

Предисловие	5
-------------------	---

Введение	6
----------------	---

▼ Глава 1

Управляемый электропривод	8
---------------------------------	---

1.1. Структура систем автоматического управления электроприводом переменного тока	8
--	---

1.2. Компьютерное моделирование электропривода	9
--	---

1.3. Механические характеристики электропривода	11
---	----

1.4. Электродвигатели переменного тока	14
--	----

Контрольные вопросы к главе 1	29
-------------------------------------	----

▼ Глава 2

Математические модели электродвигателей переменного тока	30
--	----

2.1. Математическая модель асинхронного электродвигателя	31
--	----

2.1.1. Динамическая модель на основе обобщенной электрической машины ...	31
--	----

2.1.2. Пространственный вектор и преобразование координат	37
---	----

2.1.3. Преобразование уравнений трехфазной машины к уравнениям эквивалентной двухфазной	45
--	----

2.1.4. Преобразование трехфазной асинхронной машины к модели в системе неподвижных координат $\alpha\beta$	50
---	----

2.1.5. Преобразование модели трехфазной машины к модели в системе координат dq	55
---	----

2.1.6. Статические характеристики асинхронного электродвигателя	58
---	----

2.1.7. Компьютерные модели асинхронного электродвигателя	61
--	----

2.2. Математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами	65
--	----

2.2.1. Компьютерные модели синхронного электродвигателя с постоянными магнитами	73
2.2.2. Статические характеристики синхронного электродвигателя с постоянными магнитами	77
Контрольные вопросы к главе 2	81

▼ Глава 3

Инвертор и широтно-импульсная модуляция	83
3.1. Структурная схема преобразователя частоты	83
3.2. Выпрямители частотного преобразователя	85
3.3. Инвертор	87
3.4. Широтно-импульсная модуляция напряжения инвертора	96
3.5. Алгоритм синусоидальной модуляции инвертора	98
3.6. Векторная широтно-импульсная модуляция инвертора	106
3.7. Матричный преобразователь напряжения	113
Контрольные вопросы к главе 3	126

▼ Глава 4

Управление асинхронными электродвигателями	128
4.1. Частотное управление асинхронным электродвигателем	128
4.2. Скалярный принцип частотного управления	132
4.2.1. Компьютерное моделирование системы скалярного управления	136
4.3. Векторный принцип частотного управления	138
4.3.1. Управление магнитным потоком ротора	140
4.4. Прямое управление моментом и магнитным потоком	157
Контрольные вопросы к главе 4	169

▼ Глава 5

Частотное управление синхронным электродвигателем с постоянными магнитами	171
5.1. Управление магнитным потоком синхронного электродвигателя	172
5.2. Прямое управление магнитным потоком и моментом синхронного электродвигателя	184
5.3. Бесконтактные двигатели постоянного тока	186
Контрольные вопросы к главе 5	195
Перечень прилагаемых компьютерных моделей	196
Литература	198



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие предназначено для обучающихся по инженерным, не электрическим направлениям, таким как «Агроинженерия» и так далее, а также может быть полезно всем техническим специалистам, желающим ознакомиться с основами современных систем управления асинхронными и синхронными электродвигателями. Данное пособие построено таким образом, что для понимания излагаемого материала достаточно знаний базовых понятий математики, физики, электротехники и теории автоматического управления.

Особенностью данного пособия является то, что все излагаемые теоретические вопросы иллюстрируются компьютерными моделями, созданными в отечественном программном комплексе SimInTech.

Для каждого теоретического раздела пособия предусмотрены задания для самостоятельного выполнения лабораторных работ с помощью соответствующих компьютерных моделей из прилагаемого к книге набора моделей. Программный комплекс SimInTech можно скачать с фирменного сайта <https://simintech.ru/>. Последовательность получения ключей для полнофункциональной формы программы и инструкция по установке подробно описаны на этом сайте.

Автор также выражает свою благодарность руководству фирмы ООО «ЗВ-Сервис» г. Москва, разработчика SimInTech, за представленную возможность использования данного продукта в учебных и научных целях.



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время из-за своих преимуществ основным и самым распространенным источником механической энергии стали электрические электродвигатели, которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Среди всего многообразия электромеханических преобразователей наиболее широко используемым в мире типом электрических машин является асинхронный электродвигатель. Более 80 % изготавливаемых в мире электрических машин являются асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, и на их работу тратится порядка 30 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Это обусловлено простотой конструкции и технологии ее изготовления, а также достаточно высокой энергетической эффективностью использования.

Кроме того, в последние десятилетия большое распространение, особенно в качестве тяговых в электротранспорте, получили синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Этот тип электродвигателей выгодно отличается от асинхронных своими удельными энергетическими характеристиками.

