

## ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины переменного тока с вращающимся магнитным полем являются основными элементами энергетических и электрических установок и могут работать в двигательном и генераторном режиме. Начало их разработки восходит к последней четверти XIX века, когда стало очевидным, что без переменного тока электротехника в дальнейшем развиваться не сможет. Первыми разработкой занимались итальянский физик Г. Феррарис и инженер-электрик изобретатель серб Н. Тесла. Созданные ими двигатели с вращающимся магнитным полем на основе двухфазной системы переменного тока не смогли найти практического применения. Решил задачу в пользу переменного тока наш соотечественник – электротехник М. О. Доливо-Добровольский, предложивший трехфазную систему переменного тока. Ему удалось решить основные проблемы, связанные с конструкцией двигателя. Первой демонстрацией практического применения трёхфазного двигателя и трехфазной системы электроснабжения стала Международная электротехническая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне. Простой и надежный трёхфазный двигатель получил широкое распространение и послужил стимулом для развития техники переменных токов и электроэнергетики в целом.

Принцип действия асинхронной машины основан на электромагнитном взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами проводников статорной и роторной обмотки.

Если во вращающееся магнитное поле поместить замкнутый проводник в виде рамки, укрепленной на оси, то магнитное поле при вращении пересечёт стороны рамки, наведёт в них ЭДС, которая создаст в рамке ток. Магнитное поле тока рамки, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, приведёт рамку во вращение в направлении вращения магнитного поля. При приближении частоты вращения рамки к частоте вращения магнитного поля скорость изменения пронизывающего рамку магнитного потока уменьшается, следовательно, уменьшается наводимая в рамке ЭДС и ток в рамке. Если допустить, что частоты вращения рамки достигла частоты вращения магнитного поля, то ЭДС и ток в рамке будут равны нулю. Момент сил, действующих на рамку, также станет равным нулю. Под действием сил трения рамка начнет останавливаться. С уменьшением частоты вращения рамки снова возрастают скорость изменения магнитного поля, возрастает вра-

щающий момент, который в итоге при равномерном вращении рамки будет равен моменту сопротивления.

Таким образом, частота вращения  $n_2$  рамки всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ . Этот принцип взаимодействия вращающегося магнитного поля с током рамки определяет двигательный - основной режим работы асинхронной машины.

В асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле создают токи статорной обмотки из катушек медного провода, включённой в электрическую сеть. Магнитопровод образуют сердечники статора и ротора, набранные из штампованных листов электротехнической стали с пазами для обмоток. Роль замкнутых рамок исполняет литая из алюминия в виде беличьей клетки обмотка ротора (короткозамкнутые асинхронные двигатели, рис. В.1) или подобная статорной обмотке из катушек медного провода (асинхронные двигатели с фазным ротором, рис. В.2). У двигателя с фазным ротором три вывода от роторной обмотки соединены с контактными кольцами, расположенными на валу, к которым посредством токосъёмных щеток подключают добавочные активные сопротивления, позволяющие ограничить пусковой ток, увеличить пусковой момент, а также регулировать в определённом диапазоне частоту вращения двигателя.

Относительная разность частот вращения магнитного поля  $n_1$  и ротора  $n_2$  называется скольжением ротора  $s = (n_1 - n_2)/n_1$ . Частота вращения ротора (частота вращения асинхронного двигателя)  $n_2 = n_1(1 - s)$ .

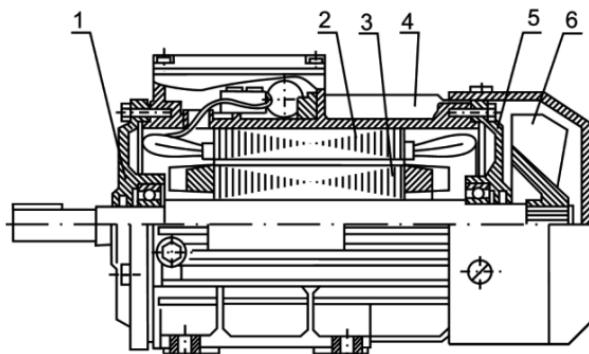
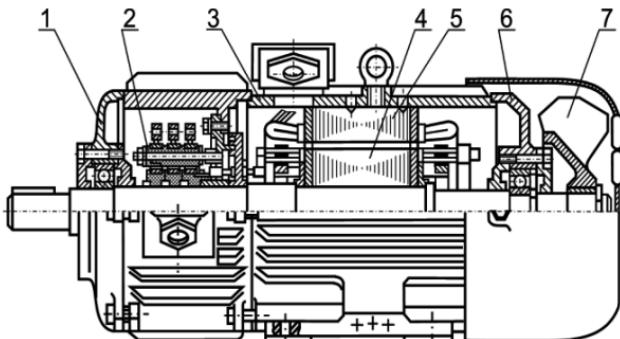


Рис. В.1.

