструкцию ротора двигателя вводят контактные кольца).



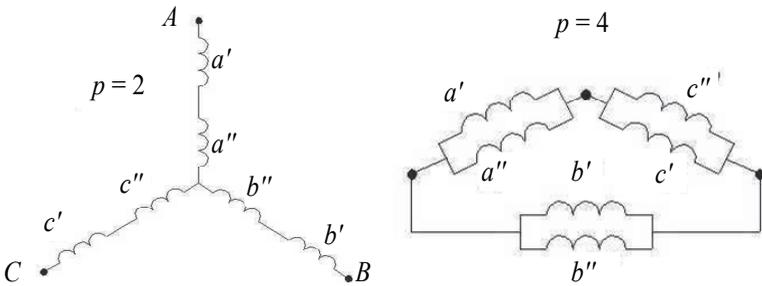
Двигатель с фазным ротором

4. *Изменение числа пар полюсов* – для этого каждая обмотка выполняется секционированной и с помощью релейно-контакторной или электронной аппаратуры может переключаться во время работы двигателя.

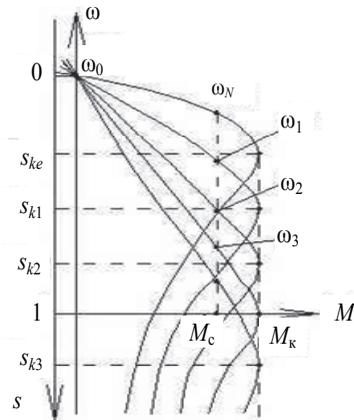
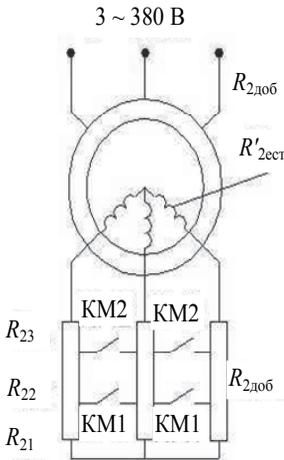
При регулировании изменением сопротивления обмоток используют соотношения:

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \neq f(R_2'),$$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \sim R_2'.$$



Схемы обмоток при переключении

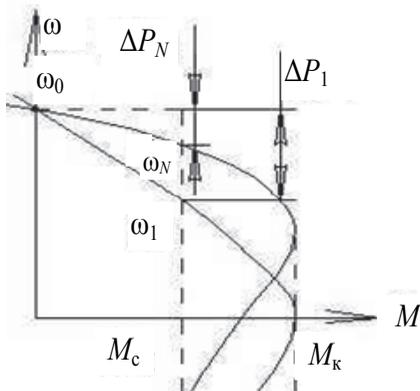


$$s_{k3} > s_{k2} > s_{k1} > s_{кест},$$

$$R'_{23} > R'_{22} > R'_{21} > R'_{2ест}$$

Схема и графики механических характеристик

Энергетические соотношения при регулировании изменением сопротивления обмоток $\Delta P = P_{ЭМ} - P_{МХ}$, $P_{ЭМ} = M_c \omega_0$ – мощность, развиваемая электромагнитным полем статора.



Энергетические соотношения при регулировании

$P_{МХ} = M_c \omega_N$ – мощность на валу.