Основным недостатком электропривода на основе электродвигателей переменного тока является сложность управления частотой вращения их ротора, в результате чего приходится использовать разнообразные громоздкие механические устройства для сопряжения электродвигателя с приводимыми с их помощью технологическими установками. Эти редукторы, вариаторы, муфты и т. д. значительно усложняют и удорожают электропривод и создают дополнительные потери энергии.

Однако научно-технологический прогресс последних 50 лет привел к революционным изменениям во всей технике вообще и в электротехнике в частности. Поскольку «кремний победил медь и сталь», то есть любая сложная электроника стала дешевле простой механики и электромеханики, то внедрение современной электроники микропроцессоров, информационных технологий

и автоматики полностью преобразует все производственные процессы и человеческую жизнь. Электроника и информационные технологии стали основными компонентами во всех отраслях техники, синергетически повышая их эффективность.

Мощная силовая электроника и микропроцессоры позволили сделать асинхронный электродвигатель полностью управляемым, то есть управлять всеми его параметрами (частотой вращения, электромагнитным моментом, потребляемым током и т. д.) и отказаться от громоздких механических передаточных устройств. Это позволило значительно расширить область применения электропривода на основе электродвигателей переменного тока и сделать управляемый электропривод основным типом привода технологических устройств в промышленности, сельском хозяйстве и транспорте.

Современный электропривод, с которым сталкивается практически каждый инженер, является сложной автоматической системой, включающей в себя электронные схемы питания, электродвигатель и микропроцессорную систему управления. Чтобы правильно выбирать и эксплуатировать тот или иной тип электропривода, необходимо понимать принципы его функционирования, типовые структуры и характеристики. Но для этого не обязательно быть специалистом в области электроприводов, достаточно общеинженерных знаний.

Поэтому настоящее пособие предназначено для того, чтобы дать общие сведения о компонентах современного управляемого электропривода, принципах их действия и алгоритмах управления. Авторы постарались там, где это можно, упростить изложение материала, оставив только основные понятия без излишних математических выкладок и детализации конструктивных решений. Дело в том, что все фирмы-изготовители комплектного оборудования для электропривода скрывают их схемные решения и алгоритмы управления, давая только инструкции по эксплуатации. Следовательно, нет необходимости рассмотрения конкретных схем и программ, это задача узких специалистов в этой области. Инженеру достаточно знать только общие принципы работы каждого компонента и всей системы электропривода в целом.

Исходя из этих требований, учитывая, что знания большинства читателей в области электротехники и электрических машин могут быть недостаточными, в пособии и в приложении более подробно рассмотрены эти специфические вопросы.

Характерной особенностью данного пособия является использование компьютерных моделей для исследования основных элементов электропривода, с помощью которых упрощается изучение принципов работы электропривода. Желательно, чтобы читатели данного пособия ознакомились с основами работы с программным комплексом SimInTech либо в его справочной системе, либо в соответствующих пособиях [2, 3, 4, 7, 9, 10, 13, 16].

1.1. Структура систем автоматического управления электроприводом переменного тока

Общепринятое понятие гласит, что *управление есть процесс переработки информации о состоянии объекта управления в командную информацию исполнительной системы для достижения заданных целей управления*. На рис. 1.1 показана обобщенная структура любой автоматической системы управления, построенной согласно принятому определению принципа управления.

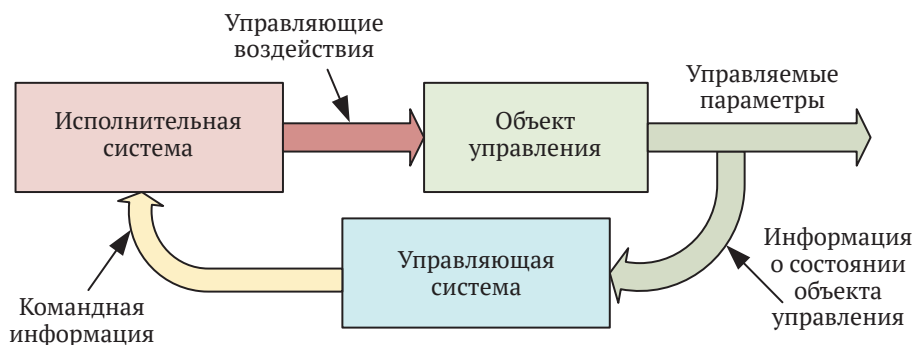


Рис. 1.1. Структура системы автоматического управления

В качестве исполнительной системы, воздействующей на объект управления, во многих автоматических устройствах используются управляемые электрические машины. Применение электрических машин для привода различных технологических установок принято называть **электроприводом**. В ГОСТ Р 50369-92 «Электроприводы. Термины и определения» **электропривод** определен как

«электромеханическая система, состоящая из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса». Таким образом, электропривод с управляемым электродвигателем также является самостоятельной системой автоматического управления.