Устройство двигателя с короткозамкнутым ротором:  
1, 5 – щиты подшипниковые, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – станина, 6 – вентилятор



**Рис. В.2.**

Устройство двигателя с фазным ротором: 1, 6 – щиты подшипниковые, 2 – щеткодержатель, 3 – станина, 4 – ротор, 5 – статор, 7 – вентилятор

Широкое применение и также развитие международной торговли привело к необходимости стандартизации электродвигателей, как национальной, так и международной. Международная стандартизация осуществляется Международной электротехнической комиссией – МЭК (International Electrotechnical Commission - IEC). В этой связи короткозамкнутые асинхронные двигатели общего назначения называют стандартными асинхронными двигателями. Их выпускают в виде единых серий с определенной шкалой номинальной мощности и высоты оси вращения. Высота оси вращения определяет габарит двигателя.

*Номинальной мощностью* называют мощность на валу в режиме работы, для которого двигатель предназначен изготовителем.

Шкала номинальной мощности двигателей отечественных единых серий 4А, АИР, 5А, А, 6А, 7А: 0,06-0,09-0,12-0,18-0,25-0,37-0,55-0,75-1,1-1,5-2,2-3-4-5,5-7,5-11-15-18,5-22-30-37-45-55-75-90-110-132-160-200-250-315 кВт.

Шкала высоты оси вращения (габарит двигателя): 56-63-71-80-90-100-112-132-160-180-200-225-250-280-315-355 мм.

Степень защиты двигателей обозначается буквами IP (International Protection) и двумя цифрами. Основные исполнения двигателей по степени защиты (ГОСТ 14254):

- закрытое обдуваемое исполнение IP44 – внутрь двигателя не могут попасть твердые тела размером более 1 мм. Вода, разбрызгиваемая на двигатель, не оказывает на него вредного действия;

- закрытое обдуваемое исполнение IP54 – проникновение внутрь двигателя пыли не предотвращено полностью, однако не в количестве, достаточном для нарушения его работы. Вода, разбрызгиваемая на двигатель, не оказывает вредного действия;
- закрытое обдуваемое исполнение IP55 – подобное исполнению IP54 с защитой от попадания струй воды.

Двигатели могут изготавливаться для эксплуатации в макроклиматических районах (табл. В.1):

У – с умеренным климатом;

Т – с тропическим климатом;

ОМ – с морским климатом,

а также в условиях, определяемых категориями размещения:

1 – на открытом воздухе;

2 – под навесом при отсутствии прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков;

3 – в закрытых помещениях без искусственного регулирования климатических условий;

5 – в помещениях с повышенной влажностью.

Таблица В.1  
Климатическое исполнение и категория размещения

Климатическое исполнение	Категория размещения	Рабочая температура	
		Верхнее значение	Нижнее значение
У	1 или 2	+40	-45
У	3	+40	-45
Т	2	+50	-40
ОМ	2	+45	-10

Основной модификацией двигателей по климатическому исполнению и категории размещения является У3.

В двигателях предусмотрены три установочные длины станины S, L, M, две длины сердечника статора А и В, а также монтажные исполнения групп (ГОСТ 2479): IM1 – двигатели на лапах, IM2 – двигатели на лапах с фланцем, IM3 – двигатели без лап с фланцем и другие (рис. В.3).

Основные монтажные исполнения IM1001, IM2001, IM3001, IM2101, IM3601. В обозначении монтажных исполнений вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, четвертая – исполнение конца вала (1 – с одним цилиндрическим, 2 – с двумя цилиндрическими, 3 – с одним коническим).