$$\Delta P_N = (\omega_0 - \omega_N) M_c,$$

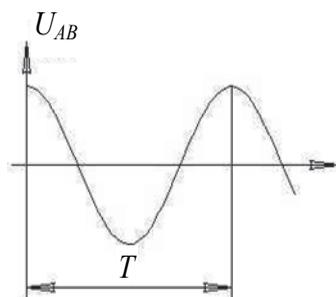
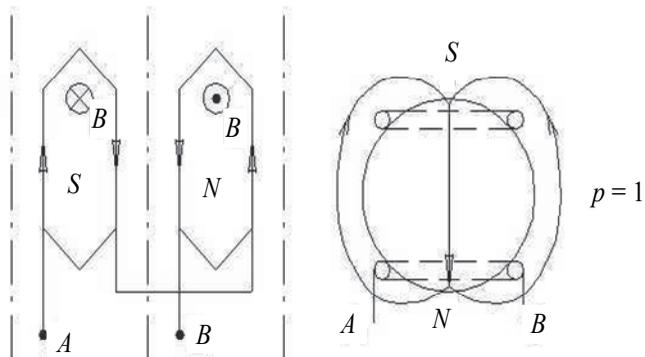
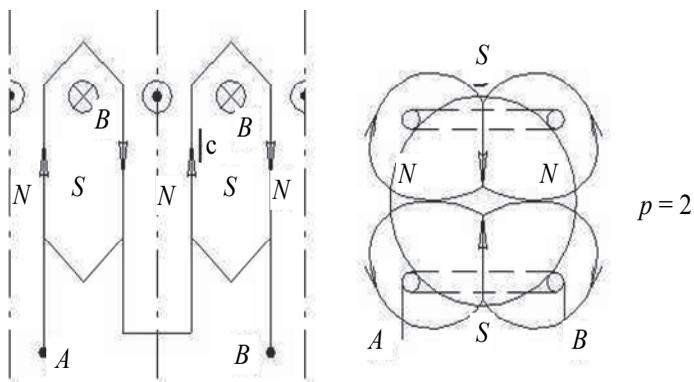
$$\Delta P_1 = (\omega_0 - \omega_1) M_c \rightarrow \Delta P_1 > \Delta P_N.$$

Увеличение ΔP_1 ведет к пропорциональному увеличению $R'_{2\text{доб}}$ и, как следствие, к нагреву. Достоинства: простота и дешевизна.

Целесообразные области применения способа: в крановых механизмах (кратковременная работа на малых скоростях, при этом плохая энергетика несущественна); в металлургических приводах, работающих в особо тяжелых условиях (формирование $M_{\text{пуск}} = M_{\text{кр}}$); в транспортных механизмах, где возможна работа на упор (вводя R'_2 очень большой величины, снижаем $M_{\text{пуск}}$ до $[M_{\text{доп}}]$).

Двигатели с фазным ротором дороже, чем с короткозамкнутым ротором, поэтому реже применяются в станочном деле.

При регулировании изменением числа пар полюсов каждую фазу обмотки представляют двумя полуобмотками. На схеме развертки это выглядит следующим образом (см. рисунок).

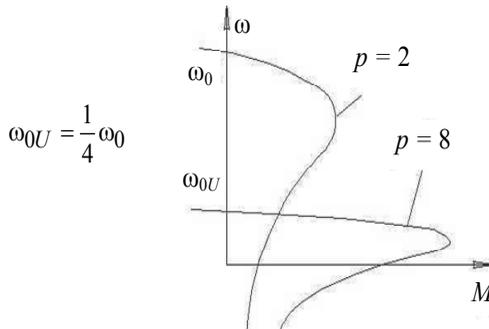


Схемы развертки

Магнитное поле находится во вращательном движении. В результате для однополюсной ($p = 1$) машины поле за период сети выполняет полный оборот, а для двухполюсной ($p = 2$) – полуоборот. Этим дости-

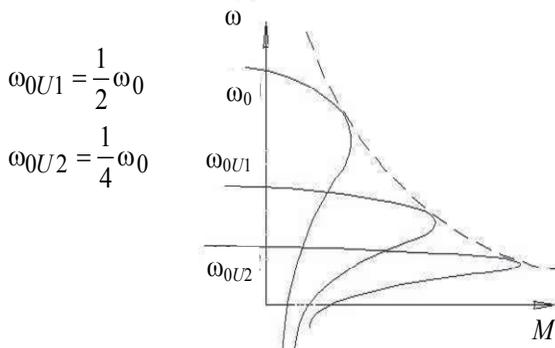
гается электромагнитная редуция скорости. Синхронная скорость магнитного поля двигателя ω_0 (ω_1) зависит от частоты тока в обмотке статора и числа пар полюсов и всегда определяется по формуле $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ при частоте тока в сети $f = 50$ Гц; при $p = 1$ $\omega_0 = 314$ рад/с; при $p = 2$ $\omega_0 = 157$ рад/с; при $p = 3$ $\omega_0 = 105$ рад/с и т. д.