На рис. 1.2 показана упрощенная функциональная схема автоматизированного электропривода всех машин переменного тока.

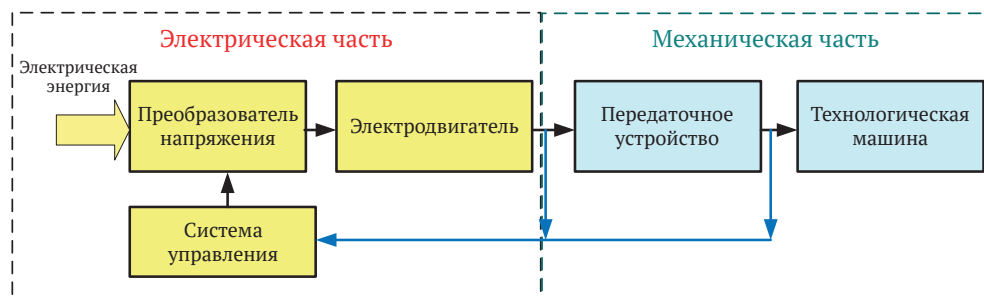


Рис. 1.2. Функциональная схема системы автоматического управления электроприводом переменного тока

Согласно приведенному определению электропривода он состоит как бы из двух частей: электрической и механической (рис. 1.2). Электрическая часть включает в себя преобразователь напряжения, который формирует управляющее воздействие на электродвигатель, и сам электродвигатель, который преобразует электрическую энергию в механическую.

Механическая энергия в виде вращательного движения вала ротора с помощью механических передаточных устройств передается на технологическую машину с нужными ей параметрами механического движения.

Для обеспечения заданного закона управления механической энергией с выхода электродвигателя используется обратная связь из механической части электропривода, осуществляемая соответствующими датчиками. Информация о параметрах механического движения технологической машины или вала ротора электродвигателя поступает в систему управления преобразователем напряжения, в результате чего обеспечивается заданный характер механического движения технологической машины, для чего, собственно говоря, и предназначен электропривод.

1.2. Компьютерное моделирование электропривода

В настоящее время основным методом исследования и проектирования сложных технических устройств, к которым относится и электропривод, является

построение математических моделей его компонентов и математической модели всей системы в целом. Решение уравнений этих математических моделей позволяет анализировать и выбирать наиболее рациональные параметры всех компонентов проектируемой системы. Все разнообразие методов получения и решения уравнений математических моделей компонентов проектируемых технических устройств можно разделить на две группы.

К первой группе можно отнести классический, исторически сложившийся **инженерный метод проектирования**. В этом случае применяется декомпозиция системы на составляющие, для которых строятся их упрощенные физические модели и согласно которым, используя причинно-следственные связи на основе базовых физических принципов, и строится математическая модель этого компонента системы. Далее, после математического описания физических и информационных связей между компонентами полученная система уравнений решается с помощью соответствующего **универсального математического программного комплекса**. Данный подход является весьма трудоемким и громоздким, особенно при рассмотрении многокомпонентных систем с разными физическими принципами работы. В этом случае достаточно сложно построить адекватные математические модели компонентов и описать связи между ними. Кроме того, при наличии системы дифференциальных уравнений большой размерности довольно трудно подобрать численный метод их решения, обеспечивавший достаточную точность, что требует от инженера высоких знаний в области вычислительной математики.

Второй подход к построению математической модели технической системы, более эффективный и удобный для инженера или исследователя, основан на использовании **информационных систем визуального «физического» моделирования**. Термин «физическое» здесь означает то, что на экране строится схема исходной технической системы, где математические модели каждого компонента скрыты за условным графическим обозначением, а последовательность их соединения отражает передачу информации или физических сигналов. Модели такого рода носят название **«компьютерные модели»** (англ. *computer simulation* или просто *simulation*). Компьютерное моделирование в настоящее время – это основной метод научного познания действительности и проектирования технических устройств.

Программное обеспечение для построения компьютерных моделей также можно разделить на две группы по виду объектов моделирования: **универсальных** и **специализированных** систем.

Специализированные программные системы предназначены для построения моделей конкретных технических систем: транспортной, авиационной, электронной, гидравлической и т. д. При всех достоинствах этих систем они имеют ряд недостатков, главный из которых – то, что они практически все являются коммерческими, имеют большую стоимость и практически недоступны для учебного процесса в нашей стране. Кроме того, таким системам присуща достаточно узкая специализация.