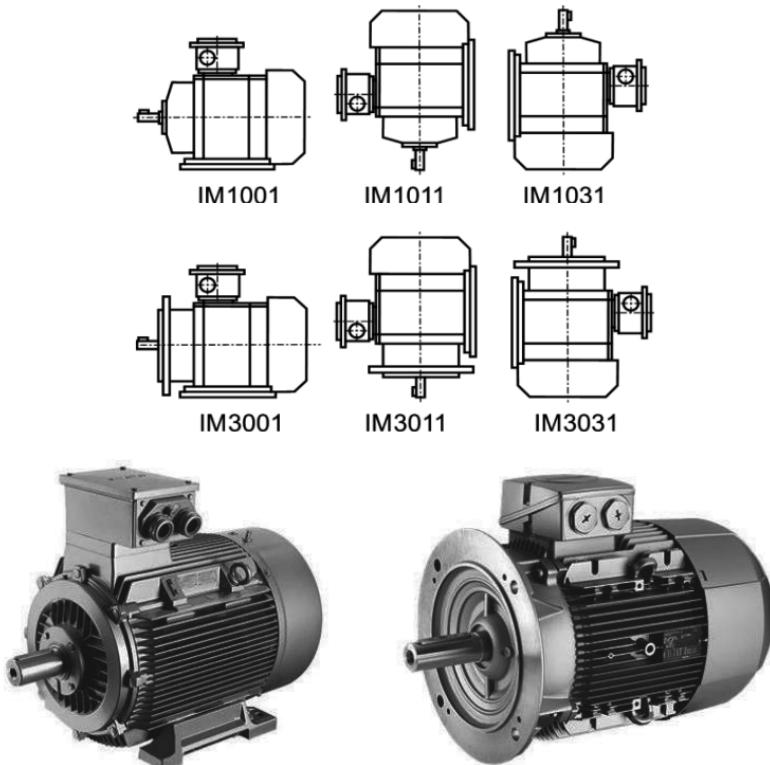


Рис. В.3.  
Обозначение монтажных исполнений и вид стандартных двигателей

Обозначение асинхронных двигателей основной модификации по климатическому исполнению и категории размещения УЗ:

АИР180S2У3 – двухполюсный асинхронный двигатель единой серии АИР высотой оси вращения 180 мм и длиной станины S;

А100L4У3 – четырёхполюсный асинхронный двигатель единой серии А высотой оси вращения 100 мм и длиной станины L;

5А132М6У3 – шестиполюсный асинхронный двигатель единой серии 5А высотой оси вращения 200 мм и длиной станины М.

Наряду с основным исполнением в единых сериях предусмотрены и ряд модификаций асинхронных двигателей, среди них:

- *двигатели с повышенным скольжением* для привода оборудования, характеризуемого наличием относительно больших инерционных масс, неравномерной нагрузкой, большой частотой пусков и реверсов (пример обозначения АИРС90Л6У3);

- *двигатели с повышенным пусковым моментом* для привода машин и механизмов с большими статическими и динамическими моментами, например транспортеров, центрифуг, сепараторов (пример обозначения АИРР160L4У3);
- *двигатели многоскоростные* (примеры обозначения АИР90L4/2У3, АИР200L12/8/6/4У3);
- *двигатели со встроенным электромагнитным тормозом* для быстрого торможения при отключении питания. При подаче напряжения на двигатель происходит его растормаживание. Тормозная система приводится в действие электромагнитом постоянного тока, который питается от электрической сети через выпрямитель (примеры обозначения АИР112S4ЕЭУ3, АИР100S8/2ЕЭУ3);
- *двигатели со встроенными терморезисторами*, которые совместно с электронным блоком управления обеспечивают защиту статорной обмотки от недопустимого перегрева (пример обозначения АИР80А2БУ3);
- *однофазные двигатели с рабочим конденсатором* (пример обозначения АИРЕ56А2У3), с пусковым конденсатором (пример обозначения АИРУ56А2У3), с пусковым и рабочим конденсаторами (пример обозначения АИРУЕ71А4У3);
- *другие модификации* (встраиваемые, для сельскохозяйственного оборудования, для моноблочных насосов, пожароустойчивые, крановые и т.д.).

Асинхронные двигатели выпускают и отдельными узкоспециализированными сериями, например крановые, тяговые, сельскохозяйственного назначения, другие.