Область применения: часто лифтовое хозяйство. При $p = 8$ $M_{кр}$ больше, чем при $p = 2$.



Характеристики при различных полюсах

В приводах вращательного движения (для них характерно постоянство мощности нагрузки) характеристики выглядят, как показано на графике.



Характеристики при различных полюсах в приводах вращательного движения

С ростом $M_{кр}$ можно получить ряд скоростей, которые закладываются в проекты станков. Изменение скоростей выглядит как геометрическая прогрессия со знаменателем $q = 2^{\frac{n}{m}}$. Механически можно уменьшать число ступеней коробки передач.

4.11. ВЫБОР МОЩНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

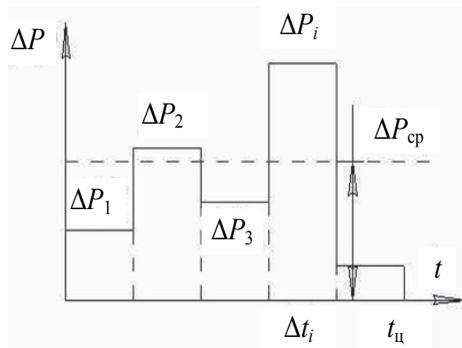
Выбор двигателя производится по тепловому режиму и стандартной продолжительности включения (ПВ). Последовательность выбора при заданном моменте:

- 1) определение режимов работы двигателя;
- 2) определение необходимой мощности $P = M\omega$;
- 3) $P_{ном} = 1,3 P$, где 1,3 – коэффициент запаса.

Мощность двигателя может быть приведена по следующему выражению:

$$P_{ном} = P_{ст} \sqrt{\frac{ПВ_{ст}}{ПВ_{реал}}}$$

Используется метод средних потерь (см. рисунок).



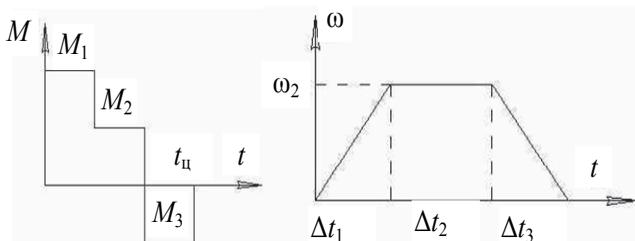
Метод позволяет усреднить потери за цикл работы и свести выбор двигателя по нагреванию к проверке условия $\Delta P_{ном} > \Delta P_{ср}$, т. е. к сравнению потерь энергии в номинальном режиме со средними реальными потерями энергии за цикл работы.

Средние потери оказывают такое же тепловое действие, как номинальный переменный график потерь. Основные соотношения:

$$t_{ц} < T_{нагр}, \quad t_{раб} = qt_{ц}, \quad t_{раб} \gg 4T_{н},$$

$$\Delta\tau \approx \Delta\tau_{доп}, \quad \Delta P_{ср} t_{ц} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \Delta t_i.$$

Обычно задаются нагрузочная диаграмма и тахограмма (см. рисунок).