Универсальные системы компьютерного моделирования являются **мультифизическими**, то есть включают в себя библиотеки моделей элементов раз-

личной физической природы: электрические, механические, гидравлические, пневматические и т. д. Кроме того, они имеют достаточно мощные инструменты решения математических задач. Наиболее распространенными среди подобных систем являются Matlab/Simulink фирмы MathWorks и AMESIM фирмы Siemens. Эти системы имеют много достоинств, но их основными недостатками являются излишняя громоздкость, высокие требования к ресурсам компьютера, высокая цена и отсутствие русскоязычной локализации. Кроме того, существуют санкционные ограничения для их легального использования. Это затрудняет использование этих систем в отечественных предприятиях и учебных заведениях.

Последнее время большинство ведущих научных и проектных учреждений нашей страны, таких как ОКБ Сухого, НПО машиностроения, МАИ, МЭИ, Атомпроект и т. д., стали использовать для разработки и моделирования сложных технических систем отечественный продукт SimInTech [16]. По своим функциональным возможностям этот программный комплекс аналогичен Simulink, позволяя решать практически все задачи, что и он. Отличие заключается в том, что SimInTech занимает более чем в 10 раз меньше памяти, работает быстрее и изначально спроектирован под русский язык интерфейса. Этот программный комплекс так же, как и Simulink, обладает готовыми библиотеками различных физических процессов (электрики, механики, гидравлики и пневматики и т. д.), а также развитыми библиотеками автоматики и программирования контроллеров. Дополнительные модули могут быть легко построены с помощью встроенного языка программирования, аналогичного Matlab. Дополнительным достоинством языка программирования SimInTech является возможность решения дифференциальных уравнений на его уровне без вызова дополнительных функций. Кроме этого, есть возможность подключения своих функций в формате .dll на любых языках программирования. Также можно осуществлять параллельную работу SimInTech и Simulink, используя модели последнего. SimInTech позволяет создавать комплексную модель, включающую в себя как реальные приборы и оборудование, так и разнообразные модели с помощью базы сигналов.

По своим функциональным возможностям данный программный комплекс почти идеально подходит для использования в учебном процессе. Поэтому инструментом моделирования всех процессов электропривода и его компонентов выберем программный комплекс SimInTech.

1.3. Механические характеристики электропривода

Электродвигатель переменного тока создает вращающий механический момент, который через передаточное устройство передается на технологическую установку. Таким образом, мы имеем механическую систему, которая включает в себя вращающиеся тела ротора электродвигателя, передаточных устройств, вращающихся частей технологической машины, а также самые разнообразные механические связи между ними (упругие и демпфирующие элементы, нели-

нейные элементы и т. д.). Классический подход к разработке электропривода конкретных технологических машин требует построения полной механической модели всей механической части электропривода.

Однако при рассмотрении принципов построения и функционирования управляемого электропривода, когда нас не интересует характер технологического оборудования, эту задачу упрощают, представляя механическую часть в виде одномассовой системы, на которую воздействуют два момента: вращающий электромагнитный момент двигателя $M_e(t)$ и тормозной момент (момент сопротивления) $M_c(t)$ со стороны технологической машины. На рис. 1.3а показана эта принятая механическая модель электропривода с асинхронным электродвигателем.

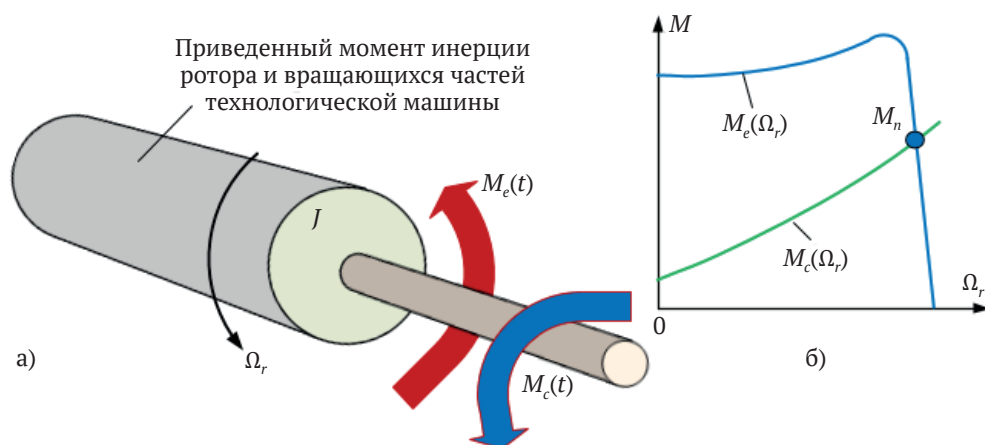


Рис. 1.3. Механическая модель электропривода (а) и механическая характеристика асинхронного электродвигателя (б)

В качестве момента инерции вращающегося тела J будем рассматривать приведенный к ротору электродвигателя момент инерции всех вращающихся частей электропривода (ротора, передаточного устройства и технологической машины). В дальнейшем этот суммарный момент инерции будем просто называть **моментом инерции ротора**. Единица измерения момента инерции – кгм^2 .