Номинальная мощность стандартных асинхронных двигателей приводится в каталогах технических данных для продолжительного режима работы S1 (ГОСТ 183), кроме двигателей с повышенным скольжением. Режим работы S1 характеризуется продолжительностью работы достаточной для достижения практически установленной температуры всех частей двигателя при неизменной нагрузке.

Для двигателей с повышенным скольжением номинальные данные приводятся для режима работы S3 и продолжительности включения 40% (ПВ = 40%).

Режим работы S3 – это последовательность идентичных циклов, каждый из которых включает время работы при неизменной

нагрузке, за которое двигатель не нагревается до установившейся температуры, и время стоянки, за которое двигатель не охлаждается до температуры окружающей среды.

Продолжительность включения в процентном измерении указывает на продолжительность работы асинхронного двигателя во временном цикле, как правило, равном 10 минутам.

Для двигателей с электромагнитным тормозом номинальные данные соответствуют режиму работы S4 и ПВ = 40% (для двухскоростных двигателей ПВ = 40/15%).

Режим работы S4 – это последовательность идентичных циклов, каждый из которых включает время пуска, достаточно длительное для того, чтобы потери при пуске двигателя оказывали влияние на температуру его частей, время работы при постоянной нагрузке, за которое двигатель не нагревается до установившейся температуры, и время стоянки, за которое двигатель не охлаждается до температуры окружающей среды.

Надежность асинхронных двигателей обеспечивают высококачественные изоляционные материалы и обмоточные провода (табл. В.2), подшипники со смазкой на весь срок службы. Температурный запас изоляции определяет ресурс статорных обмоток не менее 20000 часов.

Таблица В.2

**Проводниковые и изоляционные материалы двигателей**

Наименование элемента	Наименование материала
Провод обмоточный (М – для механизированной укладки)	Провод ПЭТ-155, ПЭТМ-155
	Провод ПЭТД-180
Провод выводной	Провод ПВКФ-660, ПВФС-660, ПВКВ-660
Изоляция пазовая	Плёнка полизиэлентерефталатная ПЭТ-Э
	Синтофлекс 818(ПСКА-М), 616(ПСКЛА-М)
	Стеклотекстолит СТЭФ
Изоляция межфазовая	Стеклолакоткань ЛСК-155/180
	Стеклоплёнкослюдопласт ГИП-ЛСП-ПЛ(в)
Бандаж лобовых частей	Шнур-чулок АСЭЧ(б)
Изоляция паяк и концов катушек	Стеклолакоткань ЛСК-155/180
	Трубка 133, ТКСП,
	Трубка 203, ТКР
Лак пропиточный	Лак полизифирный ПЭ-9153М

Повышению ресурса двигателей способствовало применение изоляции класса нагревостойкости  $F$  при превышении температуры обмоток, соответствующем классу нагревостойкости  $B$ . Класс нагревостойкости изоляционных материалов определяет максимально допустимая температура. Для статорной обмотки она получается вычитанием из температурного индекса материала изоляции номинальной температуры окружающей среды - для умеренного климата  $40^{\circ}\text{C}$  (табл. В.3).

*Таблица В.3*  
**Нагревостойкость изоляционных материалов**

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс материала, $^{\circ}\text{C}$	Максимальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки, $^{\circ}\text{C}$	Максимально допустимое превышение средней температуры обмотки, измеренное по методу сопротивления, $^{\circ}\text{C}$
B	130	90	80
F	155	115	100
H	180	140	125

При выпуске асинхронных двигателей декларирование сервис-фактора означает, что двигатель, работающий при номинальном напряжении и частоте тока, может быть перегружен до мощности, получаемой умножением номинального значения на сервис-фактор. Обычно сервис-фактор равен 1,15. При этом превышение температуры обмоток должно быть не более  $90^{\circ}\text{C}$  и  $115^{\circ}\text{C}$  для систем изоляции класса нагревостойкости  $B$  и  $F$  соответственно. Применение двигателей с сервис-фактором позволяет работать с перегрузками до 15 % и эксплуатировать их при существенных колебаниях напряжения и при повышенной температуре окружающей среды без снижения нагрузки. При равномерном распределении перегрузок во всем временном интервале допустимая суммарная длительность работы двигателя перегрузкой на 15 % составляет треть ресурса. Двигатели с изоляцией класса нагревостойкости  $F$  и превышением температуры обмоток, соответствующему классу нагревостойкости  $B$ , автоматически имеют сервис-фактор 1,15.