Нагрузочная диаграмма и тахограмма

Простейший вариант метода потерь:

$$\Delta t_i \rightarrow P_i, \quad i = 2, \quad \omega_2 = \text{const}, \quad M_2 = \text{const}, \quad P_2 = \omega_2 M_2.$$

$$1\text{-й интервал: } P_1 = \frac{M_1 \omega_1}{2}, \quad 3\text{-й интервал: } P_3 = \frac{M_3 \omega_3}{2}.$$

Порядок определения средних потерь

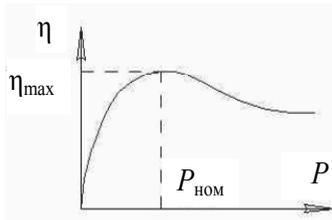
$$1. \text{ Средняя мощность } P_{ср} = \frac{\sum P_i \Delta t_i}{t_{ц}}, \quad \text{при } \omega = \text{var } P_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \Delta t_i}.$$

2. Предварительно выбирается мощность двигателя

$$P_{ном} = k_3 P_{ср},$$

где k_3 — коэффициент запаса.

3. Учитываются потери. По зависимости $\eta = f(P_{\text{дв}})$ устанавливают η_i для каждого участка.



Зависимость КПД

4. $\Delta P_i = (1 - \eta_i)P_i$, $P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$ – уточненное значение.

5. Проверяют двигатель по нагреванию:

$$\Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_i,$$

где $\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})$.

Метод позволяет получить возможность расчета в разных режимах, в том числе и с переменным графиком нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От свойств и характеристик ЭМС зависят производительность и качество выпускаемой продукции. Выбор типа ЭМС согласуется с требованиями, предъявляемыми к рабочим механизмам и агрегатам. Сложность современных производственных машин и агрегатов не позволяет составить уравнения, определяющие их поведение, исходя из физических принципов функционирования и конструктивных данных.

Для нерегулируемой ЭМС выбор типа двигателя и системы управления решается достаточно просто. Для установок малых и средних мощностей используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, а для механизмов, требующих больших мощностей, – синхронные двигатели. Двигатели переменного тока по конструкции проще, стоимость их ниже, они надежнее, и обслуживание их требует меньших затрат. Синхронные двигатели используются и в области малых мощностей для специальных установок и в устройствах автоматики. Свойство синхронного двигателя поддерживать неизменным средний уровень скорости является определяющим при использовании двигателей в лентопротяжных механизмах, устройствах отработки времени, модуляторах светового потока и др.

Значительно сложнее решать вопрос о выборе типа двигателя для регулируемой системы ЭМС. Здесь необходимо указывать допустимые погрешности при скачке нагрузки и предельные коэффициенты неравномерности частоты вращения на различных уровнях, необходимые полосы пропускания частот для контура скорости и контура положения, разрешенные неравномерности скорости и др.

При глубоком регулировании частоты вращения и необходимости иметь хорошую управляемость можно использовать только ЭМС с индивидуальными преобразователями. Основными препятствиями к быстрому и широкому внедрению частотно-регулируемых ЭМС являются сложность систем управления и отсутствие достаточного количе-

ства разработок специальных двигателей, предназначенных для работы в условиях переменной частоты.

Необходимо отметить, что в связи с быстрым развитием полупроводниковой техники, электромашиностроения и появлением новых аппаратных средств регулируемые ЭМС непрерывно совершенствуются и следует ожидать появления новых – с улучшенными техническими показателями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анго А.* Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1965. – 750 с.
2. *Бут Д.А.* Основы электромеханики / Д.А. Бут. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 468 с.
3. *Вольдек А.И.* Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
4. *Домбровский В.В.* Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.М. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
5. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Том 1: учебник для вузов. – 2-е изд. / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.
6. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Том 2: учебник для вузов. – 2-е изд. / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 532 с.
7. *Иванов-Смоленский А.В.* Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.
8. *Кёниг Г.* Теория электромеханических систем / Г. Кёниг, В. Блекуэлл. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
9. *Ковчин С.А.* Теория электропривода: учебник для вузов / С.А. Ковчин, Ю.С. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
10. *Костенко М.П.* Электрические машины: учебник для вузов / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
11. *Липай Б.Р.* Электромеханические системы: учеб. пособие для вузов / Б.Р. Липай, А.Н. Соломин, П.А. Тыричев; под ред. С.И. Маслова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 250 с.
12. *Ленк А.* Электромеханические системы / А. Ленк. – М.: Мир, 1978. – 283 с.
13. *Львович А.Ю.* Электромеханические системы / А.Ю. Львович. – Л.: Изд. ЛГУ, 1986. – 296 с.
14. *Малинин Л.И.* О совместимости преобразователя и двигателя в асинхронном электроприводе / Л.И. Малинин, В.И. Малинин, В.Д. Макельский, В.А. Тюков // Электричество. – 1996. – № 5. – С. 47–51.
15. *Петров Г.Н.* Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины / Г.Н. Петров. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

16. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля / К.М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.

17. *Тюков В.А.* Электромеханические системы: учеб. пособие / В.А. Тюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 179, [1] с.

18. *Тюков В.А.* Потоки плотностей электрического и магнитного полей / В.А. Тюков // Современные тенденции в образовании и науке: сб. науч. труд. по матер. Междунар. научно-практ. конф., 28 ноября 2014 г. Часть 13. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 155–156.

19. *Тюков В.А.* Математическое описание сил электромагнитного взаимодействия / В.А. Тюков // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 30 августа. 2014 г. В 5 частях. Часть 4. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 151–152.

20. *Тюков В.А.* Математическое описание электрических явлений / В.А. Тюков // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая 2014 г. В 11 частях. Часть 9. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 150–151.

21. *Тюков В.А.* Тенденции создания тяговых частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей / В.А. Тюков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2013. – № 10. – С. 11–16.

22. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Вып. 5. Электричество и магнетизм. – М.: Мир, 1977. – 300 с.

23. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Вып. 6. Электродинамика. – М.: Мир, 1977. – 347 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение в теорию систем	5
В1. Понятие системы	5
В2. Классификационные признаки систем	7
В3. Управление в системах	8
В4. Принципы системного подхода	11
В5. Создание электромеханических систем	13
ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ	15
1.1. Определения и общие положения	15
1.2. Явления и законы электромеханики	17
1.3. Электромагнитное поле	18
1.4. Интегральная форма законов электромагнетизма	19
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	21
2.1. Общее представление устройства	21
2.2. Характеристика конструкций преобразователей	23
2.3. Принципы работы	25
2.4. Нагрев и коэффициент полезного действия двигателей	26
2.5. Механические характеристики двигателей	30
ГЛАВА 3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ	32
3.1. Асинхронные двигатели	33
3.1.1. Принцип действия	34
3.1.2. Режимы работы асинхронных машин	35
3.1.3. Энергетика асинхронного двигателя	36
3.2. Синхронные двигатели	40
3.2.1. Принцип действия	40
3.2.2. Работа синхронного двигателя	41
3.2.3. Энергетика синхронного двигателя	45

3.2.4. Рабочие характеристики синхронного двигателя	46
3.3. Двигатели постоянного тока	50
3.3.1. Принцип работы.....	50
3.3.2. Энергетические соотношения	51
3.3.3. Основные уравнения.....	53
3.3.4. Двигатели с беспазовым и полым якорем	55
ГЛАВА 4. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ	58
4.1. Построение модели.....	58
4.2. Ограничения исполнительных двигателей.....	61
4.3. Приведение нагрузок к валу двигателя.....	62
4.4. Приведение моментов инерции	63
4.5. Рациональное распределение передаточных чисел	64
4.6. Учет потерь в механической части системы	67
4.7. Переходные режимы и устойчивость.....	69
4.8. Формирование вращающегося магнитного поля	70
4.9. Законы регулирования частоты вращения.....	73
4.10. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.....	77
4.11. Выбор мощности исполнительного двигателя.....	83
Заключение.....	86
Библиографический список	88

Тюков Валентин Андреевич

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 26.10.2015. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 150 экз.
Уч.-изд. л. 5,34. Печ. л. 5,75. Изд. № 115. Заказ № Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20