Согласно законам физики скорость вращательного движения ротора Ω_r измеряется в угловых радианах за секунду, рад/с. Однако в отечественном техническом языке скорость вращения ротора электрических машин принято называть **частотой вращения ротора**. Почему принято такое обозначение, мы поймем далее.

Кроме того, часто используется несистемная единица скорости вращения в числе оборотов за минуту, которая обозначается буквой n .

Согласно принятым допущениям механическая часть электропривода рассматривается как одномассовая система, математическая модель которой описывается следующим уравнением:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + M_c(t) = M_e(t), \quad (1.1)$$

где J – приведенный к ротору электродвигателя момент инерции всех вращающихся частей электропривода; $M_c(t)$ – момент сопротивления со стороны нагрузки электродвигателя; $M_e(t)$ – электромагнитный момент двигателя.

Одной из самых главных характеристик электропривода является его **механическая характеристика**. Это зависимость электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления нагрузки от частоты вращения ротора Ω_r . На рис. 1.36 показана такая типовая механическая характеристика асинхронного электропривода.

Момент сопротивления нагрузки может иметь самый разнообразный вид изменения во времени и зависимости от частоты вращения. Это прежде всего определяется характером и видом нагрузки в каждом конкретном случае. Для простоты рассмотрения интересующих нас вопросов примем, что момент сопротивления является суммой двух составляющих – активного момента нагрузки и вязкого трения, – имея следующий вид:

$$M_c(t) = M_{ca}(t) = k_c \Omega_r, \quad (1.2)$$

где k_c – коэффициент сопротивления вязкого трения.

Построить в программе SimInTech компьютерную модель механической части электропривода, согласно уравнениям (1.1) и (1.2), можно двумя способами. В первом случае запишем уравнение (1.1) в нормальной форме Коши:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e(t) - M_{ca}(t) - k_c \Omega_r), \quad (1.3)$$

и проинтегрируем правую часть этого уравнения.

На рис. 1.4 представлена модель механической части электропривода, построенная прямым решением уравнения (1.3).

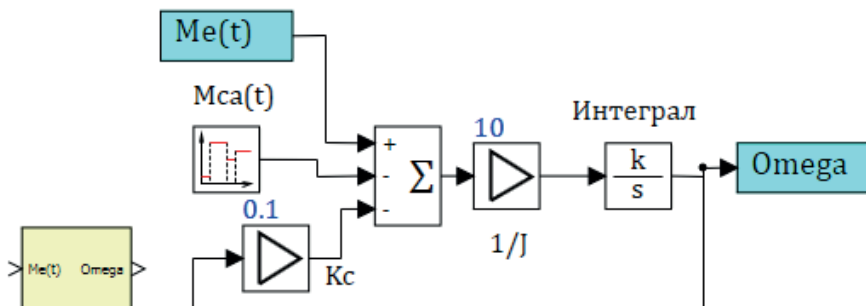


Рис. 1.4. Блок модели механической части электропривода, построенный путем прямого решения уравнения (1.3)

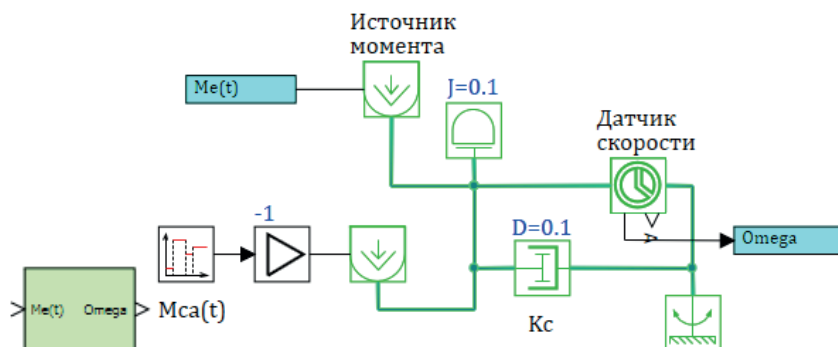


Рис. 1.5. Блок модели механической части электропривода, построенный с помощью блоков библиотеки «Механика»

Второй способ построения компьютерной модели механической части электропривода заключается в использовании библиотеки моделей элементов механических систем программы SimInTech. Эта библиотека содержит достаточно большое количество блоков, позволяя моделировать весьма сложные механические устройства.

На рис. 1.5 показана модель механической части электропривода, построенная с использованием блоков библиотеки «Механика» SimInTech. Модель включает в себя два блока источников вращающего момента: электромагнитного момента и активного момента сопротивления нагрузки, блок момента инерции и блок вязкого трения. Для обеспечения получения информации о частоте вращения ротора используется блок датчика параметров механического вращения. Обе эти модели представлены в файле «Механика.prt». Более подробно со всеми элементами библиотеки «Механика» можно ознакомиться в справочнике по SimInTech [16].