Тенденции совершенствования асинхронных двигателей исходят из требований повышения их энергоэффективности, основными показателями которой являются КПД и коэффициент мощности  $\cos\phi$ . В зависимости от требований к уровню энергоэффективности асинхронные двигатели по ГОСТ Р 51677–2000 подразде-

ляются на двигатели с нормальным КПД и двигатели с повышенным КПД (энергосберегающие двигатели). Энергосберегающие двигатели имеют суммарные потери на 20% ниже, чем двигатели с нормальным КПД той же мощности и частоты вращения. ГОСТ Р 51677–2000 регламентирует и значение cosφ.

Общие мероприятия по созданию энергосберегающих двигателей связаны со снижением потерь в обмотках статора и ротора, в магнитопроводе, вентиляционном узле и подшипниках. Так, при проектировании двигателей единой серии 7А предусматривалось повышение КПД на 1,5–3,5 %. Двигатели этой серии адаптированы для работы в системе частотно-регулируемого привода.

Очевидно, что производство энергосберегающих двигателей связано с дополнительными затратами.

На стандартные асинхронные двигатели до 100 кВт приходится большая часть электроэнергии, потребляемой всеми асинхронными двигателями, при этом значительная их доля приходится на приводы вентиляторов и насосов. Для экономичной эксплуатации двигателей необходимо установить, насколько они соответствуют производственным механизмам. Требуемый механизмом момент, который приходится преодолевать двигателю, называется моментом сопротивления механизма. Зависимость частоты вращения механизма от момента сопротивления называется механической характеристикой механизма. Механические характеристики механизмов классифицируют на следующие основные категории:

*механическая характеристика, не зависящая от частоты вращения* (скорости). Такой характеристикой обладают подъемные краны, лебедки, конвейеры;

*механическая характеристика нелинейно возрастающая*. Такая характеристика у вентиляторов, центробежных насосов;

*механическая характеристика нелинейно-спадающая*, когда момент сопротивления изменяется обратно пропорционально частоте вращения. Такая характеристика у металлорежущих станков.

В приводах механизмов с определенным видом механических характеристик эксплуатационные показатели двигателей зависят от степени их загрузки. Большинство двигателей работают с загрузкой ниже номинальной, поскольку при проектировании привода двигатели подбирают с определённым запасом, учитываяющим особенности конкретного технологического процесса, а также кратность начального момента сопротивления механизмов (табл. В.4).

Таблица В.4

## Степень загрузки двигателей

Наименование механизмов	Степень загрузки
Вентиляторы	0,7-0,9
Насосы	0,5-0,9
Шнеки	0,7-0,8
Задвижки	0,7-0,8
Дробилки	0,4-0,9
Питатели, дозаторы	0,7-0,9
Нории	0,7-0,8
Центрифуги, сепараторы	0,6-0,9
Пилы	0,7-0,9
Компрессоры	0,7-0,9
Машины барабанного типа	0,7-0,9
Вибраторы	0,3-0,9
Металлорежущие станки	0,3-0,7
Шлифовальные машины	0,7-0,9

Чем меньше степень загрузки асинхронного двигателя, тем больше относительная величина реактивной мощности и тем менее эффективно работает сам двигатель и питающие его энергетические установки. Реактивная мощность является фактором, приводящим к таким отрицательным явлениям, как дополнительные потери в проводах, завышение сечения кабелей, отклонение напряжения сети от номинальной величины. Транспортировка реактивной мощности по электрическим сетям представляет важную технико-экономическую проблему. Потери от реактивной мощности в сетях относят к техническим потерям. При оценке же эксплуатационного КПД асинхронного двигателя потери в сети от реактивного тока приводят к потерям самого двигателя.

В приводе техники с большим начальным моментом сопротивления увеличение пускового момента двигателя за счёт большей установленной мощности приводит к снижению степени его загрузки в рабочем режиме, а также к росту пускового тока - другой проблеме короткозамкнутых двигателей. Вопрос о том, допустим ли прямой пуск, определяется величиной снижения напряжения в сети при пуске. Наиболее чувствительными к снижению напряжения являются осветительные приборы, а также магнитные пускатели, которые при понижении напряжения могут отключиться и отсоединить двигатель от сети.

На эксплуатационные показатели асинхронных машин влияют и их параметры, обусловленные схемными признаками статорных обмоток. Современные методы формирования схем статорных обмоток позволяют расширить поиск способов повышения эксплуатационных свойств асинхронных двигателей, например приведением в соответствие степени загрузки с реактивной мощностью, использованием определённых приёмов снижения пускового тока, упрощением схем коммутации при переключении полюсов многоскоростных двигателей.

Свойство обратимости электрических машин позволяет применить асинхронную машину и в качестве генератора автономной электростанции. Асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором положительно характеризуются малыми габаритами и прочностью ротора. Они меньше подвержены негативному воздействию внешних климатических факторов, а генерируемое напряжение практически не содержит заметных амплитуд высших гармоник. Недостаток асинхронных генераторов связан со сложностью регулирования тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия индуктивных составляющих токов нагрузки и ротора. Этот недостаток в большей степени проявляется при подключении к автономной электростанции короткозамкнутых двигателей.

В настоящем учебном пособии наряду с общими положениями теории асинхронных электрических машин основное внимание уделено методам формирования рациональных схем статорных обмоток стандартных, многоскоростных и однофазных асинхронных двигателей, асинхронных генераторов автономных электростанций.

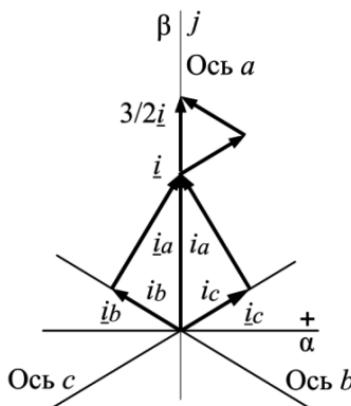
Учебное пособие предназначено студентам электротехнических специальностей высших учебных заведений (направления подготовки: 140400 «Электроэнергетика и электротехника»; 110300.62 «Агроинженерия» – специальность 110302.65 «Электрооборудование и электротехнологии в АПК»).

Оно может быть полезно инженерно-техническому персоналу, занятому производством и капитальным ремонтом асинхронных электрических машин.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Влияние схемных и конструктивных признаков статорных и роторных обмоток на параметры и характеристики асинхронных машин обусловлено физическими явлениями при преобразовании энергии. Изучение физических явлений в электромеханических преобразователях энергии осуществляют преимущественно методами математического моделирования. При математическом моделировании асинхронной машины предварительно изучают её идеализированный вариант, который характеризуется электрической и магнитной симметрией, равномерным воздушным зазором, отсутствием насыщения, распределением магнитодвижущей силы (МДС) в воздушном зазоре по гармоническому закону. Процессы в асинхронных машинах на разное число пар полюсов  $p$  идентичны, и математическое моделирование осуществляют для  $p = 1$ .

При моделировании электромагнитные величины асинхронной машины представляют в виде обобщённых пространственных векторов. Под обобщённым пространственным вектором понимают вектор, проекции которого на оси фазных обмоток в любой момент времени равны мгновенным значениям фазных величин, представляемых этим вектором. Так, если ток в каждой статорной фазной обмотке представить вектором  $(i_a, i_b, i_c)$ , модуль которого равен мгновенному значению фазного тока  $(i_a, i_b, i_c)$ , а направление совпадает с осью обмотки, и сложить эти векторы, то получим пространственный вектор тока  $(3/2)i$  (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.**

К определению обобщенного вектора тока

Модуль пространственного вектора тока в 3/2 раза больше модуля вектора тока  $\underline{i}$ , проекции которого на оси фазных обмоток равны мгновенным значениям токов  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ . Таким образом, для того, чтобы вектор, полученный сложением фазных векторов, соответствовал определению пространственного вектора, его необходимо умножить на 2/3.

Обобщённый вектор тока трёхфазной машины на комплексной плоскости ( $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$  – множитель трёхфазной системы или оператор поворота векторов в положительном направлении на  $120^\circ$ )

$$\underline{i} = \frac{2}{3} j(i_a + \mathbf{a} i_b + \mathbf{a}^2 i_c).$$

Для токов  $i_a = I_m \sin \omega t$ ,  $i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ ,  $i_c = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$ :

$$\begin{aligned} \underline{i} &= j \frac{2I_m}{3} \left[ \sin \omega t + (\sin \omega t - 120^\circ) \mathbf{a} + (\sin \omega t + 120^\circ) \mathbf{a}^2 \right] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left[ \sin \omega t + \sin \omega t \cos 120^\circ \cdot \mathbf{a} - \cos \omega t \sin 120^\circ \cdot \mathbf{a} + \right. \\ &\quad \left. + \sin \omega t \cos 120^\circ \cdot \mathbf{a}^2 + \cos \omega t \sin 120^\circ \mathbf{a}^2 \right] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left( \sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t \cdot \mathbf{a} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \cdot \mathbf{a} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \sin \omega t \cdot \mathbf{a}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \cdot \mathbf{a}^2 \right) = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left( \sin \omega t \left( 1 - \frac{1}{2} (\mathbf{a} + \mathbf{a}^2) \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t (\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \right) = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left( \frac{3}{2} \sin \omega t - j \frac{3}{2} \cos \omega t \right) = I_m (\sin \omega t - j \cos \omega t) = \\ &= j I_m \frac{1}{2} \left( \frac{1}{j} e^{j\omega t} - \frac{1}{j} e^{-j\omega t} - j e^{j\omega t} - j e^{-j\omega t} \right) = I_m e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

МДС фазных обмоток:

$$F_a = F_{am} \sin \omega t;$$

$$F_b = F_{bm} \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$F_c = F_{cm} \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где  $F_{am}$ ,  $F_{bm}$  и  $F_{cm}$  – амплитуды МДС на оси фазных обмоток.

При смещении фазных обмоток на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ , и учитывая, что  $F_{am} = -(F_{bm} + F_{cm})$ , модуль МДС трёхфазной обмотки:

$$\begin{aligned} F_m &= F_{am} + F_{bm} \cos 120^\circ + F_{cm} \cos 240^\circ = \\ &= -F_{bm} - F_{cm} + F_{bm} \cos 120^\circ + F_{cm} \cos 240^\circ = \\ &= -F_{bm}(1 - \cos 120^\circ) - F_{cm}(1 - \cos 240^\circ) = \\ &= -F_{bm}\left(1 + \frac{1}{2}\right) - F_{cm}\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2}F_{am} = 1,5F_{am}. \end{aligned}$$

Обобщённый вектор МДС  $\underline{F} = 1,5F_m e^{j\omega t}$ , как и обобщённый вектор тока, вращается с угловой скоростью  $\omega$ .

Векторную сумму токов статора и ротора образует ток намагничивания  $\underline{i}_\mu$ , и потокосцепления статора и ротора можно представить через основной магнитный поток

$$\underline{\psi}_m = M(\underline{i}_1 + \underline{i}_2) = M\underline{i}_\mu$$

и через потоки рассеяния

$$\underline{\psi}_{1\sigma} = L_{1\sigma} \underline{i}_1,$$

$$\underline{\psi}_{2\sigma} = L_{2\sigma} \underline{i}_2$$

в виде:

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_1 &= L_1 \underline{i}_1 + M \underline{i}_2 = (L_{1\sigma} + M) \underline{i}_1 + M \underline{i}_2 = \\ &= L_{1\sigma} \underline{i}_1 + M \underline{i}_\mu = \underline{\psi}_{1\sigma} + \underline{\psi}_m; \\ \underline{\psi}_2 &= \underline{\psi}_{2\sigma} + \underline{\psi}_m. \end{aligned}$$

Индуктивность статорной обмотки  $L_1$  включает индуктивность от потока рассеяния  $L_{\sigma 1}$ , индуктивность от части основного потока, созданного фазной обмоткой  $I_m$ , и индуктивность от части основного потока, созданной другими фазными обмотками  $I_m/2$ . Полная взаимная индуктивность трёхфазной обмотки  $M = 1,5I_m$ .

Уравнение напряжения фазной статорной обмотки в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ , связанной со статором, и уравнение напряжения фазной роторной обмотки во вращающейся системе координат  $xy$ , связанной с ротором:

$$\underline{u}_1 = \underline{i}_1 R_1 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt}.$$

$$\underline{u}_2 = \underline{i}_2 R_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt}.$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)