1.4. Электродвигатели переменного тока

Устройством, преобразующим электрическую энергию в механическую в системе электропривода, является электрический двигатель. Конструкции электродвигателей весьма разнообразны, они подразделяются на двигатели с вращающимся ротором и линейно перемещающимся ротором, питающиеся постоянным током или переменным и т. д. В настоящее время наибольшее распространение в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве получили электродвигатели переменного тока. Стоит отметить, что почти 30 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии потребляются различными электроприводами на основе электрических двигателей переменного тока. Основными типами электродвигателей переменного тока являются вращающиеся асинхронные и синхронные электрические машины. Принцип действия данных электрических машин состоит в том, что многофазная обмотка, которая расположена на неподвижной части электродвигателя (статоре), создает внутри него вращающееся магнитное поле. Это магнитное поле, взаимодействуя

с магнитным полем вращающейся части (ротором), заставляет ротор вращаться вслед за собой. Рассмотрим этот процесс более подробно.

На статоре машины переменного тока находится сердечник магнитопровода из специальной электротехнической стали, в пазы которого укладываются катушки m -фазной обмотки, как это показано на рис. 1.6а. Каждая катушка обмотки укладывается в соответствующие пазы магнитопровода, а две остальные стороны катушек располагаются с торцов магнитопровода, образуя лобовые части обмотки. Для получения вращающегося магнитного поля число фаз обмотки должно быть больше или равно двум ($m \geq 2$), и эти обмотки должны подключаться к m -фазному переменному напряжению. Из-за того, что во всем мире используется трехфазная система электроснабжения, практически все электродвигатели имеют число фаз, равное трем. Хотя изготавливаются и двухфазные электродвигатели, которые принято называть однофазными, и двигатели с числом фаз обмотки статора больше чем три.

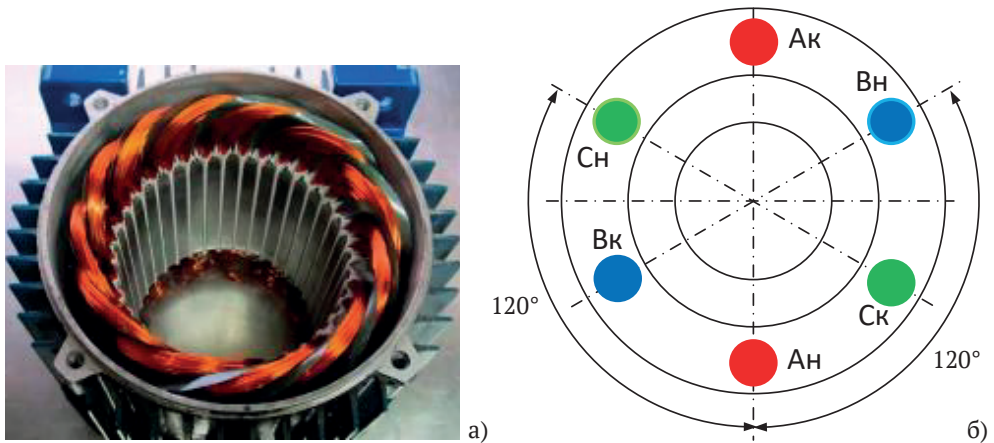


Рис. 1.6. Конструкция статора машины переменного тока (а) и расположение катушек фаз обмоток в пространстве (б)

На рис. 1.6б показан поперечный разрез статора. В самом простейшем случае плоскости катушек обмотки располагаются в пазах статора, как это показано на рис. 1.6б, то есть со смещением в пространстве на угол $2\pi/3$ (120°) друг от друга. Обозначим буквами «н» условную начальная часть катушки обмотки каждой фазы (Ан, Вн, Сн) и буквой «к» вторую часть соответствующей катушки, расположенную в другом пазе статора (Ак, Вк, Ск).

Катушки обмотки статора подключаются к трехфазной сети по двум схемам: звездой (рис. 1.7а) или треугольником (рис. 1.7б).

При подаче напряжения на обмотки статора по ним начинают протекать токи. Поскольку каждая фаза напряжения (фазное напряжение) сдвинута во времени относительно другой на одну треть его периода, то и токи, протекающие по фазным катушкам, будут также сдвинуты во времени на одну треть периода, как это показано на рис. 1.8а.

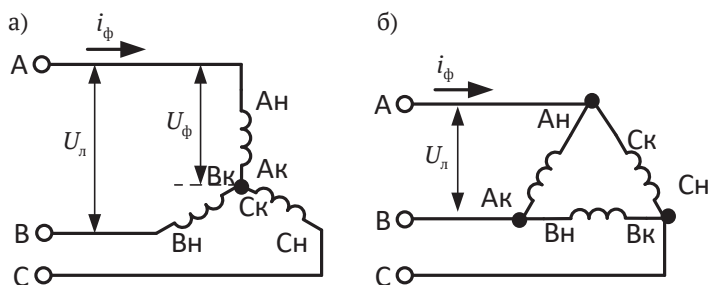


Рис. 1.7. Схемы подключения катушек обмотки статора: звездой (а) и треугольником (б)

Как известно из курса физики, если через проводник протекает электрический ток, то вокруг него возникает магнитное поле. Силовые линии индукции этого магнитного поля определяются по «правилу буравчика» – если направить буравчик по течению тока, то вращение рукоятки буравчика показывает направление замыкания силовых линий магнитного поля. На рис. 1.8б показана упрощенная картина создания магнитного поля при протекании электрического тока по одной катушке (фаза А) обмотки ротора. Примем, что электрический ток при положительном полупериоде направлен так, как показано на этом рисунке: в пазе начала катушки он протекает внутрь плоскости рисунка (знак крестика), а в другой половине катушки – из плоскости чертежа (знак точки). При отрицательном полупериоде тока катушки направление его протекания обратное – в начальном пазу ток вытекает из плоскости чертежа, а в конечном пазу втекает в плоскость чертежа.

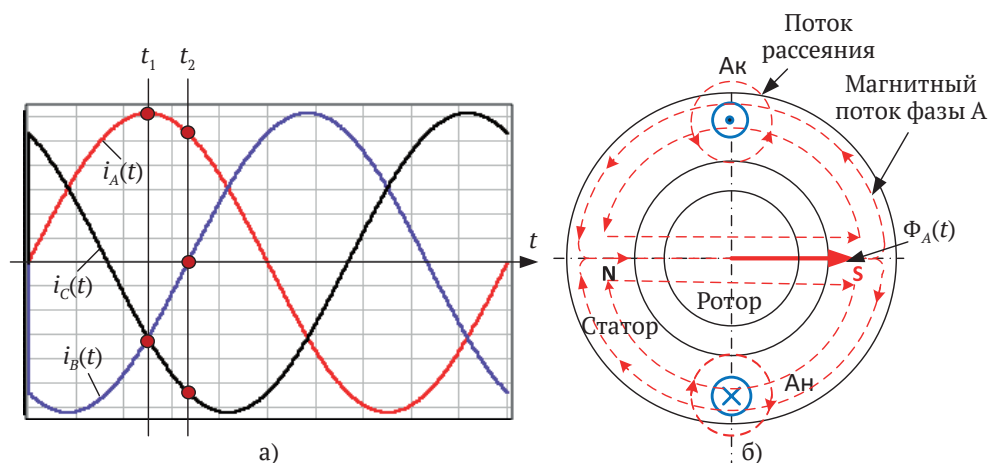


Рис. 1.8. Диаграмма мгновенного значения токов в катушках обмотки (а) и магнитные потоки фазы А (б)

Силовые линии магнитного поля должны быть замкнуты. Поскольку для силовых линий магнитного поля воздух и немагнитные части конструкции

электродвигателя обладают высоким сопротивлением, то через них замыкается лишь незначительная часть силовых линий, которые называются **магнитным потоком рассеяния**. Большая часть силовых линий проходят по магнитопроводу статора и по кратчайшему расстоянию в воздушном зазоре через ротор опять в магнитопровод статора, где и замыкаются. Таким образом, на одной стороне статора, откуда выходят силовые линии магнитного поля, образуется северный магнитный полюс (N), а на другой стороне статора, где силовые линии входят, – южный магнитный полюс (S). Эти силовые линии, проходя по магнитопроводу статора, собственно, и формируют **магнитный поток статора**.

Магнитный поток, протекающий через некоторую плоскость, – это физическая величина, равная произведению индукции магнитного поля на площадь данной плоскости:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1.4)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; B – индукция магнитного тока, Тл; S – площадь плоскости, м².

Или, упрощенно, магнитный поток – это количество силовых линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность. Единица измерения магнитного потока называется **вебер** (сокращенно Вб).

Поскольку магнитный поток статора пропорционален току, протекающему по катушке обмотки, то его величина и полярность определяются соответствующей амплитудой и знаком тока. При смене знака тока в катушке на рис. 1.8б полярность магнитного потока меняется на обратную – вместо северного полюса становится южный.

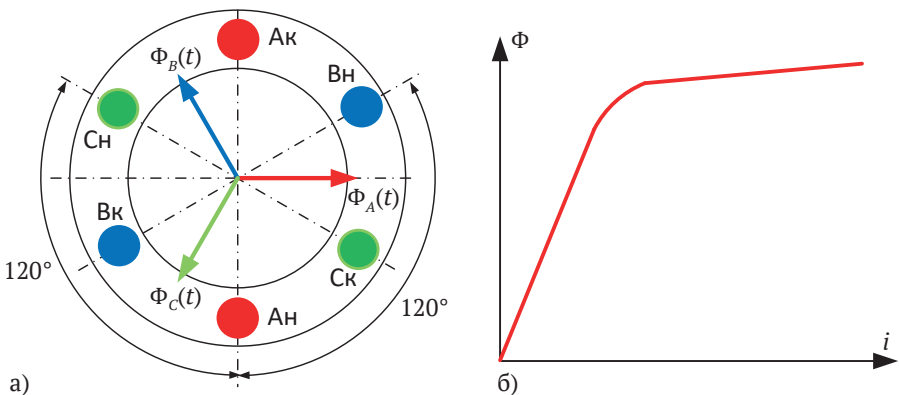


Рис. 1.9. Векторы магнитного потока (а) и кривая насыщения магнитного потока (б)

Поэтому можно условно обозначить магнитный поток каждой катушки в виде некоторого вектора $\vec{\Phi}(t)$, перпендикулярного плоскости этой катушки, модуль и направление которого изменяются во времени согласно изменению тока катушки. На рис. 1.9а показаны векторы магнитного потока для трехфазной обмотки.

Однако следует не забывать, что зависимость модуля вектора магнитного потока статора от тока в катушках линейна не во всем диапазоне изменения ее амплитуды. Из-за насыщения магнитной цепи статора зависимость магнитного потока от амплитуды тока обмотки статора имеет вид, изображенный на рис. 1.9б.

Три катушки на статоре, сдвинутые в пространстве на угол 120° , по которым протекают переменные трехфазные токи, имеющие временной сдвиг на одну треть периода друг от друга, позволяют получить **вращающееся магнитное поле** внутри статора.

Рассмотрим процесс получения вращающегося магнитного поля более подробно. На рис. 1.10а показано направление токов в катушках обмоток в случае, если значение токов в них соответствует времени t_1 на графике рис. 1.8а. В этом случае поскольку направление и величина магнитного тока определяются значениями токов, то полюса суммарного магнитного поля обмотки статора располагаются горизонтально, а распределение тока внутри окружности статора диаметром D имеет синусоидальный характер.

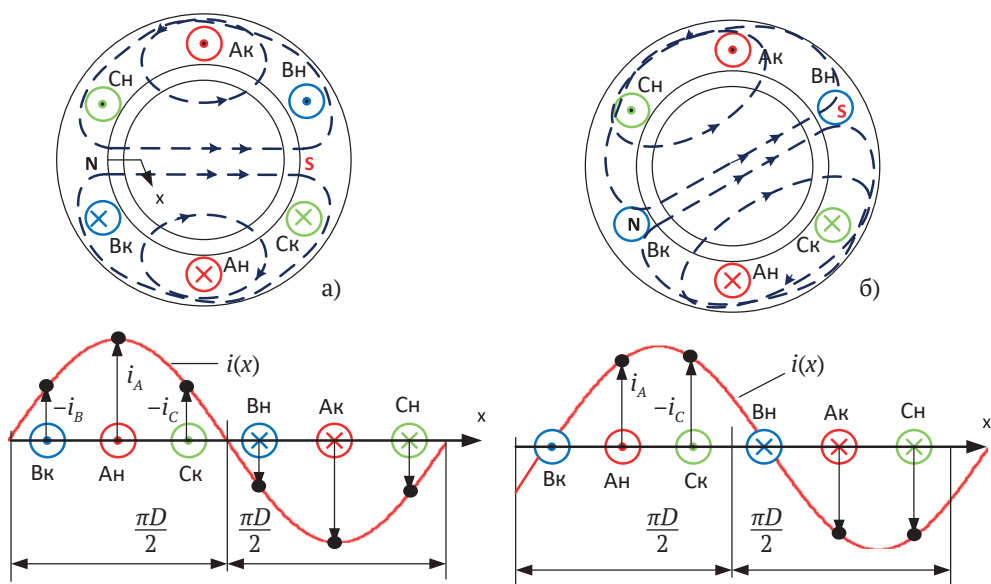


Рис. 1.10. Состояние магнитного поля статора и распределения тока по его поверхности при времени t_1 (а) и времени t_2 (б)

Через промежуток времени, равный $1/12$ периода изменения тока (время t_2 на рис. 1.8а), значение токов в обмотках меняется, а вместе с этим меняется картина распределения силовых линий магнитного поля в пространстве. Теперь полюса суммарного магнитного поля статора отклонятся на угол 30° от горизонтали, как это показано на рис. 1.10б. Синусоидальный характер распределения тока внутри статора сохраняется, только сама синусоида сдвинется против часовой стрелки на тот же угол в 30° .

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru