И. И. Алиев

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМАХ

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ
РадиоСофт
МОСКВА
2004

УДК 621.3(035)
ББК 31.26
А50

Рецензент:
В. Я. Беспалов, доктор технических наук,
профессор, кафедра электромеханики МЭИ(ТУ)

Алиев И. И.

А50 Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах.— М.: ИП РадиоСофт, 2004.— 128 с.: ил.

ISBN 5-93037-125-3

В книге приведены сведения об устройстве и принципе действия трехфазных и однофазных асинхронных двигателей, о расчете характеристик и выборе мощности двигателей при их питании от трехфазной и однофазной сети, о расчете параметров и выборе пусковых и рабочих конденсаторов, о схемах управления и защиты и выборе элементов схем.

Представлены технические данные о некоторых типах современных асинхронных двигателей, конденсаторов, электрических аппаратов управления и защиты.

Приведены сведения о разработке новейших типов асинхронных энергосберегающих двигателей.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

УДК 621.3 (035)
ББК 31.26

© И. И. Алиев, 2004
© Оформление. Издательское предприятие РадиоСофт, 2004

ISBN 5-93037-125-3

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5
1. Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей 6
1.1. Устройство трехфазных двигателей 6
1.2. Принцип действия трехфазных асинхронных двигателей 9
1.3. Основные параметры, характеристики и расчетные соотношения АД 14
1.4. Пример расчета параметров асинхронного двигателя . . 20
1.5. Обозначение выводов обмоток трехфазных машин 22
2. Технические сведения о серийных трехфазных асинхронных двигателях 27
2.1. Серии двигателей и их обозначения 27
2.2. Асинхронные двигатели новых серий RA и 5А 30
2.3. Асинхронные двигатели серии 4А с короткозамкнутым ротором 34
2.4. Асинхронные двигатели серии АИ 37
3. Расчет и выбор мощности трехфазных двигателей 41
3.1. Нагрев и охлаждение двигателей в электроприводе . . . 41
3.2. Номинальные режимы работы электродвигателей 41
3.3. Выбор электродвигателя 44
3.4. Расчет мощности двигателей для длительного режима работы 45
3.5. Расчет мощности двигателей для повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы 47
3.6. Формулы для расчета мощности и выбора двигателей некоторых механизмов 49
3.7. Примеры расчета мощности и выбора двигателя 52
4. Расчет и выбор проводов, кабелей, автоматических выключателей и предохранителей 56
4.1. Расчет и выбор проводов и кабелей 56
4.2. Расчет токов короткого замыкания и выбор автоматических выключателей и предохранителей 60
5. Схемы управления асинхронными трехфазными двигателями 64
5.1. Управление посредством магнитных пускателей 64
5.2. Технические параметры пускателей 67
5.3. Включение двигателя автоматическим и пакетным выключателями 74
5.4. Кнопочные выключатели 76

6. Питание трехфазного двигателя от однофазной сети переменного тока 79
6.1. Особенности однофазного режима трехфазного двигателя 79
6.2. Схемы пуска АД в однофазном режиме с пульсирующим полем 83
6.3. Схемы соединения обмоток конденсаторного АД в однофазном режиме 86
6.4. Применение кнопочных выключателей для коммутации пусковой емкости 96
6.5. Схемы управления конденсаторными АД 97
6.6. Особенности работы и эффективное использование конденсаторного АД 100
6.7. Однофазные двигатели 101
7. Конденсаторы для асинхронных двигателей 104
7.1. Основные параметры конденсаторов 104
7.2. Конденсаторы типа ДПС, КЭМ и КЭК 109
8. Асинхронные энергосберегающие двигатели 113
8.1. Описание асинхронного энергосберегающего двигателя 113
8.2. Математическое моделирование АЭД 115
8.3. Экспериментальные исследования АЭД 118
Литература 125

ПРЕДИСЛОВИЕ

Асинхронные электродвигатели (АД) находят в народном хозяйстве широкое применение. По разным данным до 70% всей электрической энергии, преобразуемой в механическую энергию вращательного или поступательного движения, потребляется АД. Электрическую энергию в механическую энергию поступательного движения преобразуют линейные асинхронные электродвигатели, которые широко используются в электрической тяге, для выполнения технологических операций.

Широкое применение АД связано с рядом их достоинств. АД — это самые простые в конструктивном отношении и в изготовлении, надежные и самые дешевые из всех типов электрических двигателей. Они не имеют щеточно-коллекторного узла либо узла скользящего токосъема, что помимо высокой надежности обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы.

В зависимости от числа питающих фаз различают трехфазные и однофазные АД. Трехфазный АД при определенных условиях может успешно выполнять свои функции и при питании от однофазной сети. АД широко применяются не только в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, но и в частном секторе, в быту, в домашних мастерских, на садовых участках. Однофазные АД приводят во вращение стиральные машины, вентиляторы, небольшие деревообрабатывающие станки, электрические инструменты, насосы для подачи воды.

Чаще всего для ремонта или создания механизмов и устройств промышленного изготовления или собственной конструкции применяют трехфазные АД. Причем в распоряжении конструктора может быть как трехфазная, так и однофазная сеть. Возникают проблемы расчета мощности и выбора двигателя для того или другого случая, выбора наиболее рациональной схемы управления АД, расчета конденсаторов, обеспечивающих работу трехфазного АД в однофазном режиме, выбора сечения и типа проводов, аппаратов управления и защиты. Такого рода практическим проблемам посвящена предлагаемая вниманию читателя книга. В книге приводится также описание устройства и принципа действия АД, основные расчетные соотношения для двигателей в трехфазном и однофазном режимах.

Автор считает своим приятным долгом выразить признательность рецензенту книги д.т.н., проф. Беспалову В. Я. (кафедра электромеханики МЭИ), чьи замечания способствовали улучшению содержания книги.

Проф. Алиев И.И.

1. Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей

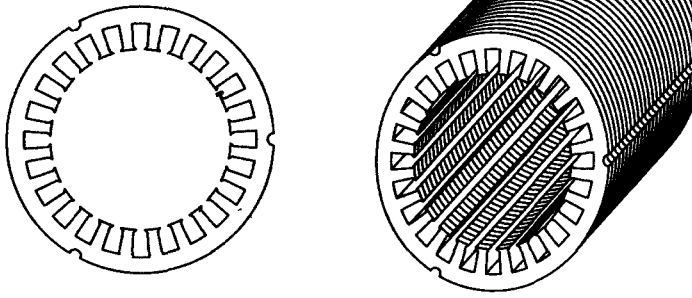
1.1. Устройство трехфазных двигателей

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) традиционного исполнения, обеспечивающий вращательное движение, представляет собой электрическую машину, состоящую из двух основных частей: неподвижного *статора* и *ротора,* вращающегося на валу двигателя.

Статор двигателя состоит из станины, в которую впрессовывают так называемое электромагнитное ядро статора, включающее магнитопровод и трехфазную распределенную обмотку статора. Назначение ядра — намагничивание машины или создание вращающегося магнитного поля.

Магнитопровод статора состоит из тонких (от 0,28 до 1 мм) изолированных друг от друга листов, штампованных из специальной электротехнической стали. В листах различают зубцовую зону и ярмо (рис. 1.1,*а*). Листы собирают и скрепляют таким образом, что в магнитопроводе формируются зубцы и пазы статора (рис. 1.1,*б*).

Магнитопровод представляет собой малое магнитное сопротивление для магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, и благодаря явлению намагничивания этот поток усиливает.



а) *б)*

Рис. 1.1. Магнитопровод статора:
а — отдельный лист; *б* — магнитопровод в сборе

В пазы магнитопровода укладывается распределенная трехфазная обмотка статора. Обмотка в простейшем случае состоит из трех фазных катушек, оси которых сдвинуты в пространстве по отношению друг к другу на 120°. Фазные катушки соединяют между собой по схемам звезда, либо треугольник (рис. 1.2).

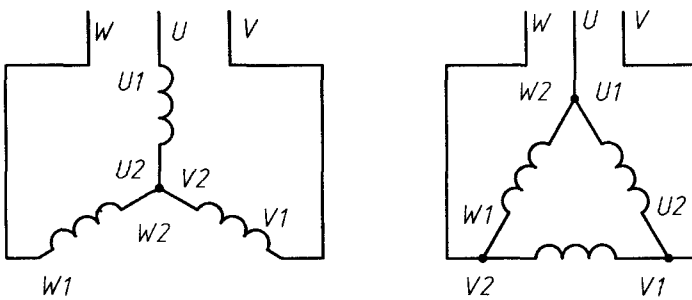


Рис. 1.2. Схемы соединения фазных обмоток трехфазного АД в звезду и в треугольник

Более подробные сведения о схемах соединения и условных обозначениях начал и концов обмоток представлены ниже.

Ротор двигателя состоит из магнитопровода, также набранного из штампованных листов стали, с выполненными в нем пазами, в которых располагается обмотка ротора. Различают два вида обмоток ротора: *фазную* и *короткозамкнутую.*

Фазная обмотка аналогична обмотке статора, соединенной в звезду. Концы обмотки ротора соединяют вместе и изолируют, а начала присоединяют к контактным кольцам, располагающимся на валу двигателя. На контактные кольца, изолированные друг от друга и от вала двигателя и вращающиеся вместе с ротором, накладываются неподвижные щетки, к которым присоединяют внешние цепи. Это позволяет, изменяя сопротивление ротора, регулировать скорость вращения двигателя и ограничивать пусковые токи.

Наибольшее применение получила короткозамкнутая обмотка типа «беличьей клетки». Обмотка ротора крупных двигателей включает латунные или медные стержни, которые вбивают в пазы, а по торцам устанавливают короткозамыкающие кольца, к которым припаивают или приваривают стержни. Для серийных АД малой и средней мощности обмотку ротора изготавливают путем литья под давлением алюминиевого сплава.

При этом в пакете ротора *1* заодно отливаются стержни *2* и короткозамыкающие кольца *4* с крылышками вентиляторов для улучшения условий охлаждения двигателя, затем пакет напрессовывается на вал *3*. (рис. 1.3). На разрезе, выполненном на этом рисунке, видны профили пазов, зубцов и стержней ротора.

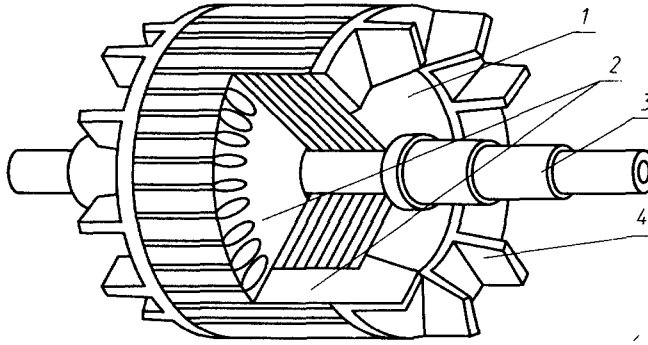


Рис. 1.3. Ротор АД с короткозамкнутой обмоткой

Общий вид асинхронного двигателя серии 4А представлен на рис. 1.4 [2]. Ротор *5* напрессовывается на вал *2* и устанавливается на подшипниках *1* и *11* в расточке статора в подшипниковых щитах *3* и *9*, которые прикрепляются к торцам статора *6* с двух сторон. К свободному концу вала *2* присоединяют нагрузку. На другом конце вала укрепляют вентилятор *10* (двигатель закрытого обдуваемого исполнения), который закрывается колпаком *12*. Вентилятор обеспечивает более интенсивное отведение тепла от двигателя для достижения соответствующей нагрузочной способности. Для лучшей теплоотдачи станину отливают с ребрами *13* практически по всей поверхности станины.

Статор и ротор разделены воздушным зазором, который для машин небольшой мощности находится в пределах от 0,2 до 0,5 мм.

Для прикрепления двигателя к фундаменту, раме или непосредственно к приводимому в движение механизму на станине предусмотрены лапы *14* с отверстиями для крепления. Выпускаются также двигатели фланцевого исполнения. У таких машин на одном из подшипниковых щитов (обычно со стороны вала) выполняют фланец, обеспечивающий присоединение двигателя к рабочему механизму.

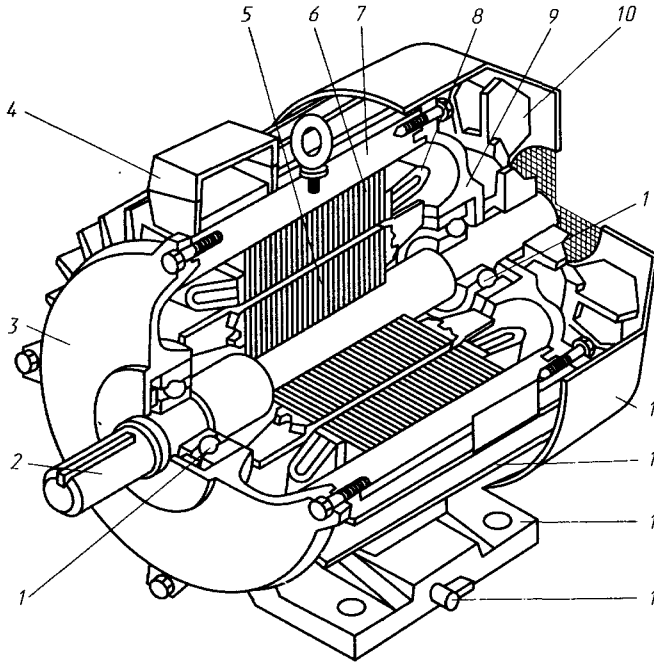


Рис. 1.4. Общий вид асинхронного двигателя серии 4А

Выпускаются также двигатели, имеющие и лапы, и фланец. Установочные размеры двигателей (расстояние между отверстиями на лапах или фланцах), а также их высоты оси вращения нормируются.

Высота оси вращения — это расстояние от плоскости, на которой расположен двигатель, до оси вращения вала ротора. Высоты осей вращения двигателей небольшой мощности: 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100 мм.

1.2. Принцип действия трехфазных асинхронных двигателей

Выше отмечалось, что трехфазная обмотка статора служит для намагничивания машины или создания так называемого вращающегося магнитного поля двигателя. В основе принципа действия асинхронного двигателя лежит закон электромагнитной индукции. Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники короткозамкнутой обмотки ротора, отчего

в последних наводится электродвижущая сила, вызывающая в обмотке ротора протекание переменного тока. Ток ротора создает собственное магнитное поле, взаимодействие его с вращающимся магнитным полем статора приводит к вращению ротора вслед за полями.

Наиболее наглядно идею работы АД иллюстрирует простой опыт, который еще в XVIII веке демонстрировал французский академик Араго (рис. 1.5). Если подковообразный магнит вращать с постоянной скоростью вблизи металлического диска, свободно расположенного на оси, то диск начнет вращаться вслед за магнитом с некоторой скоростью, меньшей скорости вращения магнита.

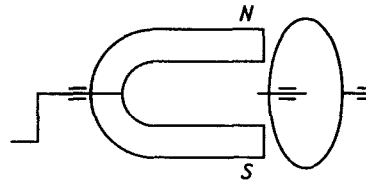


Рис. 1.5. Опыт Араго, объясняющий принцип работы асинхронного двигателя

Это явление объясняется на основе закона электромагнитной индукции. При движении полюсов магнита около поверхности диска в контурах под полюсом наводится электродвижущая сила и появляются токи, которые создают магнитное поле диска. Читатель, которому трудно представить проводящие контуры в сплошном диске, может изобразить диск в виде колеса со множеством проводящих ток спиц, соединенных ободом и втулкой. Две спицы, а также соединяющие их сегменты обода и втулки и представляют собой элементарный контур. Поле диска сцепляется с полем полюсов вращающегося постоянного магнита, и диск увлекается собственным магнитным полем. Очевидно, наибольшая электродвижущая сила будет наводиться в контурах диска тогда, когда диск неподвижен, и напротив, наименьшая, когда близка к скорости вращения диска.

Перейдя к реальному асинхронному двигателю отметим, что короткозамкнутую обмотку ротора можно уподобить диску, а обмотку статора с магнитопроводом — вращающемуся магниту. Однако вращение магнитного поля в неподвижном статоре АД осуществляется благодаря трехфазной системе токов, которые протекают в трехфазной обмотке с пространственным сдвигом фаз.

Рассмотрим получение вращающегося магнитного потока в асинхронном двигателе с тремя фазными обмотками статора, соединенными звездой. От источника питания к обмоткам подводится трехфазная система напряжения, под действием которой по обмоткам протекает трехфазная система токов, сдвинутых друг по отношению к другу на 120°:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin\omega t; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120°); \\ i_C &= I_m \sin(\omega t - 240°). \end{aligned} \qquad (1)$$

Изобразим условно сечение АД, при этом представим, что каждая из фазных обмоток, по которым протекают токи i_A, i_B, i_C, представлена в виде одного витка (рис. 1.6).

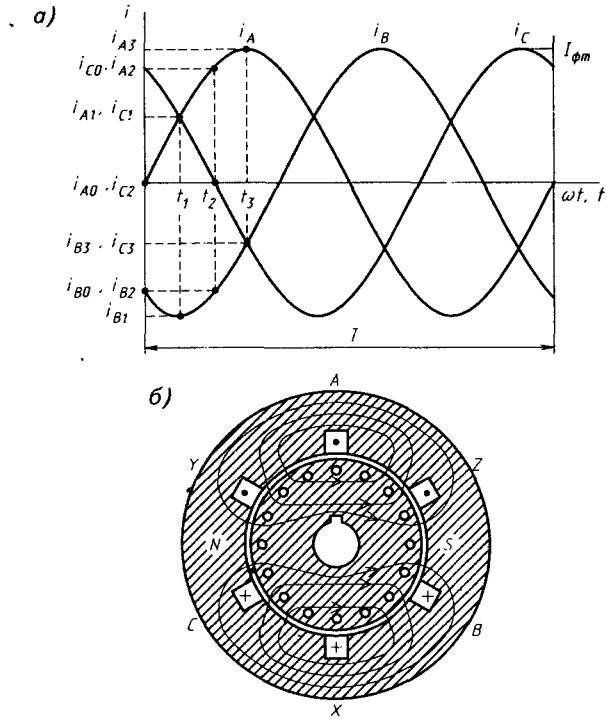


Рис. 1.6. К принципу действия АД:

а — диаграмма фазных токов; *б* — сечение АД с указанием направлений фазных токов и картина магнитного поля АД при значении тока в фазе А, равном *Im*

Покажем стрелками условные положительные направления токов в проводах и магнитных потоков фаз, которые изменяются по синусоидальному закону:

$$\Phi_A = \Phi_m \sin\omega t;$$
$$\Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 120°); \qquad (2)$$
$$\Phi_C = \Phi_m \sin(\omega t - 240°).$$

Если бы равные магнитные потоки, сдвинутые на 120°, оставались постоянными, то результирующий магнитный поток двигателя был бы равен нулю. Однако потоки вслед за вызывающими их токами изменяются по синусоидальному закону (2), и по мере их изменения результирующий магнитный поток вращается, принимая через каждые 30° поворота или через 1/12 полного оборота значение, равное:

$$\Phi = 2\Phi_m \cos 30° = 1{,}5\Phi_m. \qquad (3)$$

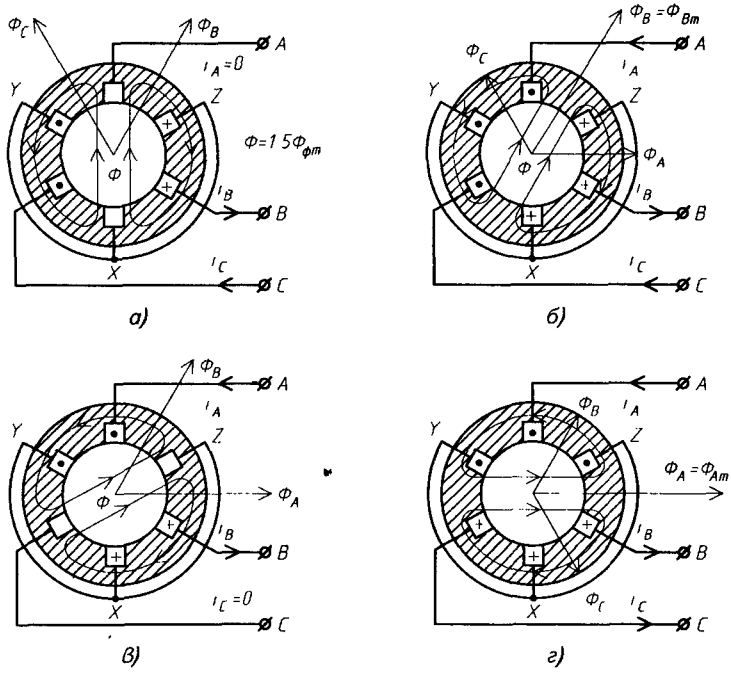


Рис. 1.7. Направления фазных токов и магнитные потоки двигателя, соответствующие значениям угла поворота поля 0, 30, 60 и 90°

Это нетрудно проследить по рис. 1.6,*б* и рис. 1.7 [4]: по мере изменения токов фаз ***наибольшее значение магнитного потока*** Φ изменяет свое направление, как бы поворачиваясь в течение одной четверти периода последовательно на 30, 60 и 90°. Полная картина магнитного поля двигателя, соответствующая времени поворота на 90°, представлена на рис. 1.6,*б*.

Следовательно, за время одного полного колебания тока в одной из фаз, соответствующее периоду T, амплитуда потока Φ совершит в расточке статора один полный оборот. Это явление и называют *вращающимся магнитным полем*. Как видим, его вполне можно сопоставить с полюсами вращающегося постоянного магнита.

Подчеркнем еще раз, что для получения кругового вращающегося магнитного потока необходимы два условия:

во-первых, *фазные обмотки статора должны быть сдвинуты в пространстве на некоторый угол;*

во-вторых, *токи в фазных обмотках должны быть сдвинуты по фазе на некоторый угол.*

В симметричной трехфазной системе этот угол в обоих случаях равен 120°. При невыполнении хотя бы одного из этих условий суммарный поток вращающимся не будет.

Скорость вращения поля статора называют *синхронной скоростью*. Эта скорость зависит лишь от частоты тока f_1 статора и числа пар полюсов статора p_1 двигателя.

В практической системе единиц синхронная скорость определяется простым соотношением, об/мин:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1}. \qquad (4)$$

В системе СИ угловая частота вращения, рад/с или $с^{-1}$:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p_1}. \qquad (5)$$

Скорость вращения в оборотах в минуту и угловая скорость связаны между собой простыми соотношениями:

$$\begin{aligned} n_1 &= 9{,}55\omega_1; \\ \omega_1 &= 0{,}1046 n_1. \end{aligned} \qquad (6)$$

Числом пар полюсов двигателя p_1 называют отношение длины окружности по среднему диаметру D (радиусу R) воз-

душного зазора к удвоенному *полюсному делению* (длине полупериода) обмотки статора τ:

$$p_1 = \frac{\pi D}{2\tau} = \frac{\pi R}{\tau}.$$

Как отмечалось, пары полюсов АД можно уподобить полюсам вращающегося магнита из опыта Араго.

Легко видеть, что в модели двигателя, изображенного на рис. 1.7—1.8, половина длины окружности равна полюсному делению, т. е. двигатель имеет одну пару полюсов: $p_1 = 1$. Следовательно, синхронная скорость такого двигателя равна:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин}.$$

Число пар полюсов АД может быть равно 1, 2, 3, 4 и т. д. Соответственно синхронные скорости двигателей будут равны 3000, 1500, 1000, 750 об/мин.

Как уже отмечалось выше, вращающееся магнитное поле наводит в стержнях обмотки ротора переменную электродвижущую силу (ЭДС). Благодаря наличию короткозамыкающих колец в обмотке ротора возникает ток, который создает магнитное поле ротора. Поле ротора сцепляется с магнитным полем статора подобно тому, как взаимодействуют полюса двух соосно расположенных подковообразных магнитов. Ротор АД увлекается полем двигателя и приходит во вращение, однако скорость его вращения в двигательном режиме *всегда меньше* синхронной скорости, отчего такую машину называют *асинхронной*.

Таким образом, вращающееся поле статора и поле ротора взаимно неподвижны и составляют, в сущности, единое поле. Это одно из важнейших условий электромеханического преобразования в любой электрической машине вообще.

1.3. Основные параметры, характеристики и расчетные соотношения АД

Возможности асинхронного двигателя, как и всякой другой электрической машины, характеризуются его параметрами, которые приводятся в каталогах, а также большей частью в паспорте двигателя. Паспорт — небольшая металлическая табличка, прикрепленная к корпусу статора. Номинальными называют параметры, которые двигатель может выдерживать в течение всего срока эксплуатации.

К номинальным (паспортным) данным двигателя относятся:

Мощность на валу или механическая $P_н$.
Напряжение обмотки статора $U_н$.
Ток статора $I_н$.
Частота напряжения сети $f_н$.
Частота или скорость вращения ротора $n_н$, об/мин.
Номинальный КПД $\eta_н$.
Коэффициент мощности $\cos\varphi_н$.

В паспорте АД обычно приводят два значения напряжения, например 380/220 В. Меньшее значение напряжения (220 В) — это фазное напряжение обмотки статора. Большее значение напряжения относится к соединению обмотки статора в звезду, меньшее — в треугольник. Соответственно указывают два значения тока статора.

В каталогах приводят также:

Кратность пускового тока $I_п/I_н$;
Кратность пускового момента $\mu_п = M_п/M_н$;
Кратность максимального момента $\mu_м = M_м/M_н$.

Кратность максимального момента называется *перегрузочной способностью* двигателя.

Для АД с фазным ротором указывают на паспорте также напряжение между контактными кольцами при разомкнутой обмотке ротора $U_{2н}$ и номинальный ток в обмотке ротора $I_{2н}$.

Величина, характеризующая степень отставания скорости вращения ротора АД n от синхронной скорости n_1, называется *скольжением*:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} = \frac{(\omega_1 - \omega)}{\omega_1}. \qquad (7)$$

Скольжение иногда выражают в процентах:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} 100\%.$$

Скорость вращения ротора, об/мин:

$$n = n_1(1 - s). \qquad (8)$$

Номинальной скорости вращения двигателя $n_н$ соответствует номинальное скольжение $s_н$, которое составляет несколько процентов. Следовательно, скорость вращения ротора в номинальном режиме весьма близка к синхронной. Приведем для примера соотношения синхронной и номинальных скоростей серийных двигателей n_1/n: 3000/2970, 1500/1460, 1000/970 и т. д.

Частота электродвижущей силы ЭДС, наведенной в роторе, и тока ротора, Гц:

$$f_2 = f_1 s. \tag{9}$$

Если обмотки статора и ротора имеют соответственно числа витков w_1 и w_2 и обмоточные коэффициенты k_1 и k_2, то для ЭДС получим следующие соотношения:

для ЭДС, наведенной в обмотке статора, В:

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 k_1 \Phi_m; \tag{10}$$

для ЭДС, наведенной в обмотке ротора в момент пуска, В:

$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 k_2 \Phi_m; \tag{11}$$

для ЭДС, наведенной в обмотке ротора при его вращении, В:

$$E_{2S} = 4{,}44 f_2 w_2 k_2 \Phi_m = 4{,}44 f_1 s w_2 k_2 \Phi_m. \tag{12}$$

Как видно из последнего соотношения, чем выше скорость вращения ротора (т. е. чем меньше скольжение), тем меньше ЭДС, наводимая в его обмотке. И напротив, наибольшая ЭДС наводится в роторе в момент пуска, когда ротор еще неподвижен, а скольжение равно 1. Этому режиму соответствует *пусковой ток*, который превышает номинальный ток серийных АД в 5—7 раз.

Двигатель, подключенный к сети, потребляет из нее активную и реактивную мощности. Активная мощность идет на создание полезной механической мощности на валу и покрытие потерь в двигателе: на нагрев обмоток, потери в стали, механические потери.

Активная мощность двигателя, Вт:

$$P_1 = 3 U_{1\Phi} I_{1\Phi} \cos\varphi. \tag{13}$$

Механическая мощность на валу двигателя, Вт:

$$P_2 = M\omega = 0{,}102 Mn, \tag{14}$$

где M — вращающий момент двигателя.

Реактивная мощность двигателя идет на намагничивание машины или создание вращающегося магнитного поля, вар:

$$Q_1 = 3 U_{1\Phi} I_{1\Phi} \sin\varphi. \tag{15}$$

Полная мощность двигателя, ВА:

$$S_1 = 3 U_{1\Phi} I_{1\Phi} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}. \tag{16}$$

Вращающий момент двигателя, Нм:

$$M = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega} = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s}$$

или

$$M = C I_{2a} \Phi_m, \qquad (17)$$

где m_2 — число фаз обмотки ротора; R_2 — активное сопротивление обмотки ротора; I_2 — ток ротора; C — постоянная машины ($C = 2{,}13 p_1 \omega_1 k_1$).

Механическая и электромеханическая характеристики

Одной из наиболее важных характеристик АД является механическая характеристика. *Механической характеристикой* называют зависимость скорости вращения или скольжения от вращающего момента на валу двигателя. Она позволяет сравнить и согласовать механические свойства двигателя и рабочего механизма.

Соответственно, зависимость скорости вращения или скольжения от тока статора называют *электромеханической характеристикой.* Механическая и электромеханическая характеристики представлены на рис. 1.8.

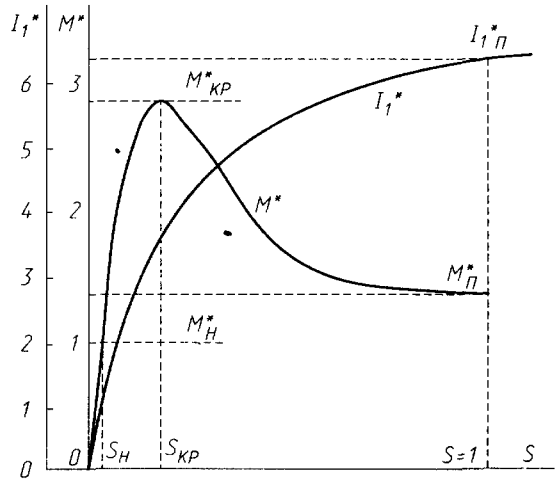


Рис. 1.8. Механическая $S = f(M^*)$ и электромеханическая $S = f(I^*)$ характеристики АД

Для расчета и построения *механической характеристики* обычно используется упрощенное уравнение механической характеристики (уравнение Клосса):

$$M = \frac{2M_{\text{м}}}{\frac{s}{s_{\text{м}}} + \frac{s_{\text{м}}}{s}}, \tag{18}$$

где $M_{\text{м}}$ — максимальный, или критический момент двигателя, Нм; s — скольжение; $s_{\text{м}}$ — критическое скольжение, соответствующее $M_{\text{м}}$.

Критическое скольжение:

$$s_{\text{м}} = \frac{R_2^1}{\pm\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2^1)^2}}. \tag{19}$$

Максимальный момент — это тот наибольший момент, который развивает данный двигатель и определяется выражением:

$$M_{\text{м}} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_1\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2^1)^2}\right]}, \tag{20}$$

где R_1 — активное сопротивление статора, Ом; R_1^2 — приведенное активное сопротивление роторной цепи, Ом; X_1 — индуктивное сопротивление статора и X_2^1 — приведенное индуктивное сопротивление роторной цепи, Ом.

Из этого выражения видно, что *максимальный момент двигателя, как и любые другие значения вращающего момента, зависят от квадрата напряжения*. Это означает, например, что если напряжение в сети снизилось на 30%, то вращающий момент АД снизится вдвое. Данная особенность является основным недостатком АД.

Для практических расчетов, если неизвестны параметры двигателя, величину $s_{\text{м}}$ можно определить из уравнения механической характеристики, положив $s = s_{\text{н}}$, а момент M приняв равным номинальному $M_{\text{н}}$.

Удобнее вычисления производить в *относительных единицах* $M^* = M/M_{\text{н}}$, тогда $M^* = 1$, а максимальный момент равен

$$M_{\text{кр}}^* = \mu_{\text{м}}$$

и определяется по каталогу.

$$s_{\text{м}} = s_{\text{н}}\left(\mu_{\text{м}} - \sqrt{\mu_{\text{м}}^2 - 1}\right). \tag{21}$$

На рис. 1.8. приведены механическая характеристика и электромеханическая характеристики АД, причем момент M^* и ток I^* двигателя определены и построены в относительных единицах.

Характерными точками механической характеристики являются точки, соответствующие:

номинальному режиму ($M_н^*$, $S_н$);

пуску ($M_п^*$, $S = 1$);

критическому ($M_{кр}^*$, $S_{кр}$).

Энергетические характеристики двигателя — это его КПД η и коэффициент мощности $\cos\varphi$.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \qquad (22)$$

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{3U_{1\Phi} I_{1\Phi}},$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \qquad (23)$$

Основные свойства АД, работающего под нагрузкой, определяются также рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимость тока статора, коэффициента мощности, КПД, скольжения, вращающего момента от нагрузки на валу АД.

Рабочие характеристики АД изображены на рис. 1.9.

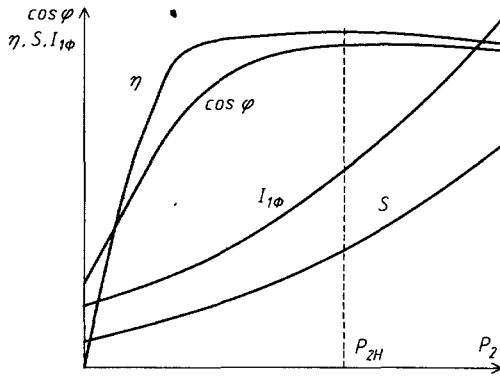


Рис. 1.9. Рабочие характеристики АД

1.4. Пример расчета параметров асинхронного двигателя

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А100S4У3 имеет следующие ***номинальные данные:***

Мощность $P_н$, кВт	3
Линейное напряжение, В	380
Частота напряжения f, Гц	50
Частота вращения $n_н$, об/мин	1475
КПД $\eta_н$	0,93
Коэффициент мощности $\cos\varphi_н$	0,9

По каталогу можно найти:

Кратность пускового тока $I_п/I_н$	6
Кратность пускового момента $\mu_п$	2
Перегрузочную способность $\mu_м$	2,4

Требуется определить:

Частоту вращения магнитного поля или синхронную скорость.
Число пар полюсов.
Скольжение при номинальной нагрузке.
Номинальный вращающий момент.
Активную мощность двигателя.
Номинальный и пусковой токи статора.
Пусковой и максимальный моменты при номинальном напряжении.
Пусковой и максимальный моменты двигателя при снижении напряжения сети на 10%.

Решение.

1. Выше отмечалось, что скольжение в номинальном режиме работы АД составляет несколько процентов, поэтому частота вращения ротора согласно уравнению (7) незначительно отличается от частоты вращения магнитного поля. Следовательно, номинальной скорости двигателя 1470 об/мин соответствует синхронная скорость 1500 об/мин.

2. Число пар полюсов двигателя определим из соотношения (4):

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1};$$

$$1500 = \frac{60 \cdot 50}{p_1}, \quad \text{откуда } p_1 = 2.$$

3. Скольжение в номинальном режиме согласно (7):

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1};$$

$$s = \frac{(1500 - 1470)}{1500} = 0{,}02.$$

4. Номинальный момент $M_н$ двигателя определим по (14):

$$P_2 = 0{,}102 M_н, \text{ откуда } M_н = \frac{P_н}{0{,}102 n_н};$$

$$M_н = \frac{3000}{0{,}102 \cdot 1470} = 20 \text{ Нм}.$$

5. Активная мощность двигателя согласно (22):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \text{ откуда } P_1 = \frac{P_2}{\eta_н};$$

$$P_{1н} = \frac{3000}{0{,}93} = 3226 \text{ Вт}.$$

6. Номинальный ток двигателя определим по формуле:

$$P_1 = 3 U_{1ф} I_{1ф} \cos\varphi, \text{ откуда } I_{1ф} = \frac{P_1}{3 U_{1ф} \cos\varphi_н};$$

$$I_{1ф} = \frac{3226}{220 \cdot 0{,}9} = 16{,}3 \text{ А}.$$

7. Пусковой ток определим по значению его кратности:

$$\frac{I_п}{I_н} = 6, \text{ откуда } I_п = 6 I_н;$$

$$I_п = 6 \cdot 16{,}3 = 97{,}8 \text{ А}.$$

8. Пусковой момент $M_п$ определим по его кратности:

$$\mu_п = 2 \text{ или } M_п = 2 M_н;$$

$$M_п = 2 \cdot 20 = 40 \text{ Нм}.$$

9. Максимальный момент $M_м$ также определим по его кратности:

$$\mu_м = 2{,}4, \text{ откуда } M_м = 2{,}4 M_н;$$

$$M_м = 2{,}4 \cdot 20 = 48 \text{ Нм}.$$

10. Определим пусковой ток при снижении напряжения сети на 10%:

$$I_{\text{П}}^{\text{С}} = I_{\text{П}} \frac{U}{U_{\text{Н}}} = 0{,}9 I_{\text{П}};$$

$$I_{\text{П}}^{\text{С}} = 0{,}9 \cdot 97{,}8 = 88{,}02 \text{ А}.$$

11. Определим пусковой и максимальный моменты при снижении напряжения сети на 10%:

$$M_{\text{П}}^{\text{С}} = M_{\text{П}} \frac{U}{U_{\text{Н}}^2} = 0{,}81 M_{\text{П}};$$

$$M_{\text{П}}^{\text{С}} = 0{,}81 \cdot 40 = 32{,}4 \text{ Нм}.$$

Соответственно максимальный момент при снижении напряжения составит

$$M_{\text{м}} = 0{,}81 \cdot 48 = 38{,}8 \text{ Нм}.$$

1.5. Обозначение выводов обмоток трехфазных машин

На статоре имеется коробка выводов, в которой располагается присоединительная пластмассовая колодка с зажимами. Зажимы обозначены соответствующими буквами, к ним присоединены начала и концы обмоток двигателя (рис. 1.10,*а*).

При помощи соединительных пластин непосредственно на колодке соединяют обмотку АД в звезду или треугольник (рис. 1.10,*б*). К зажимам подводится питающее переменное трехфазное напряжение.

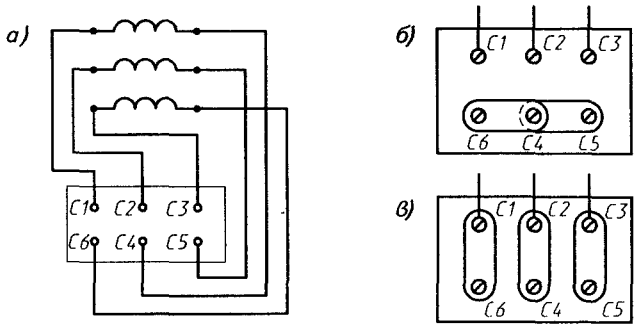


Рис. 1.10. Подключение обмоток статора к коробке выводов:

а — схемы присоединения обмоток к присоединительной колодке; *б* — схема соединения обмоток в звезду; *в* — в треугольник

Для обозначения выводов обмоток электрических машин в настоящее время используются две системы.

Прежняя, установленная ГОСТ 183—74, сохраняется для разработанных до 1987 г. и модернизируемых машин.

Выводы обмоток этих машин обозначают буквами русского алфавита: обмоток статора — *С*, обмоток ротора асинхронных двигателей — *Р*, обмоток возбуждения синхронных машин — *И*.

Цифрами после букв обозначают начала и концы фаз: первой фазы соответственно *1* и *4*, второй фазы *2* и *5*, третьей фазы *3* и *6*. Начала и концы катушек обозначают соответственно для фазы А: *С1* и *С4*; фазы В: *С2* и *С5*; фазы С: *С3* и *С6* (рис. 1.10).

В табл. 1.1 приведены установленные ГОСТ 183—74 обозначения в зависимости от числа выводов и схемы соединения обмоток. Обозначения должны быть нанесены непосредственно на концы выводов: на кабельные наконечники, шинные концы или специальные обжимы, плотно закрепленные на выводах [5].

Таблица 1.1

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ МАШИН, РАЗРАБОТАННЫХ ДО 1987 г. И МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ (ГОСТ 183—74)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			начало	конец
Обмотка статора				
Открытая схема	6	Первая фаза	*С1*	*С4*
		Вторая фаза	*С2*	*С5*
		Третья фаза	*С3*	*С6*
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	*С1*	
		Вторая фаза	*С2*	
		Третья фаза	*С3*	
		Нулевая точка	0	
Соединение треугольником	3	Первый вывод	*С1*	
		Второй вывод	*С2*	
		Третий вывод	*С3*	
Обмотка фазного ротора асинхронных двигателей				
Соединение звездой	3	Первая фаза	*Р1*	
		Вторая фаза	*Р2*	
		Третья фаза	*Р3*	

Таблица 1.2

ЦВЕТОВОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ ОБМОТОК СТАТОРА ТРЕХФАЗНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Цветовой код выводов	
			начало	конец
Открытая схема	6	Первая фаза	Желтый	Желтый с черным
		Вторая фаза	Зеленый	Зеленый с черным
		Третья фаза	Красный	Красный с черным
Звезда	3 или 4	Первая фаза	Желтый	—
		Вторая фаза	Зеленый	—
		Третья фаза	Красный	—
		Нулевая точка	Черный	—
Треугольник	3	Первый вывод	Желтый	—
		Второй вывод	Зеленый	—
		Третий вывод	Красный	—

В машинах малых размеров, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены из-за недостатка места, ГОСТ разрешает использовать цветовые обозначения проводами с разноцветной изоляцией, красками и т. п. Цветовые обозначения выводов приведены в табл. 1.2.

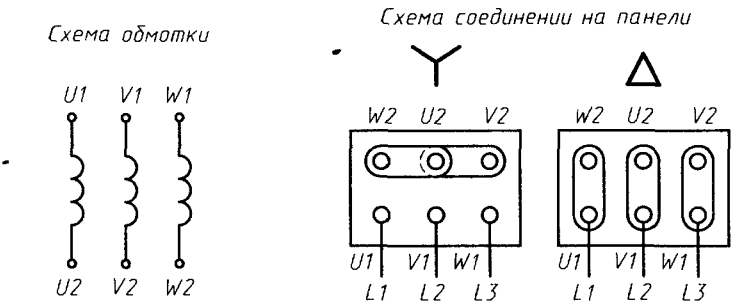


Рис. 1.11. Схема соединения обмотки и обозначения начал и концов обмотки по ГОСТ 26772—85

Для машин, разработанных после 1 января 1987 г., установлена система обозначений выводов обмоток (ГОСТ 26772—85), соответствующая международным стандартам. По этой системе (табл. 1.3) выводы обозначают буквами латинского алфа-

вита: первой фазы обмотки статора — буквой *U*, второй фазы — буквой *V*, третьей фазы — буквой *W*; выводы обмотки ротора соответственно по фазам — буквами *K*, *L* и *M*.

Начала и концы фаз обозначаются соответственно цифрами *1* и *2*, стоящими после букв, фаза А: *U1* и *U2*, фаза В: *V1* и *V2*, фаза С: *W1* и *W2* (рис. 1.11).

При соединении обмотки в звезду внутри двигателя используют следующие обозначения выводов: *U*, *V*, *W* (*N* — если нейтраль выведена); при соединении обмотки в треугольник: *U*, *V*, *W*.

Таблица 1.3

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, РАЗРАБОТАННЫХ ПОСЛЕ 1.01.1987 г. (ГОСТ 26772—85)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			начало	конец
Обмотка статора				
Открытая схема	6	Первая фаза	*U1*	*U2*
		Вторая фаза	*V1*	*V2*
		Третья фаза	*W1*	*W2*
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	*U*	
		Вторая фаза	*V*	
		Третья фаза	*W*	
		Точка звезды	*N*	
Соединение треугольником	3	Первый вывод	*U*	
		Второй вывод	*V*	
		Третий вывод	*K*	
Обмотка фазного ротора асинхронного двигателя				
Открытая схема	6	Первая фаза	*K1*	*K2*
		Вторая фаза	*L1*	*L2*
		Третья фаза	*M1*	*M2*
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	*K*	
		Вторая фаза	*L*	
		Третья фаза	*M*	
		Точка звезды	*Q*	
Соединение треугольником	3	Первый вывод	*K*	
		Второй вывод	*L*	
		Третий вывод	*V*	

Линейные провода на схеме обозначаются соответственно *L1*, *L2* и *L3*.

Цветовые обозначения выводов обмоток для машин, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены, сохраняют такими же, как и при прежней системе обозначений (табл. 1.2).

Обозначения должны наноситься на начала и концы обмоток или на колодку зажимов рядом с выводами. Если соединения фаз произведены *внутри корпуса* машины, например, обмотка статора постоянно соединена в треугольник, то начала и концы фаз не обозначают, на выведенные концы обмотки наносят буквенные обозначения без цифр. Также опускают цифры в обозначении выводов фаз обмоток, соединенных *внутри машины* в звезду. Если при этом в обмотке имеется вывод от нулевой точки, он обозначается в обмотке статора буквой *N*, в обмотке ротора — буквой *Q*.

2. Технические сведения о серийных трехфазных асинхронных двигателях

2.1. Серии двигателей и их обозначения

Асинхронные электродвигатели — самые распространенные из всех видов электрических машин из-за их простоты, надежности, меньшего в сравнении с другими машинами веса, габарита, стоимости и иных достоинств.

В данном разделе приведены технические данные асинхронных двигателей в диапазоне мощностей от долей киловатт до двух-трех десятков киловатт, поскольку в этом диапазоне мощностей машины наиболее широко применяются в быту и на производстве. Что касается применения асинхронных двигателей в однофазном режиме, то до сих пор принято, что его предельная мощность не должна превышать 1,7...2 кВт, поскольку при больших мощностях стоимость и габариты конденсаторов велики, и использование двигателя становится неэкономичным. К примеру, по данным [4] стоимость конденсаторов марки КБГ-МН для двигателя мощностью 1,7 кВт составляет 140%, а для двигателя мощностью 10 кВт составляет 270% стоимости двигателя.

Однако в настоящее время приведенные соотношения цен существенно изменились, поскольку конденсаторы стали значительно меньше по размеру и дешевле. Например, отечественный конденсатор типа ДПС-0,45(П) на 450 В емкостью 25 мкФ, предназначенный для пуска асинхронных двигателей, в два раза меньше по объему, чем конденсатор КБГ-МН на напряжение 400 В емкостью 6 мкФ, выпускавшийся 20 лет назад. Сведения о конденсаторах приведены в соответствующем разделе.

Что касается соотношения цен конденсаторов и двигателя в настоящее время, то оно, видимо, является предметом дополнительного изучения. Далее приведены технические данные отечественных серийных асинхронных двигателей.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным роторами начиная с 1950 года разрабатывались и выпускались в нашей стране в виде единых серий: А—АО (1949—1951); А2—АО2 мощностью 0,6...100 кВт (1958—1960); А—АК мощностью 100...1000 кВт (1952...1956); А2—АК2 мощностью 100...1000 кВт (1964—1965); А3—АО3 мощностью 132...500 кВт; 4А и АИ (АИР) мощностью 0,06...400 кВт (до настоящего времени); АИ — асинхронный Интерэлектро.

В последние годы в России освоен выпуск новых серий асинхронных двигателей серий RA (0,37...100 кВт), 5А (5АН) (0,37...400 кВт) и 6А. Разработка 4А, АИ, RA, 5А и 6А базировалась, кроме отечественных стандартов, на рекомендациях МЭК (Международной электротехнической комиссии).

Асинхронные двигатели различаются *по степени защиты* (например IP23, IP44), *способу охлаждения* (например IC01, IC0141), *способу монтажа* (например IM1001).

IP — означает International Protection; 23 — защищенное; 44 — закрытое исполнение.

IC — International Cooling; 01 — машина с самовентиляцией; IC0141 — машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на ее валу.

IM — International Mounting; IM1001 — машина на лапах, с двумя подшипниковыми щитами, с горизонтальным расположением вала, с цилиндрическим концом.

Машины подразделяются *по климатическим условиям эксплуатации.* Используются следующие обозначения климатического исполнения машин, эксплуатируемых на суше, реках, озерах для климатических районов: с умеренным климатом — У; с холодным климатом — ХЛ; с влажным тропическим ТВ; с сухим тропическим — ТС; с сухим влажным — Т; общеклиматическое исполнение — О.

Примеры обозначения асинхронных двигателей:

5А250М-4 — асинхронный двигатель 5 серии; 250 — высота оси вращения, мм; М — длина средняя корпуса по установочным размерам; 4 — число полюсов (1500 об/мин).

RA100M4 — российский асинхронный двигатель; 100 — высота оси вращения, мм; М — длина средняя корпуса по установочным размерам; 4 — число полюсов (1500 об/мин).

АИР132S6 — асинхронный двигатель Интерэлектро (международная организация стран СЭВ); Р — вариант увязки мощностей и установочных размеров; 132 — высота оси вращения, мм; S — длина малая корпуса по установочным размерам; 6 — число полюсов (1000 об/мин).

4А200L4У3, 4АН200L4У3 — асинхронный двигатель 4 серии; закрытый обдуваемый, Н — защищеного исполнения; 200 — высота оси вращения; L — большая длина корпуса по установочным размерам, 4 — число полюсов (1500 об/мин). У — для районов с умеренным климатом, 3 — категория размещения.

А02-81-2У3 — асинхронный обдуваемый двигатель; 8 — габарит; 1 — первой длины; 2 — двухполюсный (3000 об/мин); У — климатическое исполнение; 3 — категория размещения.

МТКF 311-6, МТКН-311-6 — асинхронный двигатель крано-во-металлургический, работающий при повышенных температурах; F, H — классы нагревостойкости, 3 — габарит; 1 — первая серия; 1 — первая длина; 6 — число полюсов (1000 об/мин).

В табл. 2.1. приведены некоторые серии и типы асинхронных трехфазных двигателей общепромышленного применения, выпускавшихся в СССР и выпускаемых в России.

Таблица 2.1

НЕКОТОРЫЕ СЕРИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Серия, тип, высоты оси вращения	$P_н$, кВт	n (синхр.), об/мин	$U_н$, В	Исполнение, область применения
Двигатели с короткозамкнутым ротором общего применения				
RA (71...280 мм)	0,37... 100	750; 1000; 1500; 3000	220/380	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
6А (315 мм)	90...200	750; 1000; 1500; 3000	220/380, 380/660	Закрытые, обдуваемые, широкого применения
5А (5АН) (71...335 мм)	0,37... 400	750; 1000; 1500; 3000	220/380, 380/660	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
АИР (50...355 мм)	0,19... 315	750; 1000; 1500; 3000	220, 380, 380/660, 220, 380, 660	Открытые, защищенные, закрытые, обдуваемые, продуваемые, широкого применения
4А (56...355 мм)	0,06... 400	500; 600; 750; 1000; 1500; 3000	220/380, 380/660, 220, 380	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
4АР	15...45	750; 1000; 1500	380/660, 220/380	Закрытые, обдуваемые, с повышенным пусковым моментом
4АС	0,3...63 при ПВ=40%	750; 1000; 1500; 3000	220, 380, 220/380, 380/660	Закрытые, обдуваемые, с повышенным скольжением
АН-2 (15–17-й габариты)	500... 2000	370; 500; 600; 750; 1000	6000	Защищенные, для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения
АТД2	500... 5000	3000	6000	С замкнутым или разомкнутым циклом вентиляции, для привода быстроходных механизмов

Серия, тип, высоты оси вращения	$P_н$, кВт	n (синхр.), об/мин	$U_н$, В	Исполнение, область применения
Крановo-металлургические двигатели				
МТКF	1,4...22 при ПВ=40%	750; 1000	380/220; 500	Характеризуются повышенной перегрузочной способностью, большими пусковыми моментами, изоляция класса F, для привода крановых механизмов
МТКН	3...37 при ПВ=40%	750; 1000	380/220; 500	То же, изоляция класса Н, для приводов металлургического производства
Двигатели с фазным ротором				
4АНК, 4АК	15...400	750; 1000; 1500	220/380, 380/660	Защищенные (4АНК) или закрытые (4АК), общего назначения
5АНК	45...400	600; 750; 1000; 1500	220/380, 380/660	Защищенные или закрытые, общего назначения
АКП	55...125	1000; 1500	220/380, 380/660	Защищенные, для привода прессов, работающих в закрытых помещениях
АКН2 15–19-й габариты)	315... 2000	250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000	6000	Для привода механизмов с частыми или тяжелыми условиями пуска
МТF, МТН	1,4...30; 3...118	600; 750; 1000	220/380, 240/415, 400;500	Защищенные, с независимой вентиляцией, для привода крановых механизмов (МТF) и механизмов металлургического производства (МТН)

2.2. Асинхронные двигатели новых серий RA и 5А

В последние годы в связи с развалом единой электромашиностроительной промышленности СССР, остро встал вопрос о производстве асинхронных двигателей в России. В рамках

решения этой задачи Ярославским электромеханическим заводом (ЯЭМЗ) разработан и освоен выпуск новой серии асинхронных двигателей RA (российский асинхронный) в диапазоне мощностей от 0,37 до 100 кВт. Серия является развитием идей, заложенных в машинах 4А и АИ, и отвечает требованиям МЭК по всем параметрам.

Новую серию двигателей 5А и ряд других модификаций, отвечающих как отечественным ГОСТам, так и требованиям МЭК, выпускает Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ.

В табл. 2.2 приводятся технические данные двигателей серии RA по каталогу ЯЭМЗа для высот оси вращения до 200 мм.

Таблица 2.2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ RA

Тип двигателя	$P_н$, кВт	Масса, кг	$n_н$, об/мин	η, %	cosφ	$J_н$, А	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	J, кг м²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RA71A2	0,37	5	2800	71	0,81	1,5	5,0	2,3	2,4	0,0004
RA71B2	0,55	6	2850	74	0,84	1,8	6,5	2,3	2,4	0,0005
RA71A4	0,25	5	1325	62	0,78	1	3,2	1,7	1,7	0,0006
RA71B4	0,37	6	1375	66	0,76	1	3,7	2,0	2,0	0,0008
RA71A6	0,18	6	835	48	0,69	1	2,3	2,5	2,0	0,000[illegible]
RA71B6	0,25	6	860	56	0,72	1	3,0	2,2	2,0	0,000[illegible]
RA80A2	0,75	9	2820	74	0,83	2	5,3	2,5	2,7	0,000[illegible]
RA80B2	1,1	11	2800	77	0,86	2	5,2	2,6	2,8	0,001[illegible]
RA80A4	0,55	8	1400	71	0,80	1	5,0	2,3	2,8	0,001[illegible]
RA80B4	0,75	10	1400	74	0,80	2	5,0	2,5	2,8	0,002[illegible]
RA80A6	0,37	8	910	62	0,72	1	3,3	2,0	2,5	0,002[illegible]
RA80B6	0,55	11	915	63	0,72	1	3,3	2,0	2,5	0,003[illegible]
RA90S2	1,5	13	2835	79	0,87	3	6,5	2,8	3,0	0,001[illegible]
RA90L2	2,2	15	2820	82	0,87	4	6,5	2,9	3,4	0,001[illegible]
RA90S4	1,1	13,5	1420	77	0,80	3	5,5	2,3	2,6	0,003[illegible]
RA90L4	1,5	15,5	1420	78,5	0,80	4	5,5	2,3	2,8	0,004[illegible]
RA90S6	0,75	13	935	70	0,72	2	4,0	2,2	2,5	0,0040
RA90L6	1,1	15	925	72	0,72	2	4,0	2,2	3,0	0,0052
RA100L2	3,0	20	2895	83	0,86	6	7,0	2,4	2,6	0,0038
RA100LA4	2,2	22	1420	79	0,82	5	6,0	2,2	2,6	0,0048
RA100LB4	3,0	24	1420	81	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058
RA100L6	1,5	22	925	76	0,76	4	4,5	2,0	2,1	0,0063
RA112M2	4,0	41	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082

Тип двигателя	$P_н$, кВт	Масса, кг	$n_н$, об/мин	η, %	cosφ	$J_н$, А	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	J, кг · м²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RA112M4	4,0	37	1430	85,5	0,84	9	6,5	2,2	2,9	0,0103
RA112M6	2,2	36	960	78	0,74	5	5,5	1,9	2,5	0,0185
RA112M8	1,5	36	700	73	0,70	5	4,5	1,7	2,1	0,0225
RA132SA2	5,5	43	2880	89	0.89	11	6,5	2,4	3,0	0,0155
RA132SB2	7,5	49	2890	89	0,89	15	7,0	2,5	3,2	0,0185
RA132S4	5,5	45	1450	85	0,85	11	7,0	2,4	3,0	0,0229
RA132M4	7,5	52	1455	83	0,83	15	7,0	2,8	3,2	0,0277
RA132S6	3,0	41	960	79	0,79	7 9	5,9	2,2	2,6	0,0252
RA132MA6	4,0	50	960	80	0,80	12	6,0	2,2	2,6	0,0368
RA132MB6	5,5	56	950	82	0,82		6,0	2,2	2,5	0,0434
RA132S8	2,2	65	720	70	0,70	6 8	5,0	1,7	2,1	0,0530
RA132M8	3,0	73	715	70	0,70		6,0	1,8	2,4	0,0625
RA160MA2	11	112	2940	87	0,89	22	6,8	2,0	3,3	0,0438
RA160MB2	15	116	2940	90	0,86	29	7,5	2,0	3,2	0,0470
RA160L2	18,5	133	2940	90	0,88	35	7,5	2,0	3,2	0,0533
RA160MA4	11	110	1460	88,5	0,86	22	6,5	1,8	2,8	0,0613
RA160ML4	15	129	1460	90	0,87	29	7,0	1,9	2,9	0,0862
RA160M6	7,5	110	970	87	0,80	16	6,0	2,0	2,8	0,0916
RA160ML6	11	133	970	88,5	0,82	23	6,5	2,2	2,9	0,1232
RA160MA8	4 5,5	107	730	84	0,71	10	4,8	1,8	2,2	0,1031
RA160MB8	7,5	112	730	84	0,71	14	4,8	1,8	2,2	0,1156
RA160L8		131	730	85	0,73	18	5,5	1,8	2,4	0,1443
RA180M2	22	147	2940	90,5	0,89	42	7,5	2,1	3,5	0,0604
RA180M4	18,5	149	1460	90,5	0,89	35	7,0	1,9	2,9	0,1038
RA180L4	22	157	1460	91	0,88	42	7,0	2,1	2,9	0,1131
RA180L6	15	155	970	89	0,82	31	7,0	2,3	3,0	0,1512
RA180L8	11	145	730	87	0,75	26	5,5	1,8	2,4	0,1897
RA200LA2	30	170	2950	92	0,89	55	7,5	2,4	3,0	0,1164
RA200LB2	37	230	2950	92	0,89	68	7,5	2,4	3,0	0,1326
RA200L4	30	200	1475	91	0,86	59	7,7	2,7	3,2	0,3200
RA200LA6	18,5	182	970	87	0,82	38	5,5	1,8	2,7	0,3100
RA200LB6	22	202	970	87	0,84	45	6,0	2,0	2,5	0,3600
RA200L8	15	202	730	88	0,80	34	5,7	2,0	2,5	0,3600

Примечания: 1. Номинальные напряжения двигателей 220, 380, 660, 220/380, 380/660 В. Токи указаны для напряжения 380 В 2. Частота питающей сети 50 Гц (по заказу — 60 Гц). 3 Степень защиты: IP44, IP54, монтажное исполнение IM1001, IM2001, IM3001.

В табл. 2.3 приводятся технические данные двигателей серии 5А по каталогу ВЭМЗа для высот оси вращения до 200 мм.

Таблица 2.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ С ВЫСОТОЙ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ДО 200 ММ, СТЕПЕНЬ ЗАЩИТЫ IP54, КЛАСС НАГРЕВОСТОЙКОСТИ F

Тип двигателя	$P_н$, кВт	При номинальной нагрузке			$I_н$, А	$M_н$, Нм	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	J, кг · м²	Масса, кг
		$n_н$, об/мин	η, %	cosφ							
5А80МА2	1,5	2820	81	0,85	3,3	5,1	2,5	6,5	2,6	0,0018	14
5А80МВ2	2,2	2830	81	0,85	4,8	7,4	2,5	6,5	2,6	0,0021	15,5
5А112М2	7,5	2885	87,5	0,89	14,6	25	2,9	7,5	3,3	0,0131	57
АИРМ132М2	11	2900	89	0,89	21,0	36	2,4	8,0	2,9	0,024	77,5
5А160S2	15	2930	90	0,89	28,4	49	2,7	7,5	3,4	0,039	126
5А160М2	18,5	2930	90,5	0,89	34,8	60	2,8	7,5	3,4	0,045	138
АИР18052	22	2930	90,5	0,89	41,4	72	2,3	7,0	2,9	0,063	160
АИР180М2	30	2935	91	0,89	56,1	98	2,3	7,5	3,4	0,076	180
Число полюсов 2р = 4, синхронная скорость 1500 об/мин											
5А80МА4	1,1	1400	74	0,8	2,8	7,5	2	4,8	2,4	0,0034	13
5А80МВ4	1,5	1405	76	0,81	3,7	10	2	5	2,4	0,0036	14,7
5А112М4	5,5	1430	86	0,83	11,7	37	2,7	6,7	2,9	0,020	56
АИРМ13254	7,5	1450	88	0,85	15,2	49	2,1	7	2,8	0,032	70
АИРМ132М4	11	1450	89	0,85	22	72	2,4	7,2	3,1	0,045	83,5
5А160S4	15	1450	89,5	0,86	29,5	99	2,3	6,1	2,6	0,075	127
5А160М4	18,5	1450	90	0,86	36,2	122	2,3	6,4	2,6	0,087	140
АНР180S4	22	1460	90,5	0,86	42,8	144	1,7	6,9	2,6	0,16	170
АИР180М4	30	1460	91,5	0,87	57,1	196	1,7	6,7	2,6	0,20	190
Число полюсов 2р = 6, синхронная скорость 1000 об/мин											
5А80МА6	0,75	930	71	0,69	2,3	7,7	2	4,5	2,4	0,0033	14
5А80МВ6	1,1	930	72	0,7	3,3	11,5	2	4,5	2,4	0,0048	16
5А112МА6	3	950	80,5	0,79	7,1	30	2,3	5,5	2,7	0,024	50
5А112МВ6	4	950	81,5	0,81	9,2	40	2,3	5,5	2,7	0,029	55
АИРМ13256	5,5	960	84,5	0,81	12,5	55	2,1	5,5	2,5	0,048	68
АИРМ132М6	7,5	970	86	0,81	16,5	75	2,2	6	2,8	0,067	81

Тип двигателя	$P_н$, кВт	При номинальной нагрузке			$I_н$, А	$M_н$, Н м	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	J, кг м^2	Масса, кг
		$n_н$, об/мин	η, %	cosφ							
5А160S6	11	970	88,5	0,84	22,5	108	2	6,5	2,8	0,11	124
5А160М6	15	975	88,5	0,84	31	148	2	6,5	2,8	0,15	150
АИР180М6	18,5	975	90	0,85	37	182	2	6,5	2,7	0,24	180
5А200М6	22	975	90,5	0,83	44,5	215	2,3	5,9	2,3	0,41	245
5А200L6	30	980	91,2	0,84	59,5	294	2,4	5,8	2,4	0,46	260
Число полюсов 2р = 8, синхронная скорость 750 об/мин											
5А80МА8	0,37	700	59	0,62	1,5	5	2,2	3,3	2,2	0,0036	13,5
5А80МВ8	0,55	700	60	0,62	2,2	7,5	2,2	3,8	2,4	0,0047	15,7
5А112МА8	2,2	710	78	0,66	6,5	30	2,3	4,5	2,5	0,024	50
5А112МВ8	3	710	78,5	0,67	8,6	40	2,3	4,5	2,5	0,029	54
АИРМ1325	4	710	81,5	0,7	10,6	54	2,1	5	2,6	0,053	68
АИРМ132М8	5,5	710	83,5	0,73	13,7	74	2,1	5,3	2,6	0,074	82
5А160S8	7,5	720	87	0,74	17,7	99	1,8	5,3	2,4	0,11	123
5А160М8	11	720	87	0,74	25,9	146	1,8	5,3	2,4	0,15	149
АИР180М8	15	725	87,5	0,79	32,9	197	1,6	5,3	2,4	0,25	180
5А200М8	18,5	730	90,5	0,77	40,5	242	2,1	6,7	2,8	0,41	240
5А200L8	22	730	91	0,8	46	288	2,1	6,7	2,8	0,46	260

2.3. Асинхронные двигатели серии 4А с короткозамкнутым ротором

Двигатели серии 4А основного исполнения рассчитаны на частоту 50 Гц, имеют степень защиты IP44 или IP23. В соответствии с ГОСТ 13267-73 имеют ряд мощностей от 0,06 до 400 кВт и оси вращения от 50 до 335 мм.

Двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт изготавливают на номинальные напряжения 220 В и 380 В; мощностью от 0,55 до 11 кВт — 220, 380, 660 В, мощностью от 132 до 400 кВт — 380/660 В. Модификации двигателей серии 4А выпускаются до настоящего времени.

Технические данные двигателей серии 4А с высотой оси вращения до 200 мм, исполнение по степени защиты IP44, способ охлаждения ICA0141 приведены в табл. 2.4.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А, ИМЕЮЩИЕ ИСПОЛНЕНИЕ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ IP44, СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ ICA0141

Тип двигателя	$P_н$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	J, кг м^2
		$n_н$, об/мин	η, %	cosφ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
4АА50А2У3	0,09	2740	60	0,7	2,2	2	1,2	5	$0{,}245\ 10^{-4}$
4АА50В2У3	0,12	2710	63	0,7	2,2	2	1,2	5	$0{,}268\ 10^{-4}$
4АА56А2У3	0,18	2800	66	0,76	2,2	2	1,2	5	$4{,}15\ 10^{-4}$
4АА56В2У3	0,25	2770	68	0,77	2,2	2	1,2	5	$4{,}65\ 10^{-4}$
4А63А2У3	0,37	2750	70	0,86	2,2	2	1,2	5	$7{,}63\ 10^{-4}$
4А63В2У3	0,55	2740	73	0,86	2,2	2	1,2	5	$9\ 10^{-4}$
4А71А2У3	0,75	2840	77	0,87	2,2	2	1,2	5,5	$9{,}75\ 10^{-4}$
4А71В2У3	1,1	2810	77,5	0,87	2,2	2	1,2	5,5	$10{,}5\ 10^{-4}$
4А80А2У3	1,5	2850	81	0,85	2,2	2	1,2	6,5	$18{,}3\ 10^{-4}$
4А80В2У3	2,2	2850	83	0,87	2,2	2	1,2	6,5	$21{,}3\ 10^{-4}$
4А90L2У3	3	2840	84,5	0,88	2,2	2	1,2	6,5	$35{,}3\ 10^{-4}$
4А1000S2У3	4	2880	86,5	0,89	2,2	2	1,2	7.5	$59{,}3\ 10^{-4}$
4А100L2У3	5,5	2880	87,5	0,91	2,2	2	1,2	7,5	$75\ 10^{-4}$
4А112М2У3	7,5	2900	87,5	0,88	2,2	2	1	7,5	$1{,}0\ 10^{-2}$
4А132М2У3	11	2900	88	0,9	2,2	1,6	1	7,5	$2{,}25\ 10^{-2}$
4А160S2У3	15	2940	88	0,91	2,2	1,4	1	7,5	$4{,}75\ 10^{-2}$
4А160М2У3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	1	7,5	$5{,}25\ 10^{-2}$
4А180S2У3	22	2940	88,5	0,91	2,2	1,4	1	7,5	$7{,}0\ 10^{-2}$
4А180М2У3	30	2945	90,5	0,9	2,2	1,4	1	7,5	$8{,}5\ 10^{-2}$
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
4АА50А4У3	0,06	1389	50	0,6	2,2	2	1,2	5	$0{,}29\ 10^{-4}$
4АА50В4У3	0,09	1370	55	0,6	2,2	2	1,2	5	$0{,}325\ 10^{-4}$
4АА56А4У3	0,12	1375	63	0,66	2,2	2	1,2	5	$7\ 10^{-4}$
4АА56В4У3	0,18	1365	64	0,64	2,2	2	1,2	5	$7{,}88\ 10^{-4}$
4АА63А4У3	0,25	1380	68	0,65	2,2	2	1,2	5	$12{,}4\ 10^{-4}$
4АА63В4У3	0,37	1365	68	0,69	2,2	2	1,2	5	$13\ 10^{-4}$
4А71А4У3	0,55	1390	70,5	0,70	2,2	2	1,6	4,5	$13{,}8\ 10^{-4}$

Тип двигателя	$P_н$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	J, кг м²
		$n_н$ об/мин	η, %	cosφ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4А71В4У3	0,75	1390	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5	14,3 10^{-4}
4А80А4У3	1,1	1420	75	0,81	2,2	2	1,6	5	32,3 10^{-4}
4А80В4У3	1,5	1415	77	0,83	2,2	2	1,6	5	33,3 10^{-4}
4А90L4У3	2,2	1425	80	0,83	2,2	2	1,6	6	56 10^{-4}
4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6 0	86,8 10^{-4}
4А100L4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	1,13 10^{-2}
4А112М4У3	5,50	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	1,75 10^{-2}
4А132S4У3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	2,75 10^{-2}
4А132М4У3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5	4 10^{-2}
4А160S4У3	15,0	1465	88,5	0,88	2 3	1 4	1,0	7,0	10,3 10^{-2}
4А160М4У3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	12,8 10^{-2}
4А180S4У3	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	1 4	1,0	6,5	19 10^{-2}
4А180М4У3	30,0	1470	91,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	23,3 10^{-2}
Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
4АА63А6У3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	17,4 10^{-4}
42А63В6У3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1 5	3,0	19 10^{-4}
4А71А6У3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	19,3 10^{-4}
4А71В6У3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2 0	1,8	4,0	20,3 10^{-4}
4А80А6У3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	46 10^{-4}
4А80В6У3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	46,3 10^{-4}
4А90L6У3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	73,5 10^{-4}
4А100L6У3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	1,31 10^{-2}
4А112МА6У3	3,00	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6 0	1,75 10^{-2}
4А112МВ6У3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	2,0 10^{-2}
4А132S6У3	5,50	965	85,0	0,80	2,5	2,0	1,8	6,5	4,0 10^{-2}
4А132М6У3	7,50	970	85,5	0,81	2,5	2,0	1,8	6,5	5,75 10^{-2}
4А160S6У3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	1,0	6,0	13,8 10^{-2}
4А160М6У3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	18,3 10^{-2}
4А180М6У3	18,5	975	88,0	0,87	2,0	1,2	1,0	5,0	22,0 10^{-2}
4А200М6У3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	40 10^{-2}
4А200L6У3	30,0	980	90,5	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	45,3 10^{-2}

Тип двигателя	$P_н$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	J, кг м^2
		$n_н$, об/мин	η, %	cosφ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения 750 об/мин									
4A71B8У3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4A80A8У3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4A80B8У3	0,55	700	64,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$40,5\ 10^{-4}$
4A90LA8У3	0,75	700	68,0	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5	$67,5\ 10^{-4}$
4A90LB8У3	1,10	700	70,0	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5	$86,3\ 10^{-4}$
4A100L83	1,50	700	74,0	0,65	1,9	1,6	1,2	4,0	$1,3\ 10^{-2}$
4A112MA8У3	2,20	700	76,5	0,71	2,2	1,9	1,4	5,0	$1,75\ 10^{-2}$
4A112MB8У3	3,0	700	79,0	0,74	2,2	1,9	1,4	5,0	$2,5 \cdot 10^{-2}$
4A132S8У3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	1,4	5,5	$4,25\ 10^{-2}$
4A132M8У3	5,50	720	83,0	0,74	2,6	1,9	1,4	5,5	$5,75\ 10^{-2}$
4A160S8У3	7,50	730	86,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160M8У3	11,0	730	87,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$18\ 10^{-2}$
4A180M8У3	15,0	730	87,0	0,82	2,0	1,2	1,0	6,0	$25 \cdot 10^{-2}$
4A200M8У3	18,5	735	88,5	0,84	2,2	1,2	1,0	5,5	$40 \cdot 10^{-2}$
4A200L8У3	22,0	730	88,5	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$
4A225M8У3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	1,0	6,0	$73,8 \cdot 10^{-2}$

2.4. Асинхронные двигатели серии АИ

Серия двигателей АИ (Асинхронные Интерэлектро) была разработана в рамках международной организации Интерэлектро специалистами бывших стран социалистического содружества (НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СРР, СССР, ЧССР и СФРЮ), в которых был освоен их серийный выпуск.

Двигатели серии АИ отвечают всем рекомендациям МЭК, отечественных стандартов и стандартов СЭВ (1348-78-4744-84). Двигатели основного исполнения имеют степень защиты IP54 и IP23. Двигатели с высотой оси вращения 200 мм и более имеют степень защиты IP23.

Способы охлаждения, принятые в серии, IC0141 для двигателей со степенью защиты IPS4 и IP44. 01 означает обдув внешней поверхности двигателя вентилятором, посаженным на вал машины и охлаждающим ее окружающим воздухом.

Цифра 41 означает, что воздух внутри машины циркулирует под действием ротора, либо дополнительного внутреннего вентилятора.

По климатическому исполнению: тропические, влаго-морозостойкие, химостойкие, водостойкие.

В табл. 2.5 приводятся технические данные двигателей серии АИ основного исполнения.

Таблица 2.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ

Тип двигателя	$P_н$, кВт	КПД, %	cosφ	$S_н$, %	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	Момент инерции, кг м²	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Синхронная частота вращения 3000 об/мин										
АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000025	2,5
АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000028	2,8
АИР56А2	0,18	68	0,78	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00042	3,4
АИР56В2	0,25	69	0,79	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00047	3,9
АИР63А2	0,37	72	0,86	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00076	4,7
АИР63В2	0,55	75	0,85	9	2,2	2,2	1,8	5	0,0009	5,45
АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6	2,1	2,2	1,6	6	0,00097	6,5
АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6	0,0011	8,8
АИР80А2	1,5	81	0,85	5	2,1	2,2	1,6	7	0,0018	9,8
АИР80В2	2,2	83	0,87	5	2	2,2	1,6	7	0,0021	13,2
АИР90L2	3	84,5	0,88	5	2	2,2	1,6	7	0,0035	16,7
АИР100S2	4	87	0,88	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	88	0,89	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0075	27,4
АИР112М2	7,5	87,5	0,88	3,5	2	2,2	1,6	7,5	0,01	41
АИР132М2	11	88	0,9	3	1,6	2,2	1,2	7,5	0,023	64
АИР160S2	15	90	0,89	3	1,8	2,7	1,7	7	0,039	100
АИР160М2	18,5	90,5	0,9	3	2	2,7	1,8	7	0,043	110
АИР180S2	22	90,5	0,89	2,7	2	2,7	1,9	7	0,057	160
АИР180М2	30	91,5	0,9	2,5	2,2	3	1,9	7,5	0,07	180
Синхронная частота вращения 1500 об/мин										
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00079	3,9

Тип двигателя	$P_н$, кВт	КПД, %	cosφ	$S_н$, %	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	Момент инерции, кг · м²	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	0,0087	21,6
АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	0,028	58
АИР132М4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,078	100
АИР160М4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	0,15	170
АИР180М4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	0,19	190
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
АИР63А6	0,19	56	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0018	4,65
АИР63В6	0,25	59	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0022	5,6
АИР71А6	0,37	65	0,65	8,5	2	2,2	1,6	4,5	0,0017	7,8
АИР80В6	1,1	74	0,74	8	2	2,2	1,6	4,5	0,0046	13,4
АИР90L6	1,5	76	0,72	7,5	2	2,2	1,6	6	0,0073	16,9
АИР100L6	2,2	81	0,74	5,5	2	2,2	1,6	6	0,013	22,8
АИР112МА6	3	81	0,76	5	2	2,2	1,6	6	0,017	35
АИР112МВ6	4	82	0,81	5	2	2,2	1,6	6	0,021	40,4
АИР132S6	5,5	85	0,8	4	2	2,2	1,6	7	0,04	57
АИР132М6	7,5	85,5	0,81	4	2	2,2	1,6	7	0,058	68
АИР160S6	11	88	0,83	3	2	2,7	1,6	6,5	0,12	100
АИР160М6	15	88	0,85	3	2	2,7	1,6	6,5	0,15	120
АИР180М6	18,5	89,5	0,85	2	1,8	2,4	1,6	6,5	0,2	180
АИР200М6	22	90	0,83	2	1,6	2,4	1,4	6,5	0,36	225
АИР200L6	30	90	0,85	2,5	1,6	2,4	1,4	6,5	0,4	250

Тип двигателя	$P_н$, кВт	КПД, %	cosφ	$S_н$, %	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_{min}}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	Момент инерции, кг · м²	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
АИР71В8	0,25	56	0,65	8	1,8	1,9	1,4	4	0,0019	7,8
АИР80А8	0,37	60	0,61	6,5	1,8	1,9	1,4	4	0,0034	13,8
АИР80В8	0,55	64	0,63	6,5	1,8	1,9	1.4	4	0,0041	13,5
АИР90LA8	0,75	70	0,66	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0067	19,7
АИР90LB8	1,1	72	0,70	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0086	22,3
АИР100L8	1,5	76	0,73	6	1,6	1,7	1,2	5,5	0,013	31,3
АИР112МА8	2,2	76,5	0,71	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,017	36
АИР112МВ8	3	79	0,74	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,025	41
АИР132S8	4	83	0,7	4,5	1,8	2,2	1,4	6	0,042	56
АИР132М8	5,5	83	0,74	5	1,8	2,2	1,4	6	0,057	70
АИР160S8	7,5	87	0,75	3	1,6	2,4	1,4	5,5	0,12	100
АИР160М8	11	87,5	0,75	3	1,6	2,4	1,4	6	0,15	120
АИР180М8	15	89	0,82	2,5	1,6	2,2	1,5	5,5	0,23	180
АИР200М8	18,5	89	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,36	225
АИР200L8	22	90	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,4	250
АИР225М8	30	90,5	0,81	2,5	1,4	2,3	1,3	6	0,61	305

Машины имеют модификации: с фазным ротором (К), частотно регулируемые, многоскоростные, с повышенным скольжением (С), повышенным пусковым моментом (R), однофазные (Y, Е), на частоту 60 Гц.

3. Расчет и выбор мощности трехфазных двигателей

3.1. Нагрев и охлаждение двигателей в электроприводе

При включении двигателя в сеть и наличии на его валу нагрузки происходит его нагрев, зависящий от тепловых потерь ΔP, времени нагрева t, теплоемкости C и теплоотдачи двигателя A. Эти величины связаны между собой уравнением теплового баланса электродвигателя:

$$\Delta P dt = C d\tau + A\tau dt,$$

где τ — превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды, которую принимают, как правило, равной +40 °С.

Решение этого уравнения дает зависимость изменения *превышения температуры* двигателя во времени. Зависимость имеет экспоненциальный характер (рис. 3.1):

$$\tau = \tau_{УСТ}\left(1 - e^{-t/T_Н}\right) + \tau_{НАЧ} e^{-t/T_Н},$$

где $\tau_{УСТ}$ — установившееся превышение температуры, °С; $\tau_{НАЧ}$ — начальное превышение температуры, °С; $T_Н$ — постоянная времени нагревания, с, $T_Н = C/A$.



Рис. 3.1. Кривые нагрева *1* и охлаждения *2* электродвигателя

3.2. Номинальные режимы работы электродвигателей

Выбор мощности двигателя зависит от режима его работы. Режимы работы стандартизованы.

Различают три основных режима: *длительный* (обозначается символом S1), *кратковременный* (S2) и *повторно-кратковременный* (S3).

Длительный — это режим, в котором превышение температуры двигателя достигает установившегося значения.

Длительный режим подразделяют на два вида: а) *режим с постоянной нагрузкой* и б) *режим с переменной нагрузкой.* К типу *а* относятся электроприводы (ЭП) вентиляторов, насосов, компрессоров, транспортеров, текстильных станков и др. К типу *б* — ЭП поршневых компрессоров, прокатных станов, токарных, фрезерных, сверлильных станков и др.

Режим работы ЭП отражают при помощи *нагрузочных диаграмм* (НД), которые представляют собой зависимость мощности P, момента M или тока двигателя I от времени t.

Примеры НД для длительного режима и кривая нагрева двигателя приведены на рис. 3.2.

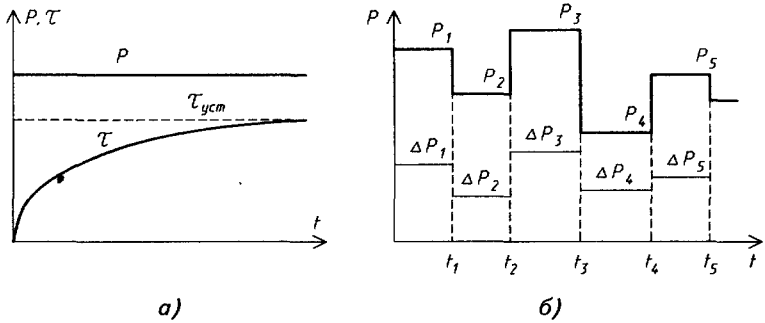


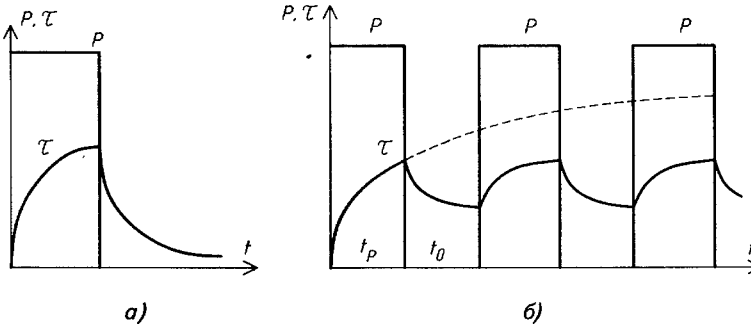
Рис. 3.2. Нагрузочные диаграммы для длительного режима: *а* — с постоянной нагрузкой; *б* — с переменной нагрузкой

В *кратковременном режиме* двигатель работает непродолжительное время, в течение которого превышение его температуры не достигает установившегося значения, а после отключения он успевает охладиться до температуры охлаждающей среды (рис. 3.3,*а*). В этом режиме работают приводы шлюзов, задвижек нефте- и газопроводов.

Повторно-кратковременным называют режим, в котором периоды включения двигателя чередуются с периодами пауз, причем в период нагрузки превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения, а при отключении не успевает достичь температуры охлаждающей среды. При-

меры нагрузочных диаграмм и кривых нагрева для этих режимов приведены на рис. 3.3,*б*.

Свойства двигателей в повторно-кратковременном режиме зависят от *продолжительности включения (ПВ).* Как видно из диаграммы на рис. 3.3,*б*, двигатель нагружен в течение времени $t_р$, а в течение времени t_0 следует пауза. Их сумма составляет время цикла $t_ц$.



а) *б)*

Рис. 3.3. Нагрузочные диаграммы и диаграммы нагрева:
а — для кратковременного режима работы;
б — для повторно-кратковременного режима работы

ПВ — это величина, равная отношению времени работы двигателя под нагрузкой ко времени цикла, измеряемое в процентах:

$$ПВ = 100\frac{t_р}{t_р + t_0} = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100.$$

ПВ стандартизованы и составляют 15, 25, 40, 60 и 100%. Значение *ПВ* указывается *на паспорте двигателя.*

Двигатель мощностью $P_{н1}$ с *ПВ1* может быть использован при другой *ПВ2.* Мощность P_2, на которую можно при этом нагружать двигатель, определяется приближенным соотношением, Вт:

$$P_2 = P_{н1}\sqrt{\frac{ПВ1}{ПВ2}}.$$

Из этого выражения следует, что двигатель с большим ПВ при его использовании в механизме с меньшим ПВ можно нагружать на большую мощность и наоборот.

Пример.

Двигатель механизма передвижения тележки крана с номинальной мощностью 2 кВт с ПВ = 40% предполагается заменить на новый двигатель такой же мощности с ПВ = 60%.

На какую мощность можно загружать новый двигатель?

Решение.

В соответствии с приведенной выше формулой:

$$P_2 = 2\sqrt{\frac{60}{40}} = 2{,}45 \text{ кВт.}$$

Таким образом, при использовании двигателя с большим ПВ для работы в механизме с меньшим ПВ этот двигатель допускает перегрузку в данном случае на 0,45 кВт.

Пусть теперь заменяемый двигатель имел ПВ = 60%, а новый, выбранный для замены двигатель мощностью 2 кВт, имеет ПВ = 40%. Проверим, можно ли использовать этот новый двигатель в механизме с ПВ = 60%. Получаем:

$$P_2 = 2\sqrt{\frac{40}{60}} = 1{,}63 \text{ кВт.}$$

Это означает, что в данном механизме новый двигатель использовать на его полную мощность 2 кВт нельзя, а только на 1,63 кВт, иначе его перегрузка составит 19%. Следовательно, такой двигатель использовать в механизме нежелательно, нужно выбрать двигатель большей мощности.

3.3. Выбор электродвигателя

При выборе двигателя руководствуются следующими основными соображениями:

а) *род тока и номинального напряжения* осуществляют, исходя из экономических соображений, с учетом того, что самыми простыми, дешевыми и надежными являются асинхронные двигатели, а самыми дорогими и сложными — двигатели постоянного тока;

б) *выбор номинальной частоты вращения;*

в) *выбор конструктивного исполнения двигателя* выполняют, учитывая три фактора: защиту его от воздействия окружающей среды, способ и обеспечение охлаждения двигателя и способ монтажа.

3.4. Расчет мощности двигателей для длительного режима работы

Расчет мощности двигателей при постоянной нагрузке

При *постоянной нагрузке* (рис. 3.2,*а*) определяются мощность P_C или момент M_C механизма, приведенные к валу двигателя, и по каталогу выбирается двигатель, имеющий ближайшую не меньшую номинальную мощность $P_н$: $P_н \geq P_C$.

Для тяжелых условий пуска осуществляется проверка величины пускового момента двигателя так, чтобы он превышал момент сопротивления механизма. Пусковой момент

$$M_п = M_н \mu_п, \text{ а } M_н = P_н \omega_н,$$

где $\mu_п$ — кратность пускового момента двигателя.

При *длительной переменной нагрузке* (рис. 3.2,*б*) определение номинальной мощности двигателя производят по *методу средних потерь*, либо по *методу эквивалентных величин* (мощности, момента или тока).

Расчет мощности двигателя по методу средних потерь

Метод основан на предположении, что при равенстве номинальных потерь двигателя $\Delta P_н$ и средних потерь, определяемых по диаграмме нагрузки, температура двигателя не будет превышать допустимую, °С:

$$\tau_н = \frac{\Delta P_н}{A} = \frac{\Delta P_{ср}}{A}.$$

1. Определяется средняя мощность нагрузки, кВт:

$$P_{ср} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \ldots + P_п t_п}{t_1 + t_2 + \ldots + t_п}.$$

2. Предварительно подбирается двигатель с номинальной мощностью $P_н$, кВт. При этом

$$P_н = (1{,}2 - 1{,}3) P_{ср}.$$

3. Определяются номинальные потери выбранного двигателя, кВт:

$$\Delta P_н = \frac{P_н (1 - \eta_н)}{\eta_н}.$$

4. Определяются по диаграмме потери $\Delta P_1, \Delta P_2, \ldots \Delta P_n$, кВт:

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n},$$

где η_n — КПД, соответствующий мощности P_n и зависящий от загрузки двигателя

$$\eta_n = \frac{1}{1+\left(\frac{1}{\eta_n}-1\right)\frac{\frac{a}{k}+k}{a+1}},$$

здесь a — отношение постоянных потерь в двигателе, указанных в каталоге, к номинальным:

$$a = \frac{\Delta P_{\text{mмех}} + \Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{н}}} \quad \text{и} \quad k = \frac{P_n}{P_{\text{н}}}.$$

5. Определяются по диаграмме средние потери, кВт:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \ldots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}.$$

6. Проверяется условие равенства средних и номинальных потерь. При их расхождении более чем на 10% подбирают другой двигатель и повторяют расчет.

Расчет мощности двигателя по методу эквивалентных величин

Метод основан на понятии эквивалентного или среднеквадратичного тока (мощности, момента). Переменные потери в двигателе пропорциональны *квадрату тока нагрузки.*

Эквивалентным, неизменным по величине, током называют ток, создающий в двигателе такие же потери, как и изменяющийся во времени фактический ток нагрузки.

1. Определяют величину эквивалентного тока, А:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}.$$

2. По каталогу выбирают двигатель, номинальный ток которого равен или несколько больше $I_{\text{э}}$.

3. Двигатель проверяют по перегрузочной способности: отношение наибольшего момента сопротивления к номинальному не должно превышать допустимого значения, приводимого в каталогах.

Если мощность и вращающий момент двигателя пропорциональны величине тока, то для расчета можно воспользоваться выражениями для эквивалентной мощности, кВт:

$$P_Э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}},$$

или эквивалентного момента, Н·м:

$$M_Э = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}.$$

3.5. Расчет мощности двигателей для повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы

Повторно-кратковременный режим работы (рис. 3.3,*б*).

1. По нагрузочной диаграмме определяют среднюю мощность $P_{СР}$.

2. Выбирают двигатель, номинальная мощность которого не меньше средней мощности.

3. Определяют эквивалентную мощность $P_Э$ (эквивалентный момент $M_Э$ или ток $I_Э$).

4. Эквивалентную мощность, кВт (момент, Н·м; ток, А) пересчитывают для ближайшего стандартного значения $ПВ_{ном}$:

$$P = P_Э \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ном}}};$$

$$M = M_Э \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ном}}};$$

$$I = I_Э \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ном}}}.$$

5. По каталогу выбирают двигатель с номинальной мощностью $P_н$ при $ПВ_{ном}$ так, чтобы $P_н \geq P$.

Выбранный двигатель проверяют по перегрузочной способности.

Кратковременный режим работы (рис. 3.3,*а*).

Для этого режима используются двигатели кранового типа с продолжительностью 15, 30, 60 и 90 мин, для которых указываются соответствующие номинальные мощности.

Мощность двигателя определяется по методу эквивалентных величин.

В этом режиме могут использоваться и двигатели, рассчитанные на длительный режим работы. Двигатель выбирают заниженной мощности. Следовательно, ток двигателя в период работы в этом режиме может существенно превышать номинальный, однако превышение температуры при этом не должно быть больше допустимого, °С:

$$\tau_{УСТ} = \frac{\Delta P_{КР}}{A} = K + I_{КР}^2 R.$$

Ток двигателя в кратковременном режиме работы, допустимый в течение времени $t_{КР}$, А:

$$I_{КР} = I_Н \sqrt{\frac{1+e}{1-e}},$$

где $e = e^{\,t_Р/T_Н}$; $T_Н$ — постоянная времени нагрева двигателя, с.

Коэффициент тепловой перегрузки двигателя:

$$p_Т = \frac{\Delta P_{КР}}{\Delta P_h} = \frac{K + I_{КР}^2 R}{K + I_h^2 R}$$

или

$$p_Т = \frac{1}{1 - e^{-t_Р/T_Н}}.$$

Если постоянные потери неизвестны, то для номинального режима их ориентировочно принимают равными переменным потерям в двигателе, Вт:

$$K = I_Н^2 R.$$

Если известны потери $\Delta P_{КР}$ и $\Delta P_Н$, то постоянная времени определяется из соотношения, с:

$$T_Н = \frac{t_{КР}}{\ln\left(\frac{p_Т}{p_Т - 1}\right)}.$$

где Q — производительность вентилятора, м^3/с; H — напор (давление) газа, Па; $\eta_в$ — КПД вентилятора, равный 0,5...0,85 для осевых, 0,4...0,7 для центробежных вентиляторов; $\eta_п$ — КПД механической передачи; $k_з$ — коэффициент запаса, равный 1,1...1,2 при мощности больше 5 кВт, 1,5 — при мощности до 2 кВт и 2,0 — при мощности до 1 кВт.

По той же формуле определяется и мощность двигателя центробежного компрессора.

Мощность двигателя насоса

Поршневые насосы являются тихоходными механизмами, поэтому двигатели поршневых насосов соединяются с валом насоса через замедляющую передачу (клиноременную или зубчатую).

Центробежные насосы в большинстве случаев выполняются быстроходными, поэтому их приводные двигатели имеют высокую угловую скорость (n_1 = 1500...3000 об/мин) и соединяются с валом насоса непосредственно.

Мощность двигателя насоса $P_{дн}$ определяется по формуле, Вт:

$$P_{дн} = \frac{k_з \rho g Q (H_с + \Delta H)}{\eta_{нас} \eta_п},$$

где $k_з$ — коэффициент запаса, рекомендуется принимать его 1,1...1,3 в зависимости от мощности двигателя; ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м^3; g = 9,81 — ускорение свободного падения, м/с^2; Q — производительность насоса, м^3/с; $H_с$ — статический напор, определяемый как сумма высот всасывания и нагнетания, м; ΔH — потеря напора в трубопроводах насосной установки, м, который зависит от сечения и качества обработки труб, кривизны участков трубопровода, наличия вентилей и задвижек; $\eta_{нас}$ — КПД насоса, равный 0,9...0,95; $\eta_п$ — КПД передачи.

Для поршневых насосов КПД принимается $\eta_{нас}$ = 0,7...0,9; для центробежных насосов с давлением свыше 0,4...10^5 Па КПД принимается $\eta_{нас}$ = 0,6...0,75; с давлением до 0,4...10^5 Па — $\eta_{нас}$ = 0,45...0,6.

Правильный выбор скорости вращения двигателя для центробежного насоса особо важен, поскольку от скорости зависят производительность насоса Q, создаваемый им напор H, момент M и мощность P на валу двигателя.

Мощность двигателя металлорежущих станков

Мощность резания двигателя металлорежущих станков определяется по упрощенной формуле, Вт:

$$P_{\text{р}} = \frac{FSv_{\text{р}}}{\eta_{\text{с}}},$$

где F — удельное сопротивление резанию, Дж/м^3; S — сечение срезаемой стружки, м^2; $v_{\text{р}}$ — линейная скорость резания, м/с; $\eta_{\text{с}}$ — КПД станка.

Мощность двигателя механизма подъема кранов

Мощность двигателя механизма подъема груза кранов, тельферов и других механизмов в установившемся режиме (при подъеме с неизменной скоростью) определяется по формуле, Вт:

$$P_{\text{п}} = \frac{G + G_0 v_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}},$$

где G — сила тяжести поднимаемого груза, Н; G_0 — сила тяжести захватывающего приспособления, Н; $v_{\text{п}}$ — скорость подъема груза, м/с; $\eta_{\text{п}}$ — КПД подъемного механизма.

Номинальные значения КПД крановых передач находятся в пределах: 0,8...0,85 — для механизмов подъема с цилиндрическими зубчатыми колесами и 0,65...0,7 с червячной передачей; 0,8...0,9 и 0,65...0,75 — соответственно для механизмов передвижения мостов и тележек.

Статический момент $M_{\text{с}}$ на валу двигателя подъема (передвижения) определяется по формуле, Н·м:

$$M_{\text{с}} = \frac{P_{\text{п}} R}{v_{\text{п}} i_{\text{р}} i_{\text{пс}}},$$

где $P_{\text{п}}$ — статическая мощность, Вт; $v_{\text{п}}$ — скорость движения крюка или моста (тележки), м/с; R — радиус барабана подъемной лебедки или ходового колеса, м; $i_{\text{р}}$ — передаточное число редуктора механизма подъема или передвижения; $i_{\text{пс}}$ — передаточное число полиспаста.

Мощность $P_м$ на валу двигателя передвижения моста (тележки) в установившемся режиме можно определить по формуле, Вт:

$$P_м = \frac{k_1(G + G_0 + G_{м(т)})(\mu r + f)v_{м(т)}}{R_к \eta_{м(т)}},$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению из-за трения реборд ходовых колес о рельсы (k_1 = 1,8...2,5); G, G_0 и $G_{м(т)}$ — соответственно сила тяжести перемещаемого груза, захватывающего устройства и моста с тележкой (или только тележки), Н; $v_{м(т)}$ — скорость передвижения моста (тележки), м/с; $R_к$ — радиус ходового колеса, м; r — радиус шейки оси ходового колеса, м; μ — козффициент трения в опорах ходовых колес (принимается равным 0,015...0,02 при подшипниках качения и 0,08...0,15 при подшипниках скольжения); f — коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам (принимается равным 0,0005...0,0012); $\eta_{м(т)}$ — КПД механизма передвижения моста (тележки).

3.7. Примеры расчета мощности и выбора двигателя

Задача 1.

Механизм строительного крана имеет следующий график нагрузки: P_1 = 45 кВт, t_1 = 1 мин, P_2 = 23 кВт, t_2 = 4 мин, P_3 = 38 кВт, t_3 = 1 мин. Время остановки составляет t_0 = 7 мин. Пуск двигателя производится вхолостую, т. е. без нагрузки на валу. Номинальная скорость вращения составляет 935 об/мин, номинальное напряжение 220/380 В.

Требуется выбрать для этого механизма асинхронный двигатель.

Решение.

Определим время работы за один цикл:

$$t_р = t_1 + t_2 + t_3 = 1 + 1 + 4 = 6 \text{ мин.}$$

Определим расчетную ПВ электропривода при данном графике нагрузки:

$$ПВ_р = \frac{t_р}{t_р + t_0} 100 = 46\%.$$

Определим эквивалентную мощность двигателя для повторно-кратковременного режима:

$$P_Э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = 9{,}65 \text{ кВт}.$$

Приведем полученную мощность к стандартному значению $ПВ_С = 40\%$ и определим расчетную мощность:

$$P_Р = P_Э \sqrt{\frac{ПВ_Р}{ПВ_С}} = 9{,}65 \sqrt{\frac{46}{40}} = 10,\ 35 \text{ кВт}.$$

Выберем, например, по каталогу в [4] асинхронный крано-во-металлургический двигатель с короткозамкнутым ротором типа МТКF мощностью $P_Н = 11$ кВт, $n_Н = 935$ об/мин, перегрузочная способность (отношение максимального момента, развиваемого двигателем к номинальному) $M_М / M_Н = 3{,}0$, кратность пускового момента (отношение пускового момента к номинальному) $M_П / M_Н = 2{,}8$.

Определим его номинальный момент, т. е. наибольший длительно допустимый для этого двигателя момент:

$$M_Н = 9550 \frac{P_Н}{n_Н} = \frac{9550 \cdot 11}{935} = 112{,}4 \text{ Н·м}.$$

Максимальный момент:

$$M_М = 3M_Н = 3 \cdot 112{,}4 = 337{,}2 \text{ Н·м}.$$

Теперь определим максимальный момент сопротивления нагрузки, соответствующий наибольшему значению из мощностей $P_1 = 45$ кВт:

$$M_{М\,С} = \frac{9550 \cdot 45}{935} = 459 \text{ Н·м}.$$

Как видим, наибольший момент сопротивления нагрузки превышает критический момент двигателя. Это означает, что при появлении этой нагрузки двигатель может «опрокинуться» и остановиться. Следовательно, нормальная работа электропривода невозможна.

Выбираем следующий ближайший больший по мощности двигатель. Его параметры: $P_Н = 16$ кВт; $n_Н = 940$ об/мин; $M_М / M_Н = 3{,}0$; $M_П / M_Н = 2{,}8$.

Проверяем двигатель по перегрузочной способности:

$$M_м = 3M_н = 3 \cdot 9550 \frac{P_н}{n_н} =$$

$$= \frac{3 \cdot 9550 \cdot 16}{935} = 487{,}6 \text{ Н·м}.$$

Поскольку этот момент превышает наибольший момент нагрузки, то можно окончательно принять двигатель мощностью 16 кВт.

Задача 2.

Производительность компрессора $Q = 2$ м^3/мин; начальное давление воздуха $p_1 = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па, конечное давление на выходе $p_2 = 10 \cdot 10^5$ Па; индикаторный КПД компрессора $\eta_К = 0{,}78$; скорость вращения двигателя 950 об/мин.

Выбрать приводной двигатель для поршневого компрессора.

Решение.

Найдем работу изотермического и адиабатического сжатия A по данным, приведенным в табл. 2.1, для $p_2 = 10 \cdot 10^5$ Па находим $A = 272 \cdot 10^3$ Дж/м^3.

Принимаем $k_з = 1{,}05$ и $\eta_п = 0{,}95$.

Определяем мощность двигателя компрессора:

$$P_К = \frac{k_з Q A}{\eta_К \eta_п} = \frac{1{,}05 \cdot 2 \cdot 272 \cdot 10^3}{60 \cdot 0{,}78 \cdot 0{,}95} = 12800 \text{ Вт}.$$

Выбираем в соответствии с табл. 1.3 или по [4] асинхронный короткозамкнутый двигатель RA180L6 со следующими данными: $P_н = 15$ кВт, $U_н = 380/220$ В, $I_н = 31$ А, $n_н = 970$ об/мин, $\eta_н = 89\%$, $\cos\varphi_н = 0{,}82$.

Задача 3.

Необходимо выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для вентилятора, который при скорости вращения $n_н = 950$ об/мин обеспечивает производительность $Q_н = 2$ м^3/мин и напор $H_н = 500$ Па.

Найти значения скорости двигателя, необходимые для регулирования производительности в пределах 2,6...2,8 м^3/с.

Значение КПД вентилятора можно принять неизменным и равным $\eta_в = 0{,}65$. Вентилятор соединен с двигателем непосредственно.

Решение.

Примем коэффициент запаса равным $k_з = 1{,}1$, а коэффициент полезного действия передачи $\eta_п = 1$, поскольку передаточного механизма нет.

Мощность двигателя для вентилятора $P_в$ найдем по приведенной выше формуле, Вт:

$$P_в = \frac{k_з Q H}{\eta_в \eta_п} = \frac{1{,}1 \cdot 3 \cdot 500}{0{,}65} = 2540 \text{ Вт}.$$

Выберем по каталогу [4] или по табл. 2.1 подходящий асинхронный короткозамкнутый двигатель, например типа RA132S6, со следующими данными: $P_н = 3$ кВт, $U_н = 380/220$ В, $I_н = 31$ А, $n_н = 960$ об/мин, $\eta_н = 89\%$, $\cos\varphi_н = 0{,}82$.

4. Расчет и выбор проводов, кабелей, автоматических выключателей и предохранителей

4.1. Расчет и выбор проводов и кабелей

Вслед за расчетом мощности двигателя и его выбором возникают проблемы его присоединения к сети управления и защиты двигателя от возможных перегрузок и коротких замыканий. Рассмотрим эти задачи.

Для присоединения двигателя к сети трехфазного переменного тока можно использовать либо изолированные медные или алюминиевые провода, либо кабели с медными или алюминиевыми жилами. Сечение проводов или кабелей выбирается с учетом следующих требований:

1) провода, кабели не должны нагреваться сверх допустимой температуры при протекании по ним расчетного тока нагрузки;

2) отклонения напряжения на зажимах электроприемников не должны превышать (−2,5 + 5%) для осветительной нагрузки и ±5% для силовой от значения номинального напряжения;

3) провода, кабели должны обладать достаточной для данного вида сети механической прочностью; для большинства условий прокладки алюминиевых проводов их сечение должно быть не менее 2,5 мм^2, а для медных проводов — 0,5...0,75 мм^2.

4) аппараты защиты должны обеспечивать защиту всех участков сети от коротких замыканий;

5) для некоторых видов сетей в соответствии с Правилами условия эксплуатации выбор сечения проводов осуществляется по экономической плотности тока.

Для выбора сечения определяют расчетную максимальную токовую нагрузку I_{max}, А:

а) для трехфазной сети:

$$I_{max} = \frac{P_{max} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{нл} \cos \varphi};$$

б) для однофазной сети:

$$I_{max} = \frac{P_{max} \cdot 10^3}{U_{нф} \cos \varphi},$$

где P_{max} — расчетная максимальная нагрузка, кВт; $U_{нф}$, $U_{нл}$ — номинальное фазное и линейное напряжения, В; cosφ — коэффициент мощности нагрузки.

В случае, если через провода или кабель питается только асинхронный двигатель, то можно расчетную максимальную нагрузку приравнять к мощности выбранного трехфазного двигателя, отнесенной к его КПД, кВт:

$$P_{max} = \frac{P_н}{\eta_н}.$$

Значения допустимой токовой нагрузки для различных проводов и кабелей и их марки приведены в табл. 4.1—4.2 [4], а также в разделах 3 и 7 [5], по которым выбираются стандартные сечения и марки проводов или кабелей.

Наиболее дешевыми и доступными являются провода или кабели с алюминиевыми жилами с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией.

Провода или кабели к стационарным установкам могут прокладываться открыто, в металлических рукавах или в трубах. Допустимые длительные токовые нагрузки на провода с алюминиевыми жилами приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДА С АЛЮМИНИЕВЫМИ ЖИЛАМИ С РЕЗИНОВОЙ ИЛИ ПОЛИХЛОРВИНИЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Сечение токопроводящей жилы, мм²	Допустимая токовая нагрузка, А			
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в трубе		
		два одножильных	три одножильных	четыре одножильных
2	21	19	18	15
2,5	24	20	19	19
3	27	24	22	21
4	32	28	28	23
4	36	32	30	27
6	39	36	32	30
8	46	43	40	37
10	60	50	47	39
16	75	60	60	55
25	105	85	80	70
35	130	100	95	85
50	165	140	130	120
70	210	175	165	140

К нестационарным электроприемникам электропитание подводится посредством кабелей с гибкими медными жилами.

В табл. 4.2 приведены допустимые токовые нагрузки на провода и кабели с медными жилами.

Расчет и выбор сечений с учетом *потери напряжения* для линий напряжением менее 1000 В можно выполнять по упрощенной формуле:

$$\Delta U\% = 10^5 \frac{\sum_{k=1}^{n} P_к l_к}{U_{нл}^2 \gamma S},$$

где $P_к$ — мощность приемника, присоединенного к сети длиной l на участке длиной $l_к$ ($l_к = l_1 + l_2 + ... + l_n$), кВт; l_n — длина участка сети между точками присоединения $(к-1)$ и $к$-го приемников, м; S — сечение фазных проводов, жил кабелей, мм^2; γ — удельная проводимость (Ом·м)$^{-1}$, $U_{нл}$ — линейное номинальное напряжение, В.

Если к сети подключается один двигатель мощностью $P_н$, то $к = 1$ и формула приобретает вид, В:

$$\Delta U\% = 10^5 \frac{P_н l}{\eta_н U_{нл}^2 \gamma S}.$$

Таблица 4.2

ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ШНУРЫ ПЕРЕНОСНЫЕ ШЛАНГОВЫЕ ЛЕГКИЕ И СРЕДНИЕ, КАБЕЛИ И ПРОВОДА ПЕРЕНОСНЫЕ С МЕДНЫМИ ЖИЛАМИ

Сечение жилы, мм^2	Токовые нагрузки, А		
	Одножильных	Двухжильных	Трехжильных
0,5	—	12	—
0,75	—	16	14
1,0	—	18	16
1,5	—	23	20
2,5	40	33	28
4	50	43	36
6	65	55	45
10	90	75	60
16	120	95	80
25	160	125	105
35	235	185	160
50	235	185	160
70	290	235	200

При заданной потере напряжения $\Delta U\%$ сечение проводов S можно определить по формуле, мм^2:

$$S = 10^5 \frac{\sum P_к l_к}{\Delta U\% U_{нл}^2 \gamma}.$$

Если к сети подключается только один двигатель мощностью $P_н$, то сечение проводов определяется соответственно, мм^2:

$$S = 10^5 \frac{P_н}{\eta_н \Delta U\% U_{нл}^2 \gamma}.$$

Выбранные провода, кабели и шины проверяют по термической устойчивости.

Задача.

Выбрать кабель для питания асинхронного трехфазного двигателя АИР100S мощностью $P_н = 3$ кВт, $n_н = 1410$ об/мин, $\cos\varphi_н = 0{,}83$, $\eta_н = 0{,}82$ для привода деревообрабатывающего станка. Линейное напряжение сети $U_{нл} = 380$ В, расстояние от станка до распределительного щита составляет 50 м.

Решение.

Поскольку станок установлен неподвижно, то для его электропитания выберем кабель с алюминиевыми жилами в резиновой или полихлорвиниловой оболочке.

Определим величину тока:

$$I_{max} = \frac{P_н \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{нл} \cos\varphi \eta_н} = \frac{3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}83 \cdot 0{,}82} = 6{,}69 \text{ А}.$$

Поскольку величина тока мала, то кабель выбираем, исходя из соображений механической прочности при прокладке. Сечение жил кабеля составит в таком случае 2,5 мм^2.

Рассчитаем потери напряжения:

$$\Delta U\% = 10^5 \frac{P_н l}{U_{нл}^2 \eta_н \gamma S} =$$

$$= \frac{10^5 \cdot 3 \cdot 50}{380^2 \cdot 0{,}82 \cdot 35 \cdot 10^6 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-6}} = 1{,}45\%.$$

Отклонение напряжения на зажимах электродвигателя составляет лишь 1,45% при допустимом значении 5%.

Выберем, например по [4] или [5], четырехжильный кабель марки АВВГ с изоляцией алюминиевых жил из поливинил-

хлоридного (ПВХ) пластиката в оболочке из ПВХ пластиката. Четвертая жила используется для присоединения корпуса двигателя к нулевому проводу сети.

Отметим, что можно при соответствующих условиях прокладки выбрать тот же кабель с жилами сечением 1,5 мм^2. При этом потери напряжения составят лишь 2,4%.

4.2. Расчет токов короткого замыкания и выбор автоматических выключателей и предохранителей

Расчет токов короткого замыкания необходим для правильного выбора и отстройки защитной аппаратуры. Ток короткого замыкания возникает при соединении токоведущих частей фаз между собой или с заземленным корпусом электроприемника в схемах с глухо-заземленной нейтралью и нулевым проводом. Его величина может быть определена по формуле, А:

$$I_{\text{окз}} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\text{п}} + Z_{\text{т}}},$$

где U_{Φ} — фазное напряжение сети, В; $Z_{\text{п}}$ — сопротивление петли фаза—нуль, Ом, $Z_{\text{п}} = \sqrt{R_{\text{п}}^2 + X_{\text{п}}^2}$; $R_{\text{п}}$ — активное сопротивление одного провода цепи короткого замыкания; $X_{\text{п}}$ — индуктивное сопротивление, рассчитываемое по удельному индуктивному сопротивлению, равному 0,6 Ом/км; $Z_{\text{т}}$ — полное сопротивление фазной обмотки трансформатора на стороне низшего напряжения, Ом:

$$Z_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}}\% U_{\text{н}}}{\sqrt{3} I_{\text{н}} \cdot 100},$$

где $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ — номинальные напряжение и ток трансформатора; $U_{\text{к}}\%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Величины $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ и $U_{\text{к}}\%$ для соответствующего трансформатора приводятся в паспортных данных на них, справочниках, например, в главе 5 [4].

Выбор электрического аппарата осуществляется по его функциональному назначению, по роду напряжения и тока, по величине мощности.

Следует иметь в виду современную тенденцию, заключающуюся в том, что при выборе между предохранителями и автоматическими выключателями предпочтение отдается последним в силу их большей надежности, лучшей защиты от неполнофазных режимов, универсальности и т. д.

Выбор аппаратов по напряжению заключается в соответствии номинального напряжения, указанного в паспорте аппарата, и его рода (переменное, постоянное) номинальному напряжению питающей сети. При выборе аппарата по току следует учесть, что его номинальный ток должен быть не меньше рабочего тока установки.

Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели выбираются прежде всего по номинальным значениям напряжения и тока. Затем определяются токи уставки теплового и электромагнитного расцепителей.

Тепловой расцепитель автомата защищает электроустановку от длительной перегрузки по току. Ток уставки теплового расцепителя принимается равным на 15...20% больше рабочего тока:

$$I_{\text{т.р}} = (1{,}15...1{,}2)I_{\text{р}},$$

где $I_{\text{р}}$ — рабочий ток электроустановки, А.

Электромагнитный расцепитель автомата защищает электроустановку от коротких замыканий. Ток уставки электромагнитного расцепителя определяется из следующих соображений: автомат не должен срабатывать от пусковых токов двигателя электроустановки $I_{\text{пуск.дв}}$, а ток срабатывания электромагнитного расцепителя $I_{\text{эмр}}$ выбирается кратным току срабатывания теплового расцепителя:

$$I_{\text{эмр}} \leqslant K I_{\text{т.р}},$$

где $K = 4{,}5...10$ — коэффициент кратности тока срабатывания электромагнитного расцепителя.

Выбранный автоматический выключатель проверяется по чувствительности и по отключающей способности. Автоматы с номинальным током до 100 А должны срабатывать при условии, что

$$I_{\text{эмр}} \leqslant 1{,}4\, I_{\text{окз}},$$

где $I_{\text{окз}}$ — ток однофазного короткого замыкания.

Автоматы с номинальным током более 100 А должны срабатывать при токе

$$I_{\text{эмр}} \leqslant 1{,}26\, I_{\text{окз}}.$$

Чувствительность автомата, имеющего только тепловой расцепитель, определяется соотношением:

$$I_{\text{ТР}} \leqslant 3 I_{\text{ОКЗ}},$$

Отключающая способность автомата с электромагнитным расцепителем определяется величиной тока трехфазного короткого замыкания $I_{\text{ТКЗ}}$:

$$I_{\text{ЭМР}} \leqslant I_{\text{ТКЗ}}.$$

Таблица 4.3

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТОВ СЕРИИ АЕ

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА		Габариты, мм
					=	~	
АЕ-1000	25	240	1	6 25	—	1,5	90×21×77
АЕ-2000	25, 63, 100	220 500	1, 2, 3		10	16	220×112×115
АЕ-2040	16, 20, 25, 31,5; 40, 50, 63, 80, 100	660	3	16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100	—	$12I_{\text{н}}$	207×75×120
АЕ-2443	16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63	380	3	—	—	—	—
АЕ-2050М	16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100	380	3	16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100	—	$12I_{\text{н}}$	207×75×120

Таблица 4.4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ АВТОМАТОВ СЕРИЙ АК, АС, АП, АСТ

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Габариты, мм
					=	~		
АК-63	63	200 440	2, 3	0,63 63	5	9	0,03	145×68×124
АК-50	50	320 400	2, 3	2 50	4 5	9	0,04	113×81×117
АП-50	50	220 500	2, 3	1 6 50	1,252	0 3 2	0,02	210×160×143
А-63	25	110 220	1	0,63 25	2	2,5	—	134×28×88
АС-25	25	220 380	2, 3	1 20	3,2	2	—	73×90×109

Наиболее широкое применение для коммутации трехфазных цепей с относительно небольшой нагрузкой находят автоматы серий АЕ, АП, АК. Технические данные некоторых автоматов приведены в табл. 4.3 и 4.4.

Выбор автоматических выключателей можно осуществить также по справочникам, например по [6].

Задача.

Выбрать автоматический выключатель для коммутации и защиты выбранного выше двигателя АИР100S мощностью $P_н = 3$ кВт, $I_н = 6{,}7$ А. Кратность пускового тока равна 7.

Решение.

Ток теплового расцепителя:

$$I_{т.р} = (1{,}15...1{,}2)I_р = 1{,}17 \cdot 6{,}7 = 7{,}84 \text{ А}.$$

Ток электромагнитного расцепителя (примем K больше кратности пускового тока двигателя $K = 8$):

$$I_{эмр} \leqslant KI_{т.р} = 7{,}84 \cdot 8 = 62{,}72 \text{ А}.$$

Выбираем по табл. 4.4 трехполюсный автоматический выключатель типа АК-63 с номинальным током до 50 А, ток уставки теплового расцепителя 7,8 А, электромагнитного — 63 А.

Выбор предохранителей

Предохранители используют для защиты цепей с асинхронным двигателем, который включается в работу посредством рубильника, пакетного выключателя либо магнитного пускателя, поскольку ни один из этих аппаратов не защищает сеть от коротких замыканий.

Ток плавкой вставки предохранителя выбирается в соответствии с выражением:

$$I_{пл} \leqslant 3I_{окз}.$$

Ток плавкой вставки предохранителей, используемых для защиты асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выбирается в соответствии с соотношением:

$$I_{пл} = I_{пуск}/\beta,$$

где $I_{пуск}$ — пусковой ток двигателя, А; β — коэффициент, зависящий от условий пуска (при средних условиях пуска $\beta = 2{,}5$).

5. Схемы управления асинхронными трехфазными двигателями

5.1. Управление посредством магнитных пускателей

Для дистанционного управления асинхронными трехфазными двигателями наиболее широко используются магнитные пускатели. Магнитные пускатели (МП) предназначены для пуска, остановки, реверсирования и тепловой защиты асинхронных двигателей. Наибольшее применение находят магнитные пускатели с контактными системами и электромагнитным приводом типов ПМЕ, ПМА, ПА, ПМЛ и др.

Пускатели выполняются открытого, защищенного, пылебрызгонепроницаемого исполнения, реверсивные и нереверсивные, с тепловой защитой и без нее. Нереверсивный МП обеспечивает пуск АД в одном направлении *(вперед)*, реверсивный — пуск в обоих направлениях *(вперед и назад)*. Магнитный пускатель заключается, как правило, в стальной или пластмассовый кожух. Управление им осуществляется посредством кнопок управления *Пуск, Стоп, (Вперед, Назад)*.

На рис. 5.1. представлены внешний вид и принципиальная схема современного нереверсивного пускателя типа ПМЛ с тепловым реле и со встроенными в оболочку кнопками управления.

На рис. 5.2 представлена схема управления асинхронным двигателем посредством нереверсивного МП. МП обеспечивает пуск и останов двигателя, защиту его от перегрузок (тепловую защиту), а также защиту от самозапуска. Устаревшие обозначения элементов на практике пока используются, по этой причине приведены на данной схеме.

Схема включает катушку МП, обозначенную на схеме буквой *Л*, линейные (главные контакты) *Л* в цепи статора двигателя *М*, блок-контакт *Л*, тепловые элементы и размыкающие контакты тепловых реле *Т1* и *Т2*, кнопки управления *Пуск* и *Стоп*.

Для пуска двигателя оператор нажимает на кнопку *Пуск*. Катушка *Л* получает питание, МП срабатывает, замыкаются главные контакты, на статор подается напряжение и двигатель разгоняется. Одновременно блокирующий контакт *Л* шунтирует пусковую кнопку, так что ее можно отпустить, а катушка МП получает питание через блок-контакт.

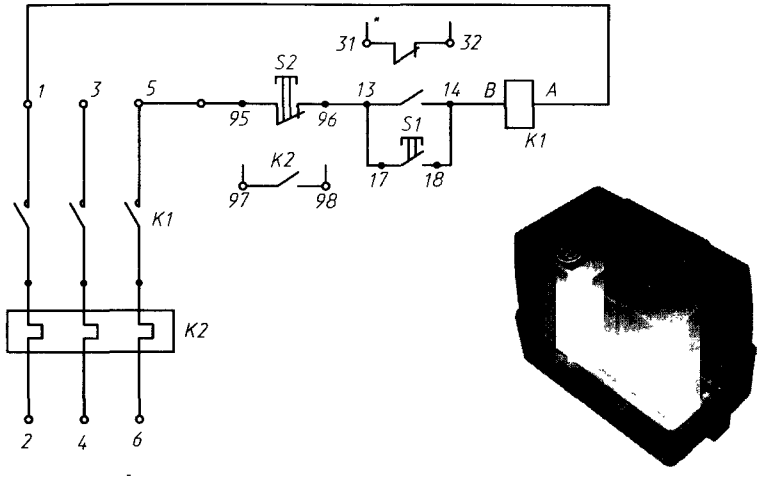


Рис. 5.1. Внешний вид и электрическая принципиальная схема нереверсивных пускателей с реле типа ПМЛ, со встроенными в оболочку кнопками управления:

K1 — катушка и контакты пускателя; *K2* — элементы и контакты теплового реле; *S1* — кнопка «Пуск»; *S2* — кнопка «Стоп»; * — для пускателей на 40 и 63 А

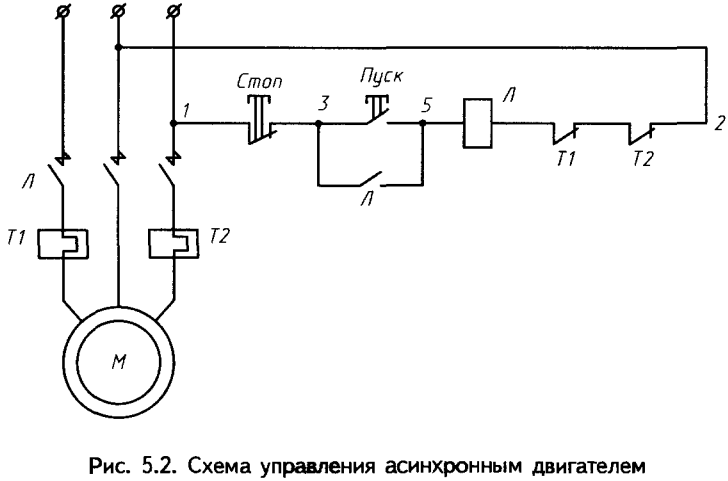


Рис. 5.2. Схема управления асинхронным двигателем посредством нереверсивного магнитного пускателя (приведены устаревшие обозначения элементов схемы)

Для остановки двигателя достаточно нажать кнопку *Стоп*. Катушка *Л* теряет питание, МП отключается и размыкает главные контакты в цепи статора.

При перегрузке двигателя ток статора в одной фазе или во всех фазах превышает ток отстройки тепловых реле *Т1* и *Т2*. Реле срабатывает, размыкает свои контакты в цепи катушки *Л*, отключая тем самым МП. Защита от самозапуска заключается в том, что двигатель в такой схеме не может самостоятельно запуститься после исчезновения и появления напряжения сети. Включить МП может лишь оператор, вновь нажав на кнопку *Пуск*.

Кнопки управления могут быть встроенными в корпус МП, как это видно на рис. 5.1, так и расположенными в удалении от МП. Схема управления с реверсивным МП представлена на рис. 5.3.

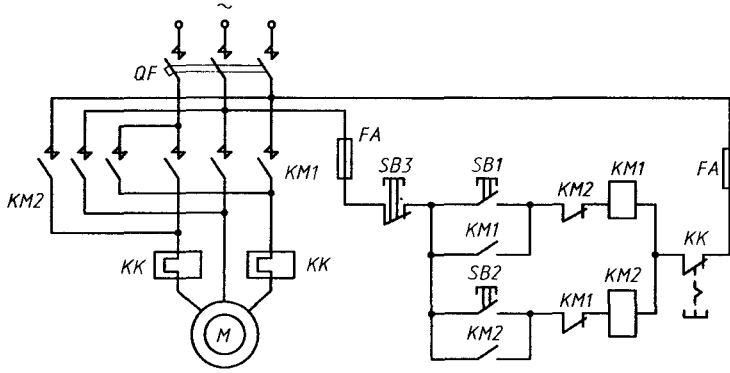


Рис. 5.3. Схема управления АД с реверсивным МП

Схема включает автоматический выключатель *QF*, реверсивный МП с тепловой защитой и кнопки управления *SB1 (Вперед), SB2 (Назад), SB3 (Стоп)*. Защита цепей управления осуществляется предохранителями *FA*.

Схема обеспечивает дистанционный пуск, реверсирование и останов, защиту двигателя от перегрузки, защиту от самозапуска.

МП состоит из двух контакторов переменного тока *КМ1* и *КМ2* с главными и вспомогательными контактами (блок-контактами) и тепловыми реле *КК* с размыкающим контактом.

Для пуска двигателя оператор нажимает на кнопку *SB1*, либо *SB2*. Катушка *КМ1* (либо *КМ2*) получает питание, контактор срабатывает, включая контакты в цепи статора, и блокирует

пусковую кнопку. Двигатель разгоняется. При перегрузке (если ток статора длительно превышает 1,1...1,2 номинального значения) срабатывают тепловые реле *КК*, отключая своим контактом цепь питания катушки. В МП предусмотрена электрическая блокировка от одновременного включения контакторов.

Для остановки оператор нажимает на кнопку *SB3 (Стоп)*.

Автоматический выключатель *QF* с электродинамическим расцепителем используется для защиты от коротких замыканий.

МП, как правило, трехполюсные, их выбирают по величине номинального тока главных контактов и номинального напряжения. Предельный ток отключения главных контактов МП превышает номинальный в 8...10 раз.

5.2. Технические параметры пускателей

Пускатели серии ПМЕ, ПАЕ обладают коммутационной способностью до $2 \cdot 10^6$ и частотой включений в час до 1200. Выбор контакторов и пускателей осуществляется по номинальному напряжению сети, номинальному напряжению питания катушек контакторов и пускателей, по номинальному коммутируемому току электроприемника. Технические параметры пускателей серии ПМЕ и ПАЕ приведены в табл. 5.1.

Наиболее распространенные серии пускателей с контактной системой и электромагнитным приводом: ПМЕ, ПМА, ПА, ПВН, ПМЛ, ПВ, ПАЕ.

Пускатели серии ПМА предназначены для управления асинхронными двигателями в диапазоне мощностей от 1,1 до 75 кВт на напряжение 380...660 В.

Пускатели серия ПМЕ выполняются с прямоходовой магнитной системой и управлением на переменном токе. Напряжение от 36 до 500 В. Используются для управления электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Выпускаются в открытом, защищенном и пылебрызгонепроницаемом исполнениях, с тепловыми реле и без них, бывают реверсивными и нереверсивными.

Защищенное исполнение имеют пускатели ПМЕ-031, -032, -051, -052, -081, -084, -121, -122. -123, -124, -221, -222, -223, -224; пылебрызгонепроницаемое исполнение ПМЕ-061, -062, -091, -092, -093, -094, -131, -132, -133, -134, -231, -232, -233, -234; нечетные — без теплового реле; четные — с тепловым реле.

Пускатели серии ПМЕ-200, а также ПМЕ-111Т, ПМЕ-113Т имеют тропическое исполнение. Частота включений при ПВ 70% составляет 600.

Таблица 5.1

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПУСКАТЕЛЕЙ СЕРИИ ПМЕ И ПАЕ

Параметр	ПМЕ-000	ПМЕ-10	ПМЕ-200	ПАЕ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	3/1,1	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток, А, при напряжении 380 В и $\cos\varphi = 0{,}4$	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	2,4±0,4	2,5±0,5	3±0,5	2,2±0,5	3,2±0,5	4±0,5	4±0,5
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
Материал контактной накладки	Серебро	КМК-А30	КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10
Пусковая мощность, потребляемая обмоткой, В·А	65	130	160	260	465	800	3400
Номинальная мощность обмотки, В·А	3,6	6	8	17	20	26	38
Масса, кг	0,33	0,64	0,65	2,66	43	7,6	103

Пускатели серии ПАЕ с управлением на переменном токе: отдельные исполнения ПАЕ-313, -314, -411, -412 применяются преимущественно в станкостроении. Характеристики пускателей серии ПМЕ и ПАЕ приведены в табл. 5.2

Таблица 5.2

МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ СЕРИЙ ПМЕ И ПАЕ

Тип	Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
ПМЕ-001	3/1,5	75×65×119	Нет
ПМЕ-002	3/1,5	121×83×101	Есть
ПМЕ-003	3/1,5	90×150×118	Нет
ПМЕ-004	3/1,5	135×150×118	Есть
ПМЕ-111	10/6	68×85×84	Нет
ПМЕ-112	10/6	154×102×91	Есть
ПМЕ-113	10/6	164×90×106	Нет
ПМЕ-114	10/6	232×90×107	Есть
ПМЕ-211	25/14	102×90×118	Нет
ПМЕ-212	25/14	195×98×126	Есть
ПМЕ-213	25/14	130×205×155	Нет
ПМЕ-214	25/14	180×205×155	Есть
ПАЕ-311	40/21	214×114×144	Нет
ПАЕ-312	40/21	275×114×121	Есть
ПАЕ-313	40/21	214×239×114	Нет
ПАЕ-314	40/21	264×239×121	Есть
ПАЕ-411	63/35	290×183×135	Нет
ПАЕ-412	63/35	290×183×135	Есть
ПАЕ-413	63/35	275×343×135	Нет
ПАЕ-414	63/35	275×343×135	Есть
ПАЕ-511	110/61	335×200×156	Нет
ПАЕ-512	110/61	335×200×156	Есть
ПАЕ-513	110/61	320×338×170	Нет
ПАЕ-514	110/61	320×338×170	Есть
ПАЕ-611	146/80	380×230×190	Нет
ПАЕ-612	146/80	380×230×190	Есть
ПАЕ-613	146/80	385×435×190	Нет
ПАЕ-614	146/80	385×435×190	Есть

Пускатели серии ПМА. Пускатели серии ПМА предназначаются для управления асинхронными двигателями мощностью 1,1...75 кВт; имеют реверсивные и нереверсивные исполнения, с тепловым и без теплового реле, открытое и защищенное исполнения; износостойкость механическая в аппаратах на ток до 63 А составляет $16 \cdot 10^6$, выше 63 А — 10^6 циклов; коммутационная — соответственно $3 \cdot 10^6$ и $2{,}5 \cdot 10^6$ циклов.

Номинальный ток контактов вспомогательной цепи лежит в пределах от 4 до 10 А. В табл. 5.3 приведены технические данные пускателей ПМА.

Таблица 5.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПУСКАТЕЛЕЙ СЕРИИ ПМА

Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Наибольшая мощность управляемого двигателя при 380 В, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса
4	500	1,1	65×60×100	0,6
10	500	4,0	74×90×109	0,8
25	500,660	10	90×98×115	1,1
40	500,660	17	108×110×135	1,8
63	500,660	30	120×120×158	2,6
100	500,660	55	135×150×170	3,3
160	500,660	75	160×170×200	5

Магнитные пускатели типа ПМЛ. Пускатели электромагнитные серии ПМЛ предназначены для дистанционного пуска непосредственным подключением к сети, остановки и реверсирования трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при напряжении до 660 В переменного тока частотой 50 Гц, а в исполнении с трехполюсными тепловыми реле серии РТЛ — для защиты управляемых электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

Пускатели могут комплектоваться ограничителями перенапряжений типа ОПН. Пускатели, комплектуемые ограничителями перенапряжения, пригодны для работы в системах управления с применением микропроцессорной техники. Пускатели пригодны для работы в системах управления с применением микропроцессорной техники при шунтировании включающей катушки помехоподавляющим устройством или при тиристорном управлении.

Номинальное переменное напряжение включающих катушек: 24, 36, 40, 48, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500, 660 В частоты 50 Гц и 110, 220, 380, 400, 415, 440 В частоты 60 Гц.

Пускатели ПМЛ на токи 10...63 А имеют прямоходовую магнитную систему Ш-образного типа. Контактная система расположена перед магнитной.

Подвижная часть электромагнита составляет одно целое с траверсой, в которой предусмотрены подвижные контакты и их пружины.

Возвратная пружина расположена на среднем керне подвижной части электромагнита.

На дугогасительной камере имеются направляющие для присоединения дополнительных приставок: контактной приставки типа ПКЛ или пневмоприставки ПВЛ, кнопки «Пуск» или «Стоп» и сигнальной лампы. Тепловые реле серии РТЛ подсоединяются непосредственно к корпусам пускателей.

Обозначение магнитных пускателей ПМЛ-XXXXXXXXX:

ПМЛ — серия;

X — величина пускателя по номинальному току (1 — 10 А, 2 — 25 А, 3 — 40 А, 4 — 63 А);

X — исполнение пускателей по назначению и наличию теплового реле (1 — нереверсивный, без теплового реле; 2 — нереверсивный, с тепловым реле; 5 — реверсивный пускатель без теплового реле с механической блокировкой для степени защиты IP00 и IP20 и с электрической и механической блокировками для степени защиты IP40 и IP54; 6 — реверсивный пускатель с тепловым реле с электрической и механической блокировками; 7 — пускатель звезда—треугольник степени защиты 54);

X — исполнение пускателей по степени защиты и наличию кнопок управления и сигнальной лампы (0 — IP00; 1 — IP54 без кнопок; 2 — IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; 3 — IP54 с кнопками «Пуск», «Стоп» и сигнальной лампой (изготавливается только на напряжения 127, 220 и 380 В, 50 Гц); 4 — IP40 без кнопок; 5 — IP40 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; 6 — IP20;

X — число и вид контактов вспомогательной цепи: 0 — 1з (на ток 10 и 25 А), 1з + 1р (на ток 40 и 63 А), переменный ток; 1 — 1р (на ток 10 и 25 А), переменный ток; 2 — 1з (на ток 10, 25, 40 и 63 А), переменный ток; 5 — 1з (на ток 10 и 25 А), постоянный ток; 6 — 1р (на ток 10 и 25 А), постоянный ток;

X — сейсмостойкое исполнение пускателей (С);
X — исполнение пускателей с креплением на стандартные рейки Р2-1 и Р2-3;
XX — климатическое исполнение (О) и категория размещения (2, 4);
X — исполнение по коммутационной износостойкости (А, Б, В).

Пускатели на токи 10, 25, 40 и 63 А допускают установку одной дополнительной контактной приставки ПКЛ или пневмоприставки ПВЛ.

Номинальный ток контактов приставок ПВЛ и сигнальных контактов пускателей — 10 А.

Номинальный ток контактов приставок ПКЛ — 16 А.

Приставки ПВЛ имеют 1 замыкающий и 1 размыкающий контакты.

Таблица 5.4

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ ПМЛ НА 10 А

Параметр	1100	1110	1210	1220	1230
Величина номинального тока, А	10				
Исполнение и наличие термореле	нереверсивный без термореле		нереверсивный с термореле		
Степень защиты и наличие кнопок	IP00	IP54 без кнопок	IP54 без кнопок	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; с сигнальной лампой
Число и исполнение контактов вспомогательной цепи	Переменный ток в цепи управления, 1 замыкающий				

Таблица 5.5

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ НА 25 А

Параметр	2100	2110	2210	2220	2230
Величина номинального тока, А	25				
Исполнение и наличие термореле	нереверсивный без термореле		нереверсивный с термореле		
Степень защиты и наличие кнопок	IP00	IP54 без кнопок	IP54 без кнопок	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; с сигнальной лампой
Число и исполнение контактов вспомогательной цепи	Переменный ток в цепи управления, 1 замыкающий				

Основные характеристики магнитных пускателей ПМЛ на 10...63 А приведены в табл. 5.4—5.7. Основные характеристики контактных приставок, основные характеристики пневмоприставок — в табл. 5.8—5.9.

Таблица 5.6

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ НА 40 А

Параметр	3100	3210	3220	3230
Величина номинального тока, А	40			
Исполнение и наличие термореле	нереверсивный без термореле	нереверсивный с термореле		
Степень защиты и наличие кнопок	IP00	IP54 без кнопок	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; с сигнальной лампой
Число и исполнение контактов вспомогательной цепи	Переменный ток в цепи управления, 1 замыкающий и 1 размыкающий			

Таблица 5.7

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ НА 63 А

Параметр	4100	4210	4220	4230
Величина номинального тока, А	63			
Исполнение и наличие термореле	нереверсивный без термореле	нереверсивный с термореле		
Степень защиты и наличие кнопок	IP00	IP54 без кнопок	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»	IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; с сигнальной лампой
Число и исполнение контактов вспомогательной цепи	Переменный ток в цепи управления, 1 замыкающий и 1 размыкающий			

Таблица 5.8

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ ПРИСТАВОК

Тип приставки	ПКЛ-1104	ПКЛ-2004	ПКЛ-0404	ПКЛ-2204	ПКЛ-4004
Количество замыкающих контактов	1	2	0	2	4
Количество размыкающих контактов	1	0	4	2	0

Таблица 5.9

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМОПРИСТАВОК

Тип приставки	Диапазон выдержки времени, с	Род выдержки времени
ПВЛ-1104	0,1 30	При включении
ПВЛ-1204	10 180	
ПВЛ-1304	0,1 15	
ПВЛ-1404	10 100	
ПВЛ-2104	0,1 30	При отключении
ПВЛ-2204	10 180	
ПВЛ-2304	0,1 15	
ПВЛ-2404	10 100	

5.3. Включение двигателя автоматическим и пакетным выключателями

Схема управления двигателем посредством *автоматического выключателя* предельно проста: ко входным зажимам автомата присоединяются провода питающей сети, к выходным присоединяют три провода или кабель, подключенный к статору двигателя. Такая схема обеспечивает защиту от перегрузок и коротких замыканий, однако она не может обеспечить дистанционного управления (если не используются автоматы соответствующего исполнения) и защиту от самозапуска при исчезновении и появлении напряжения. Последнее обстоятельство требует к такой схеме особое внимание, так как внезапное появление напряжения и самопроизвольный запуск механизма могут привести к несчастному случаю.

Порядок расчета и выбора автоматических выключателей для управления двигателем, а также технические данные некоторых автоматических выключателей приведены выше.

Схема управления асинхронным двигателем посредством *трехполюсных пакетных выключателей* столь же проста. Пакетный выключатель (ПВ) представляет собой, в сущности, модификацию обычного рубильника с подвижными и неподвижными контактами, в котором коммутация цепи осуществляется путем поворота системы подвижных контактов вокруг оси выключателя до фиксированного положения посредством рукоятки. Поэтому ПВ не обеспечивает никаких защит двигателя, а только его включение либо отключение.

ПВ предназначены для работы в электрических цепях напряжением до 380 В переменного тока частотой 50 Гц и до 220 В постоянного тока в качестве вводных выключателей, выключателей цепей управления и распределения электрической энергии, а также для ручного управления асинхронными двигателями. Наиболее широко используются аппараты типа ВП и ПВМ (рис. 5.4).

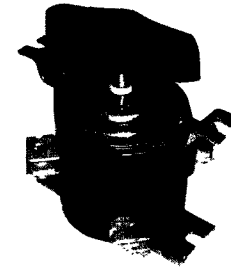


Рис. 5.4. Пакетные выключатели типа ВП

Масса пакетных выключателей в зависимости от исполнения изменяется в пределах 0,15...0,75 кг.

Основные технические характеристики выключателей серии ВП приведены в табл. 5.10, а выключателей ПВМ — в табл. 5.1 .

Таблица 5.1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ ВП

Род тока	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А			
		ВП1-16	ВП2-16, ВП3-16	ВП2-40, ВП3-40	ВП2-63, ВП3-63
Переменный частотой 50 Гц	220	8	16	40	63
	380	—	10	25	40
Постоянный	220	8	16	—	—

Таблица 5.1

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАКЕТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПВМ

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	
		постоянный	переменный
ПВМ1-10	220= 380~	6,3	4
ПВМ2-10		10	6,3
ПВМ2-25		25	16
ПВМ2-60		60	
ПВМ2-100		100	63
ПВМ2-150		250	160
ПВМ2-400		400	250
ПВМ3-10		10	6,3

Окончание табл. 5.11

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Число полюсов
		постоянный	переменный	
ПВМЗ-25	220= 380~	25	16	3
ПВМЗ-100		100	63	3
ПВМЗ-60		63	40	3
ПВМЗ-250		250	160	3
ПВМЗ-400		400	250	3

Выбор пакетных выключателей осуществляется по номинальному напряжению и номинальному току. Номинальный ток пакетного выключателя должен быть не меньше номинального тока асинхронного двигателя.

5.4. Кнопочные выключатели

Для включения и отключения магнитных пускателей могут быть использованы выключатели кнопочные серий ВК14-21 или КЕ011, КЕ012, КЕ031 и др. Эти же кнопочные выключатели могут быть использованы и для коммутации пусковых конденсаторов в цепях однофазного конденсаторного двигателя, как это будет показано в разделе 7. По этой причине приведем техническое описание некоторых типов кнопочных выключателей.

Выключатели кнопочные типа ВК14-21 предназначены для коммутации электрических цепей управления переменного тока частотой 50 и 60 Гц напряжением до 660 В и постоянного тока напряжением до 440 В.

Выключатели применяются для комплектации панелей, пультов, постов и шкафов управления в стационарных установках.

Кнопочные выключатели серии ВК14-21 изображены на рис. 5.5. Кнопочные выключатели, как правило, устанавливаются на металлической панели. Диаметр установочного отверстия составляет 30 мм.

Выключатели кнопочные серии КЕ предназначены для коммутации электрических цепей управления переменного тока частотой 50 и 60 Гц напряжением до 660 В и постоянного тока напряжением до 440 В.

Выключатели применяются в подвижных и неподвижных стационарных установках.

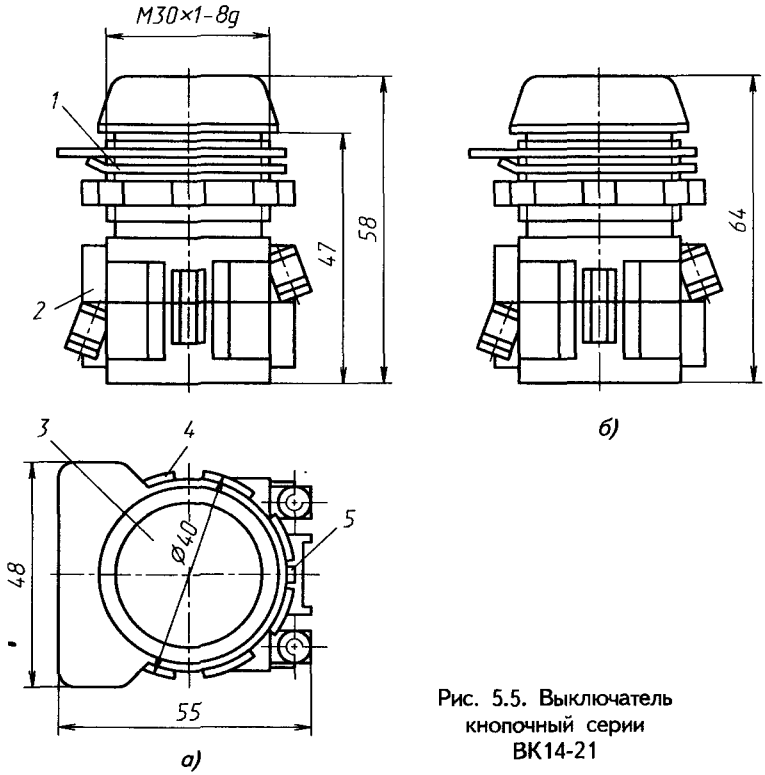


Рис. 5.5. Выключатель кнопочный серии ВК14-21

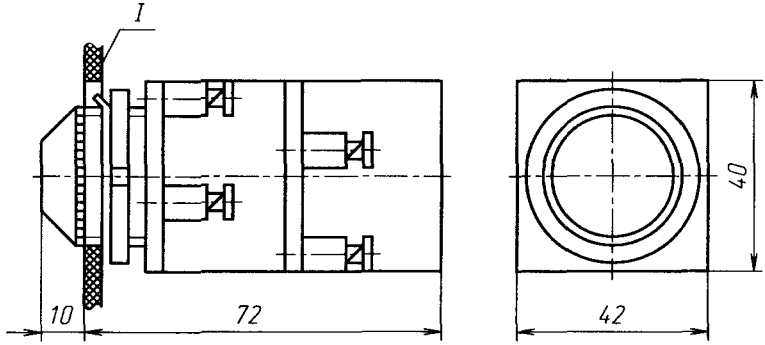


Рис. 5.6. Выключатель кнопочный серии КЕ-012

На рис. 5.6. представлено изображение кнопочного выключателя КЕ-012, технические данные выключателей серии КЕ приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ
КНОПОЧНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ КЕ

Номинальное напряжение, В переменное, частоты 50 и 60 Гц постоянное	 660 440
Номинальное напряжение изоляции, В	660
Номинальный ток, А	10
Минимальный рабочий ток, А	0,05
Сквозной ток в течение 1 с, А	200
Продолжительность включения, ПВ, %	40 60
Частота включений в час	1200

6. Питание трехфазного двигателя от однофазной сети переменного тока

6.1. Особенности однофазного режима трехфазного двигателя

Этот режим изучался многими авторами, достаточно подробно он рассмотрен, например, в [4]. Трехфазный АД в принципе может работать в однофазном режиме в двух случаях:

1) АД был включен в трехфазную сеть, работал в установившемся режиме, и в этом режиме произошел обрыв одной из фаз, например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя;

2) АД, обмотки статора которого соединены в звезду или треугольник, преднамеренно включается в однофазную сеть и разгоняется посредством какого-либо пускового устройства, создавая вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Рассмотрим первый случай более подробно. Работающий АД, оказавшийся в однофазном режиме, будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. Если обмотка статора соединена в звезду, то одна из фаз полностью теряет питание, если в треугольник, то происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Скольжение двигателя увеличивается, а его скорость вращения в том и другом случаях снижается.

При неизменной нагрузке на валу АД увеличение его скольжения приводит к значительному возрастанию тока, что в свою очередь приводит к чрезмерному перегреву обмоток статора. Такой режим, называемый неполнофазным, является для АД весьма нежелательным. Обычно двигатель, оказавшийся в неполнофазном режиме, отключается от сети защитной аппаратурой. Для уменьшения перегрева необходимо в длительном режиме снизить нагрузку двигателя до 50...60% от номинальной. Это первое следствие обрыва фазы трехфазного АД.

Второе следствие заключается в том, что, остановив двигатель, в режиме с отключенной фазой снова запустить его в ход включением в сеть невозможно. Можно убедиться, что двигатель запустится, если при его включении одновременно ротор раскрутить до какой-то хотя бы небольшой скорости. Тогда двигатель как бы подхватывает движение и разгоняется далее

самостоятельно до скорости, соответствующей нагрузке на его валу. Другими словами, пусковой момент АД в таком режиме равен нулю. Это обстоятельство обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном двигателе перестает быть вращающимся, а носит характер *пульсирующего*. Объясним это явление.

Пульсирующее магнитное поле представляют в виде двух составляющих полей, вращающихся с одной и той же синхронной частотой в противоположные стороны. Изменение вектора пульсирующего поля и его разложение на потоки прямой $\Phi_{ПР}$ и обратной $\Phi_{ОБР}$ последовательностей представлено на рис. 6.1. Значение каждого из магнитных потоков равно половине амплитуды пульсирующего поля.

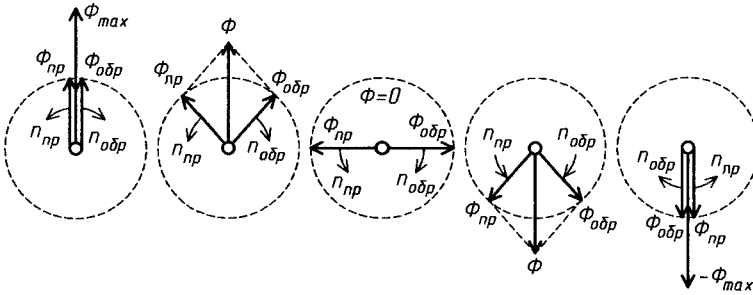


Рис. 6.1. Изменение вектора пульсирующего поля и его разложение на потоки прямой $\Phi_{ПР}$ и обратной $\Phi_{ОБР}$ последовательностей

Окружность, изображенная на диаграммах пунктиром, обозначает траекторию движения в противоположных направлениях концов векторов магнитных потоков прямой $\Phi_{ПР}$ и обратной $\Phi_{ОБР}$ последовательностей. Из этих диаграмм нетрудно усмотреть, что в каждый момент времени изменяющийся по величине вектор результирующего потока Φ неизменно направлен *вдоль вертикальной оси*. Он максимален, когда угол поворота $\Phi_{ПР}$ и $\Phi_{ОБР}$ равен 0 или 180 электрическим градусам. При повороте потоков $\Phi_{ПР}$ и $\Phi_{ОБР}$ на 90° вектор результирующего потока Φ равен нулю. Заметим, что при построении диаграмм на рис. 6.1 принято допущение, что катушка, по которой проходит ток, создает в воздушном зазоре машины синусоидально распределенное магнитное поле.

Вращающиеся поля $\Phi_{ПР}$ и $\Phi_{ОБР}$ наводят в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи ротора. Взаимо-

действие вращающихся полей статора с токами ротора приводит к образованию прямого $M_{ПР}$ и обратного $M_{ОБР}$ вращающих моментов, так же, как в обычном трехфазном АД, однако в данном случае эти моменты направлены в противоположные стороны.

Механические характеристики АД представлены на рис. 6.2.

В неподвижном состоянии ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, отчего вращающие моменты полностью уравновешивают друг друга, следовательно, результирующий пусковой момент АД при скольжении, равном единице, равен нулю.

Как видно на рис. 6.2, при $s = 1$ механическая характеристика АД пересекает ось скольжений и пусковой момент равен нулю. По этой причине трехфазный двигатель в однофазном режиме не может самостоятельно начать разгон.

Дело существенно меняется, когда АД в однофазном режиме посредством внешнего воздействия разогнался до произвольной скорости. Тогда прямое поле, т. е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, при *малых значениях скольжения* наводит в обмотке ротора токи небольшой частоты (2...5 Гц).

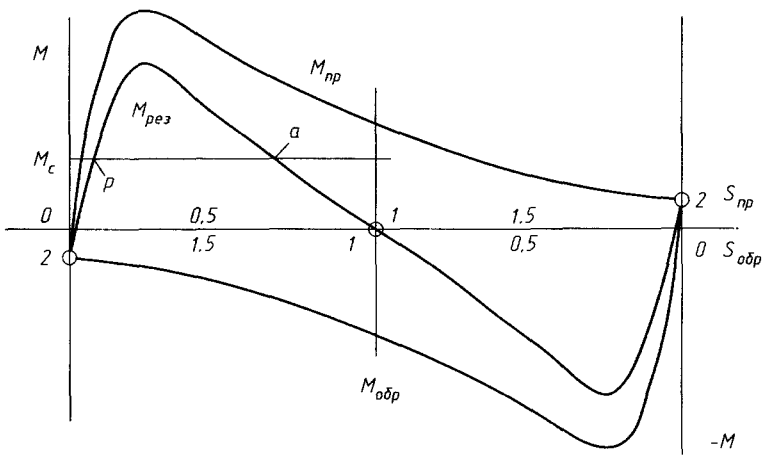


Рис. 6.2. Механические характеристики АД в однофазном режиме: $M_{ПР}(s)$ — от поля прямой последовательности; $M_{ОБР}(s)$ — от поля обратной последовательности; $M_{РЕЗ}(s)$ — результирующая

При стандартной частоте сети 50 Гц токи, индуктированные в обмотке ротора обратным полем, имеют при том же скольжении повышенную частоту, близкую к 100 Гц. Поэтому они становятся почти чисто реактивными и оказывают размагничивающее действие. Это ослабляет обратное поле и уменьшает обратный момент $M_{ОБР}$.

Иначе говоря, индуктивное сопротивление ротора для токов обратной последовательности многократно превышает то же сопротивление для токов прямой последовательности. Сложение двух этих моментов дает результирующую механическую характеристику $M_{РЕЗ}(s)$ трехфазного АД в однофазном режиме, которая также представлена на рис. 6.2.

Легко видеть, что при скольжении s, равном 1 (т. е. при пуске), $M_{ПР} = M_{ОБР}$, а $M_{РЕЗ} = 0$. Если ротор двигателя развернуть в сторону вращения прямого поля, то это равенство нарушается и $M_{ПР} \neq M_{ОБР}$:

$$M_{ПР} - M_{ОБР} = M_{РЕЗ},$$

т. е. двигатель развивает вращающий момент и дальше разгоняется самостоятельно.

Однако, если на валу имеется нагрузка (момент сопротивления M_C), то двигатель «застрянет» на восходящем участке механической характеристики в точке пересечения линии M_C с характеристикой $M_{РЕЗ}(s)$ — в точке a.

Другими словами трехфазный АД в однофазном режиме не только не развивает пусковой момент, но и не способен разгоняться под нагрузкой, хотя, разогнавшись до скорости, близкой к номинальной, он успешно обеспечивает на валу момент, равный моменту сопротивления, как это видно на рис. 6.2 (точка p). Отметим, что трехфазный АД в однофазном режиме при включении можно запустить в любую сторону — вперед или назад, что также видно на рис. 6.2.

Отсутствие пускового момента является существенным недостатком АД в однофазном режиме, из нее вытекает проблема непосредственного пуска АД в однофазном режиме, решение которой и рассматривается ниже.

Заметим также, что в силу пульсирующего характера поля, образующегося в зазоре машины, мгновенные значения частоты вращения в пределах одного периода не остаются постоянными.

Поскольку обратный момент носит тормозной характер по отношению к прямому, то это приводит к ухудшению характеристик двигателя: его скольжение возрастает, т. е. скорость

вращения АД в этом режиме при одинаковой нагрузке на валу меньше, чем скорость такого же АД в трехфазном режиме. АД в однофазном режиме имеет меньшие КПД и коэффициент мощности по сравнению с таким же АД в трехфазном режиме. Уменьшение КПД связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля.

Снижение коэффициента мощности объясняется увеличением намагничивающего тока [4].

Отмеченные выше недостатки трехфазного АД в однофазном режиме в известной мере преодолеваются путем создания в его воздушном зазоре эллиптического или кругового вращающегося магнитного поля при помощи пассивных элементов: резистора, катушки индуктивности, либо конденсатора. В этом заключается суть второго случая, о котором упоминалось выше.

АД с эллиптическим полем имеют некоторый начальный пусковой момент, а также прямой и обратный моменты, однако величина тормозящего обратного момента значительно меньше прямого момента. При наличии кругового поля АД (в идеале) обратный (тормозящий) момент отсутствует вообще.

Условием получения кругового вращающегося поля при двух статорных обмотках должно быть равенство по величине их магнитодвижущих сил (МДС), сдвинутых в пространстве и во времени на 90 электрических градусов. Напомним, что МДС — это произведение тока обмотки на число ее эффективных витков. Вектор МДС совпадает с осью обмотки.

Как уже отмечалось, для получения кругового или близкого к круговому эллиптического поля двигателя применяют фазосдвигающие устройства: резисторы, катушки индуктивности или конденсаторы. Наибольшее применение в силу ряда достоинств находят схемы включения АД с конденсатором в качестве пусковой и рабочей емкостей.

6.2. Схемы пуска АД в однофазном режиме с пульсирующим полем

Рассмотрим схемы пуска трехфазных АД в однофазном режиме с рабочим пульсирующим полем.

Наиболее простыми являются схемы включения в однофазную сеть с напряжением U_C, в которых в качестве пусковых элементов используются пусковой резистор $R_П$ либо пусковой конденсатор $C_П$ (рис. 6.3).

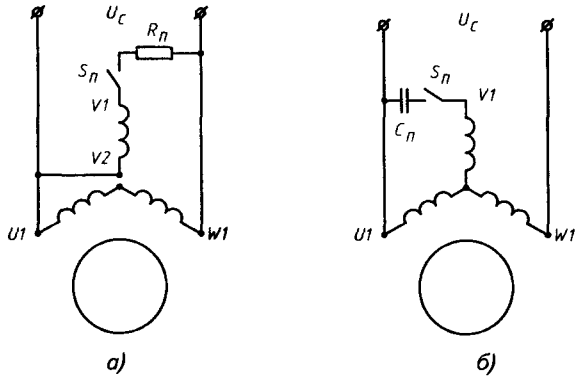


Рис. 6.3. Схемы включения АД с пусковыми элементами:
а — с резистором $R_П$; *б* — с конденсатором $C_П$

Такие элементы позволяют изменить угол сдвига тока пусковой обмотки в сравнении с током рабочей обмотки.

Отметим, что обмотки *U* (*U1*—*U2*) и *W* (*W1*—*W2*) являются рабочими, а обмотка *V* (*V1*—*V2*) — пусковой.

Пуск двигателя осуществляется путем подачи напряжения сети U_C на рабочие обмотки и одновременным нажатием на пусковую кнопку $S_П$, которую отпускают по завершении пуска. Это обеспечивает на период пуска создание эллиптического поля двигателя, при котором его пусковой момент больше нуля. Разогнавшись до установившейся скорости, двигатель в таких схемах работает в дальнейшем с пульсирующим полем. Для него остаются обязательными ограничения по нагрузке, о которых упоминалось выше.

Резистор или конденсатор обеспечивают в пусковой обмотке *V* (*V1*—*V2*) сдвиг ее тока по отношению к току в рабочей обмотке на угол до 90°. Величина этого угла зависит от соотношения параметров пусковой обмотки (ее активного и индуктивного сопротивлений) и резистора или конденсатора.

Величину пускового резистора можно выбрать, исходя из условия равенства токов пусковой и рабочей обмоток:

$$I_П = I_Р.$$

Пусковой ток двигателя равен номинальному, умноженному на кратность пускового тока (обычно в пределах от 5 до 7 для двигателей единых серий). Номинальный ток приводится в паспорте АД, а кратность тока — в каталоге. Эти величины можно также рассчитать по формулам, приведенным в первом разделе.

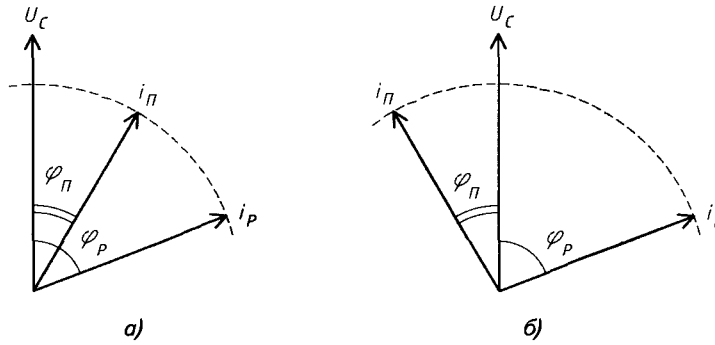


Рис. 6.4. Векторные диаграммы напряжения сети и токов пусковой и рабочей обмоток

На рис. 6.4. представлены векторные диаграммы напряжения сети, токов рабочей и пусковой обмоток. При $R_П = 0$ угол между токами пусковой и рабочей обмоток равен 0.

Включение резистора приводит к сдвигу вектора тока пусковой обмотки по отношению к вектору тока рабочей обмотки на угол ψ_R:

$$\psi_R = \varphi_P - \varphi_П.$$

При включении конденсатора последний может в зависимости от величины его емкости компенсировать:

1) часть реактивной мощности пусковой обмотки;

2) полностью компенсировать требующуюся для создания поля реактивную мощность;

3) перекомпенсировать реактивную мощность, т. е. двигатель с таким конденсатором не только покрывает свои потребности в реактивной мощности, но отдает ее избыток в сеть и является источником реактивной мощности; на практике третий случай не используется, поскольку связан с большими токами.

При определенном соотношении параметров конденсатора и обмотки угол между векторами токов может быть равен 90°, как это показано на рис. 6.4,*б*. Последнему случаю при пуске будет соответствовать круговое поле, при котором тормозной момент отсутствует. Этот случай благоприятен с точки зрения успешного пуска двигателя, однако ток пусковой обмотки и в рабочем режиме достигает значительных величин, а при размыкании цепи конденсатора после завершения пуска поле двигателя вновь становится пульсирующим, а двигатель по мощности используется лишь наполовину.

На практике указанные схемы в силу их малой эффективности применяются редко. Наиболее широко используют схемы с постоянным включением последовательно с пусковой обмоткой рабочего конденсатора, к которому в период пуска параллельно подключают так называемый пусковой конденсатор, емкость которого превышает емкость рабочего в два-три раза. Такие схемы обеспечивают необходимый пусковой момент, эллиптическое поле двигателя и лучшее его использование по мощности.

6.3. Схемы соединения обмоток конденсаторного АД в однофазном режиме

Конденсаторным называют однофазный асинхронный двигатель, в цепь одной из обмоток которого постоянно включен конденсатор. Этот конденсатор называют рабочим $C_Р$. Он служит для создания совместно с рабочей обмоткой эллиптического поля двигателя и, таким образом, несколько повышает КПД и коэффициент мощности АД. Кроме того, пусковой момент такого двигателя не равен нулю.

С целью повышения пускового момента АД используют дополнительный пусковой конденсатор $C_П$. Величину емкости того и другого определяют расчетным путем.

Выше указывалось, что можно выбрать такое значение емкости конденсатора, которое в течение всего времени работы обеспечит создание кругового поля машины, приемлемые пусковой момент и прочие показатели АД. Однако при такой величине емкости ток фазы будет существенно превышать номинальный. По этой причине по достижении двигателем скорости, составляющей 0,7...0,8 от номинального значения, пусковой конденсатор отключают.

Напомним, что если исходный трехфазный АД рассчитан на напряжение 380/220 В, то для подключения к линейному напряжению 380 В используется схема соединения обмоток статора в звезду, а для подключения к линейному напряжению 220 В — соединение в треугольник. В дальнейшем при расчетах будем иметь дело с фазным напряжением и фазным током двигателя.

Рассмотрим наиболее значимые на практике схемы включения трехфазного АД в режиме однофазного конденсаторного двигателя и приведем формулы для расчета емкостей рабочих и пусковых конденсаторов.

Соединение обмотки статора АД в звезду

Схема соединения обмотки АД, приведенная на рис. 6.5,*а*, используется в тех случаях, когда соединение концов обмоток статора (нейтраль) выполнено внутри машины, т. е. нейтраль недоступна, а напряжение сети равно линейному напряжению.

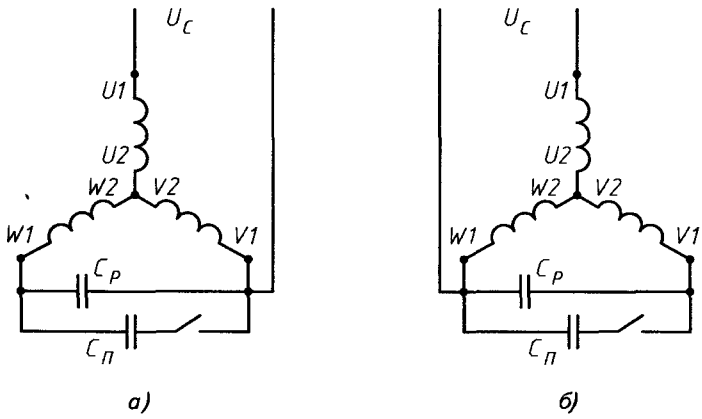


Рис. 6.5. Схема соединения конденсаторного АД в звезду *(а)* и схема реверсирования АД *(б)*

Обмотку статора *U1—U2*, через которую проходит весь ток двигателя $I = I_А$, называют главной фазой. Обмотку *W1—W2*, соединенную последовательно с конденсатором, — конденсаторной фазой. Ее ток $I_С = I_К$. Третью обмотку *V1—V2* назовем вспомогательной фазой, ее ток обозначим $I_В$. При порядке следования токов фаз $I_А—I_В—I_С$ двигатель будет вращаться в направлении «*Вперед*» (рис. 6.5,*а*), если конденсаторной фазой будет *V1—V2* ($I_А—I_С—I_В$), то двигатель будет вращаться «*Назад*» (рис. 6.5,*б*).

С изменением нагрузки на валу двигателя (с изменением скольжения) изменение токов этих фаз оказывается различным (рис. 6.6) [4].

Ток главной фазы с уменьшением нагрузки (скольжения) уменьшается, а ток конденсаторной фазы, наоборот, возрастает, достигая наибольшего значения при холостом ходе.

Вспомогательная фаза при холостом ходе и незначительной нагрузке находится в генераторном режиме, ее активная мощность отрицательна.

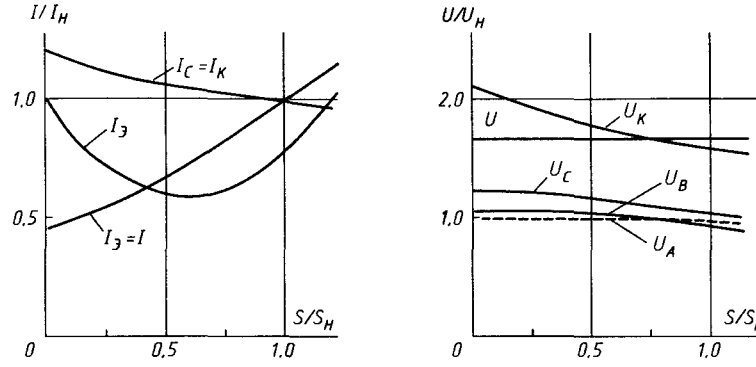


Рис. 6.6. Изменение токов и напряжений конденсаторного АД при изменении скольжения (нагрузки на валу) при соединении в звезду

С возрастанием нагрузки в области относительного значения скольжения больше 0,5 вспомогательная фаза переходит в двигательный режим. Ее ток, уменьшаясь, достигает некоторого минимального значения и затем начинает увеличиваться.

Из-за различия токов активная мощность по фазам также распределяется неравномерно. При номинальной нагрузке главная фаза развивает примерно такую же мощность, как конденсаторная и вспомогательная, вместе взятые. Равенства токов всех фаз номинальному не достигается. Поэтому под номинальной здесь имеется в виду такая нагрузка, при которой токи двух фаз равны номинальному, а ток третьей фазы составляет 70—85% от номинального. Это определение относится и к случаю соединения обмоток статора треугольником.

Характерными особенностями схемы являются относительно небольшие значения пускового момента, не превышающего номинальный, и небольшие напряжения.

Отметим, что *напряжение на конденсаторе в номинальном режиме можно принять равным напряжению сети.* В режиме холостого хода принимают:

$$U_К \approx 1{,}15 U_н.$$

В случае возникновения резонанса напряжений, когда напряжение на конденсаторе равно напряжению на конденсаторной обмотке, величины их могут достигать недопустимо больших значений, что может привести к пробою изоляции

обмотки, либо пробою диэлектрика между обкладками конденсатора. Резонанс напряжений в конденсаторной ветви может возникнуть при равенстве реактивных сопротивлений обмотки фазы и конденсатора:

$$2\pi f L_{\text{ОБМ}} = \frac{1}{2\pi f C_{\text{РУ}}},$$

где $L_{\text{ОБМ}}$ — индуктивность обмотки фазы.

Величина емкости рабочего конденсатора для схемы (рис. 6.5) определяется по выражению, Ф:

$$C_{\text{РУ}} = \frac{\sqrt{3}}{2\dfrac{I_{\text{Н}}}{\omega U_{\text{Н}}}} = \frac{\sqrt{3}}{2\dfrac{I_{\text{Н}}}{2\pi f U_{\text{Н}}}}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц получим приближенное расчетное выражение, где емкость измеряется в мкФ:

$$C_{\text{РУ}} = 2780\frac{I_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}}.$$

Что касается пусковой емкости, то ее выбирают по соотношению, мкФ:

$$C_{\text{П}} = (2{,}5...3)\,C_{\text{РУ}}.$$

Пример.

Пусть необходимо выбрать рабочий конденсатор для асинхронного двигателя типа 5А80МВ4, с номинальными данными: мощность 1,5 кВт, скорость вращения 1405 об/мин, напряжение 380/220 В, ток 3,7 А при 380 В, который включается по схеме (рис. 6.5).

Решение.

Очевидно, фазный ток двигателя равен 3,7 А, номинальное фазное напряжение — 220 В. Следовательно, величина рабочей емкости:

$$C_{\text{РУ}} = 2780\frac{3{,}7}{220} = 46{,}75 \text{ мкФ}.$$

Выбираем ближайший не меньший по емкости подходящий конденсатор, например, типа ДПС(А)-0,45 емкостью 50 мкФ.

Соответственно пусковой конденсатор должен иметь емкость 125 мкФ.

На порядке выбора конденсаторов и типах отечественных конденсаторов остановимся подробнее в разделе 7.

Соединение обмотки статора АД в треугольник

Схема соединения обмотки статора конденсаторного АД в треугольник и подключения рабочей и пусковой емкости представлена на рис. 6.7.

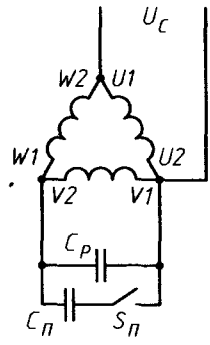


Рис. 6.7. Схема соединения конденсаторного АД в треугольник и подключения рабочего и пускового конденсаторов

По аналогии с предыдущей схемой здесь вспомогательной назовем фазу *U1—U2*, к которой подведено напряжение сети и ток которой обозначим I_A.

Обмотка *V1—V2* с параллельно присоединенным конденсатором является конденсаторной фазой, ток ее обозначим I_B, а третья обмотка *W1—W2*, по которой протекают токи конденсатора и конденсаторной фазы, назовем главной фазой, ее ток обозначим I_C.

Для реверсирования АД необходимо провод, подключенный к узлу *U2—V1*, подключить к узлу *W1—V2*.

Как видно из рис. 6.8, при небольших нагрузках ток конденсатора превышает номинальное значение.

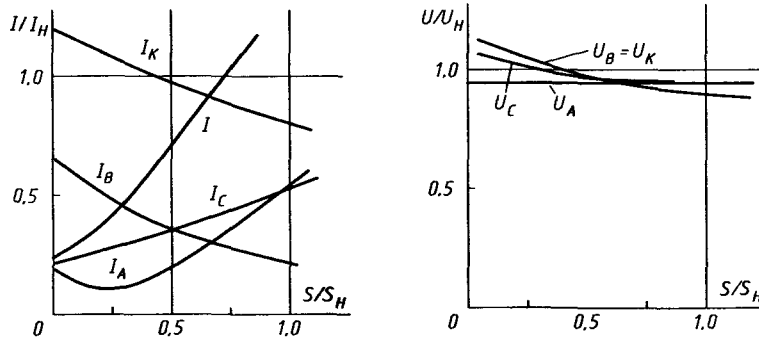


Рис. 6.8. Изменение токов и напряжений конденсаторного АД, соединенного в треугольник, при изменении скольжения (нагрузки на валу)

Характер изменения токов в фазах с изменением нагрузки на валу конденсаторного АД остается таким же, как и при соединении статорных обмоток в звезду. Токи всех трех фаз при номинальной нагрузке не превышают половины номинального тока, однако симметрии токов в такой схеме, как и в предыдущей, нет. Что касается результирующего тока, протекающего по подводящим проводам, то в номинальном режиме он значительно превышает номинальный ток фазы.

Следует иметь в виду, что в схеме при равенстве реактивных сопротивлений фазы и конденсатора возможен так называемый резонанс токов. При этом токи конденсатора и конденсаторной фазы достигают значительных величин, которые могут привести к перегреву обмотки этой фазы.

Величина емкости рабочего конденсатора для схемы (рис. 6.7) в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в предыдущей схеме. Она определяется по выражению, Ф:

$$C_{\text{РД}} = \sqrt{3}\frac{\sqrt{3}}{2\dfrac{I_{\text{Н}}}{\omega U_{\text{Н}}}} = \frac{3}{2\dfrac{I_{\text{Н}}}{2\pi f U_{\text{Н}}}}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц получим приближенное расчетное выражение, где емкость измеряется в мкФ:

$$C_{\text{РД}} = 4800\frac{I_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}}.$$

Пусковая емкость выбирается по соотношению, мкФ:

$$C_{\text{П}} = (2{,}5...3)C_{\text{РД}}.$$

Активная мощность между обмотками распределяется неравномерно. Наибольшую мощность при номинальной нагрузке развивают главная и вспомогательная фазы.

Одно из характерных свойств этой схемы — относительно небольшой пусковой момент по сравнению с предыдущей схемой. Кроме того, для одного и того же двигателя напряжение на конденсаторе уменьшается в $\sqrt{3}$ раз и во столько же раз увеличивается емкость рабочего конденсатора и соответственно пусковая емкость. По этим причинам первая схема (рис. 6.5) является предпочтительнее, чем рассматриваемая, так как ее технические и экономические показатели лучше (меньше емкость и габариты батареи конденсаторов, ниже стоимость всей установки).

Отметим, что *напряжение на конденсаторе в номинальном режиме можно принять равным напряжению сети.* В режиме холостого хода принимают:

$$U_К \approx 1{,}15U_Н.$$

Схема применяется на практике, если напряжение сети равно номинальному напряжению фазы. Например, чтобы подключить трехфазный двигатель на напряжение 380/220 В к однофазной сети 220 В, обмотки конденсаторного двигателя соединяют в треугольник и присоединяют конденсаторы в соответствии со схемой, изображенной на рис. 6.7.

Схемы соединения обмоток статора АД в неполную звезду

На рис. 6.9,*а* и *б* представлены две различные схемы соединения обмоток статора конденсаторного двигателя в неполную звезду. Такие схемы соединения возможны в том случае, когда начала и концы фазных обмоток АД выведены на соединительную колодку и используются для получения пусковых моментов, превышающих номинальный. Такая необходимость возникает в приводах механизмов с тяжелыми условиями пуска, при пуске механизмов под нагрузкой и т. д.

Три фазные катушки в этих схемах образуют две обмотки конденсаторного двигателя. Одну из них будем называть главной фазой, другую конденсаторной.

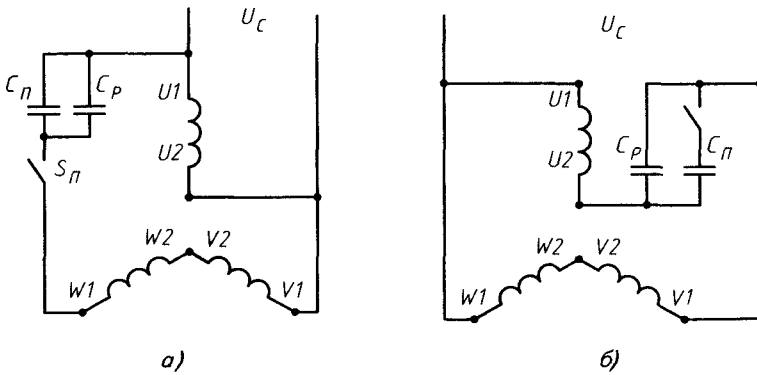


Рис. 6.9. Схемы соединения обмоток конденсаторного двигателя в неполную звезду

Величина рабочей емкости для этой схемы наименьшая из всех остальных, она определяется выражением, мкФ:

$$C_{\text{Р}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2\frac{I_{\text{Н}}}{\omega U_{\text{Н}}}} = \frac{1}{2\frac{I_{\text{Н}}}{2\pi f U_{\text{Н}}}}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц получим приближенное расчетное выражение, где емкость измеряется в мкФ:

$$C_{\text{РУ}} = 1600\frac{I_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}}.$$

Пусковая емкость определяется так же, как и в предыдущих схемах.

2 вариант схемы неполной звезды. Рассмотрим второй вариант схемы конденсаторного двигателя (рис. 6.9,*б*). Зависимости токов главной и конденсаторной обмоток и результирующего тока, а также соответствующих напряжений от нагрузки на валу конденсаторного двигателя приведены на рис. 6.11.

Как и в предыдущей схеме, токи главной и конденсаторной обмоток находятся в пределах номинального значения фазного тока, их мощности близки к номинальной, другими словами, мощность двигателя и в этой схеме используется достаточно полно.

Результирующий ток в питающих проводах превышает номинальный примерно на 70—75%.

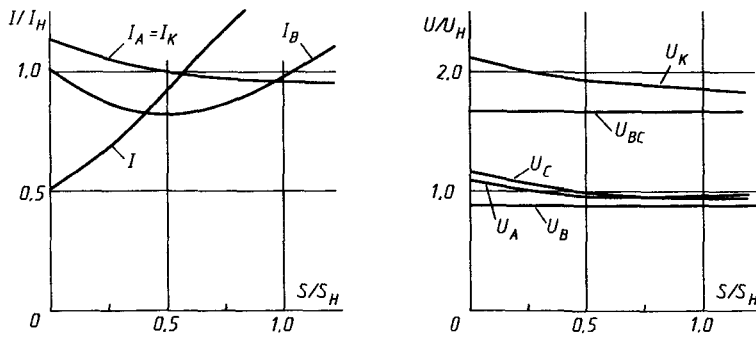


Рис. 6.11. Изменение токов и напряжений конденсаторного АД, соединенного в неполную звезду при изменении скольжения (нагрузки на валу) по схеме на рис. 6.9,*б*.

Что касается напряжений, то, как видно на рис. 6.11, напряжения обмоток, как и в первом варианте, близки к номинальному фазному значению, а напряжение на конденсаторе вдвое превышает номинальное значение.

Для режима холостого хода напряжение на конденсаторе также принимают равным:

$$U_К \approx 2{,}2U_Н.$$

Емкость рабочего конденсатора для этой схемы рассчитывается по выражению, Ф:

$$C_Р = \frac{\sqrt{3}}{2\dfrac{I_Н}{\omega U_Н}} = \frac{\sqrt{3}}{2\dfrac{I_Н}{2\pi f U_Н}}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц получим приближенное расчетное выражение, где емкость измеряется в мкФ:

$$C_{РУ} = 2780\frac{I_Н}{U_Н}.$$

Особенностью схемы является высокий пусковой момент, который может превышать номинальный в несколько раз. Однако высокие значения пускового момента сопряжены с появлением значительных напряжений в цепи конденсаторной фазы, которые достигают максимума при резонансе напряжений. Кроме того, на практике вполне достаточно иметь моменты, близкие к пусковым моментам обычного трехфазного АД. Поэтому пусковая емкость и в этой схеме выбирается по известному уже соотношению, мкФ:

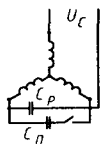
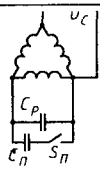
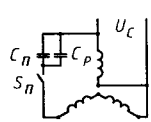
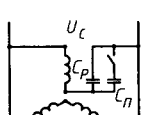
$$C_П = (2{,}5...3)C_{РД}.$$

По изложенным причинам второй вариант соединения обмоток статора в неполную звезду является наиболее рациональным и предпочтительным из всех рассмотренных выше схем. Его следует рекомендовать для практического использования во всех случаях, когда начала и концы обмоток статора выведены на соединительную колодку, а напряжение однофазной питающей сети равно фазному напряжению асинхронного двигателя.

Приведем сводную таблицу схем соединения фазных обмоток конденсаторного АД, включения рабочего и пускового конденсаторов и приближенных расчетных формул рабочей и пусковой емкости, а также наибольших действующих значений напряжений на конденсаторе.

Таблица 6.1

СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ КОНДЕНСАТОРНОГО АД

Схема соединения обмоток АД	Рабочая и пусковая емкости, мкФ	Наибольшее напряжение на конденсаторе
	$C_{РУ} \approx 2780(I_Н/U_Н)$. $C_П \approx (2{,}5...3)C_{РΔ}$.	$U_К \approx 1{,}15U_Н$.
	$C_{РΔ} \approx 4800(I_Н/U_Н)$. $C_П \approx (2{,}5...3)C_{РУ}$.	$U_К \approx 1{,}15U_Н$.
	$C_{РУ} \approx 1600(I_Н/U_Н)$. $C_П \approx (2{,}5...3)C_{РУ}$.	$U_К \approx 2{,}2U_Н$.
	$C_{РУ} \approx 2780(I_Н/U_Н)$. $C_П \approx (2{,}5...3)C_{РУ}$.	$U_К \approx 2{,}2U_Н$.

6.4. Применение кнопочных выключателей для коммутации пусковой емкости

Для включения и отключения пускового конденсатора могут быть использованы кнопочные выключатели серий ВК14-21 или КЕ011, КЕ012, КЕ031 и др. Сведения о них приведены в разделе 5.

Номинальный ток выключателей этих серий составляет 10 А. Сквозной ток в течение 1 с — 200 А. На практике мощность однофазных конденсаторных АД не превышает единиц киловатт, а номинальный ток — десяти ампер. Поскольку длительность пуска таких АД не превышает 1 с, то указанные кнопочные выключатели могут быть использованы для включения и отключения пускового конденсатора. Покажем это на примере.

Пример.

Трехфазный АД типа 5А112МВ6 мощностью 4 кВт, 380/220 В, 1000 об/мин имеет номинальный ток 9,2 А.

Рабочая емкость для конденсаторного АД составит:

$$C_{\text{р}} = 2780\frac{I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} = 116 \text{ мкФ}.$$

Примем ее равной 120 мкФ.

Пусковую емкость возьмем равной 250 мкФ, суммарная емкость составит 370 мкФ.

Определим емкостное сопротивление пускового конденсатора:

$$X_{\text{C}} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314 \cdot 250 \cdot 10^{-6}} = 12{,}7 \text{ Ом}.$$

С учетом активно-индуктивного сопротивления фазы (определяемым по каталожным данным), последовательно с которой соединяется пусковой конденсатор, получим ее полное сопротивление, равное 11 Ом, откуда ток фазы и, следовательно, ток пускового конденсатора составит 22 А. Этот ток лишь вдвое превышает номинальный ток кнопочного выключателя и в 9 раз меньше его сквозного тока.

Поскольку на практике использование АД мощностью более 3...4 кВт в режиме однофазного конденсаторного двигателя считается нецелесообразным, то для коммутации пусковой емкости вполне пригодны упомянутые кнопочные выключатели.

6.5. Схемы управления конденсаторными АД

Для дистанционного управления конденсаторными АД можно использовать магнитные пускатели так же, как и для управления трехфазными двигателями. Отличие заключается лишь в том, что при этом один из главных контактов пускателя не будет использован. Кроме того, необходимо установить соответствие напряжения питания катушки пускателя напряжению однофазной сети.

Кроме того, для цели кратковременного включения пусковой емкости можно использовать ту же пусковую кнопку, которая служит для включения магнитного пускателя. Для этого следует выбрать кнопки серии ВК или КЕ, имеющие пару замыкающих контактов. Один из них включается в цепь катушки КМ магнитного пускателя, а другой — в цепь пускового конденсатора. Пример такой схемы управления представлен на рис. 6.12.

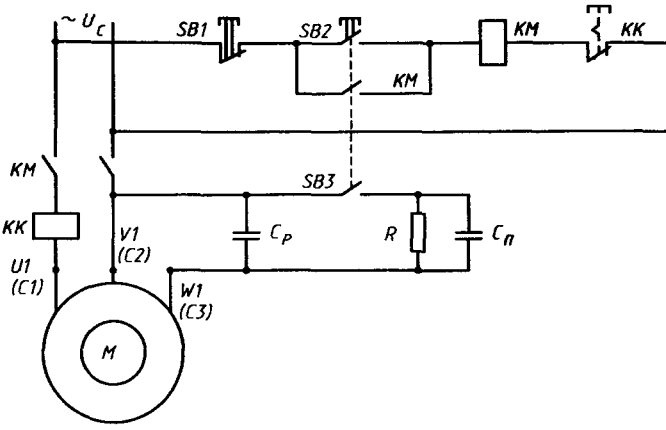


Рис. 6.12. Схема управления асинхронным конденсаторным двигателем при помощи магнитного пускателя и кнопки управления с парой замыкающих контактов

Схема состоит из конденсаторного асинхронного двигателя *M*, магнитного пускателя *KM* с тепловым реле *KK*, кнопки *SB1* «Стоп», кнопки *SB2*—*SB3* «Пуск», рабочего конденсатора C_P, подключенного к зажимам *V1* и *W1* двигателя. В данной схеме используются два главных контакта *KM*. Принцип работы схемы очевиден.

При нажатии на кнопку «Пуск» с замыкающими контактами *SB2* и *SB3* включается катушка *KM* и включает магнитный пускатель. Напряжение сети U_C подается на статор. Одновременно благодаря второй паре контактов *SB3* параллельно к рабочему конденсатору подключается пусковой конденсатор. При отпускании пусковой кнопки контакт *SB3* размыкается и пусковой конденсатор отключается от обмотки двигателя. Для целей безопасности параллельно конденсатору следует присоединить разрядное сопротивление *R* величиной 2...3 кОм. Обычно его припаивают непосредственно к лепесткам выводов конденсатора.

Приведенную схему можно без изменений использовать для любого из рассмотренных выше вариантов соединения обмоток конденсаторного АД. Изменяться будет лишь схема соединения выводов обмоток на колодке двигателя.

Практические схемы соединения выводов обмоток на присоединительной колодке двигателя и присоединение конденсаторов показаны на рис. 6.13.

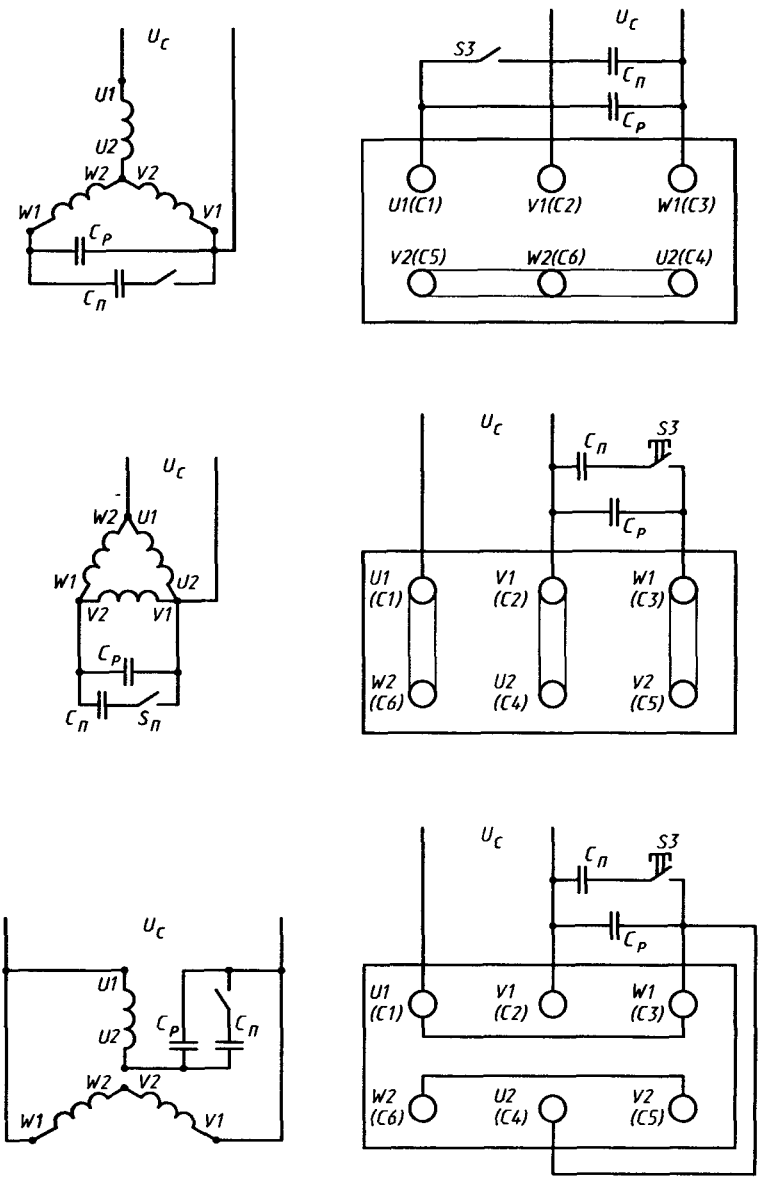


Рис. 6.13. Схемы соединения выводов на присоединительной колодке конденсаторного асинхронного двигателя

6.6. Особенности работы и эффективное использование конденсаторного АД

Как отмечалось выше, эффективность использования конденсаторного АД зависит от ряда факторов.

Должна быть правильно выбрана рабочая емкость и соответствующая нагрузка на валу двигателя. В этом случае токи главной и конденсаторной обмоток примерно равны и не должны превышать номинального значения.

Напряжение на двигателе должно быть равно номинальному. При снижении напряжения сети в квадратичном отношении уменьшается вращающий момент двигателя. Например, понижение напряжения на 30% вызывает уменьшение его момента в 2 раза. В результате двигатель может либо остановится, либо будет продолжать вращаться с повышенным скольжением (потребляя большой ток). Это может вызвать недопустимый перегрев статорных обмоток, составляющих главную фазу. При длительной работе двигателя с пониженным напряжением необходимо соответствующим образом уменьшить нагрузку.

Однако то же самое происходит с конденсаторной фазой, только в случае работы двигателя с недогрузкой. Ток конденсаторной фазы в *режиме холостого хода* при выборе рабочей емкости по приведенным выше соотношениям достигает 120...140% номинального [4]. Это означает, что электрические потери возрастают в 2 раза по сравнению с потерями при номинальном токе. Другими словами, холостой ход конденсаторного двигателя с постоянной рабочей емкостью не только нежелателен, но и опасен, так как ток конденсаторной фазы, достигая в этом случае наибольшего значения, может вызвать недопустимый перегрев обмотки.

Таким образом, нельзя допускать как длительную перегрузку, так и длительную работу двигателя без нагрузки. При работе двигателя с недогрузкой рабочую емкость конденсаторов необходимо уменьшать. Ток конденсаторной фазы при этом не будет превышать номинального значения.

Зависимость величины емкости рабочего конденсатора от нагрузки на валу двигателя является линейной [4]. Она представлена на рис. 6.14. Эта зависимость позволяет легко определить значение рабочей емкости конденсаторов для произвольной нагрузки при известной номинальной. Для этого по заданному относительному значению нагрузки двигателя $P/P_н$ находят соответствующую относительную величину емкости $C_р/C_{рн}$, а по ней — искомое значение емкости. Например,

для $P = 0{,}2P_н$ отношение $C_р/C_{рн} = 0{,}75$. Это означает, что при такой длительной нагрузке величина рабочей емкости должна быть снижена на 25%. Для этой цели в некоторых случаях применяют системы автоматического регулирования емкости конденсатора в функции от нагрузки.

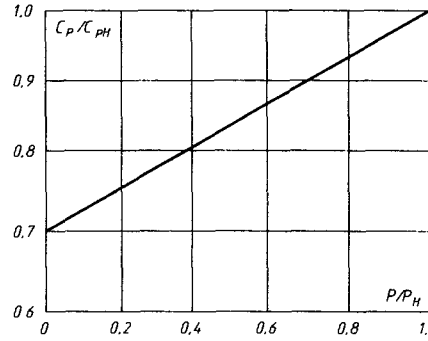


Рис. 6.14. Зависимость величины рабочей емкости от нагрузки АД

Выше было показано, что для создания необходимого пускового момента приходится включать в цепь конденсаторной фазы дополнительную — пусковую емкость, отключаемую после пуска. Включение и отключение пусковой емкости создает проблемы, связанные с толчками момента АД. Характер изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки приводит к ухудшению использования мощности двигателя и уменьшению его перегрузочной способности.

Принципиальный подход к выбору величины пусковой емкости заключается в следующем. Пусковую емкость, равную двум-трем значениям величины рабочей емкости, выбирают для обеспечения пускового момента, не меньшего, чем номинальный момент двигателя в трехфазном режиме. Для тех случаев, когда конденсаторный двигатель запускается вхолостую или нагрузка на его валу невелика, ограничиваются только рабочей емкостью, включаемой постоянно.

6.7. Однофазные двигатели

Двигатели, которые называют однофазными, имеют на статоре, как правило, две обмотки. Одна из них называется главной или рабочей, другая — вспомогательной или пусковой. Необ-

ходимость иметь две пространственно сдвинутые обмотки, питаемые сдвинутыми на 90 электрических градусов токами для получения пускового момента была рассмотрена выше.

Двигатели называют однофазными, поскольку они изначально предназначены для питания от однофазной сети переменного тока.

Сдвиг токов во времени обеспечивают включением во вспомогательную фазу фазосдвигающего элемента — резистора или конденсатора.

В двигателях с пусковым резистором (часто пусковая фаза выполняется с повышенным сопротивлением) магнитное поле эллиптическое; в двигателях с пусковым конденсатором поле ближе к круговому. Вспомогательная обмотка после разгона двигателя отключается и двигатель работает как однофазный однообмоточный. Его результирующее поле резко эллиптическое. По этой причине однофазные двигатели имеют низкие энергетические показатели и малую перегрузочную способность.

В двигателях с постоянно включенным конденсатором емкость последнего выбирается, как правило, из условий обеспечения кругового поля в номинальном режиме. При этом магнитное поле при пуске далеко от кругового и пусковой момент поэтому невелик. Для улучшения пусковых свойств параллельно рабочему конденсатору на время пуска подключается пусковой конденсатор.

В электроприводах с легкими условиями пуска часто применяются однофазные АД с экранированными полюсами. В таких двигателях роль вспомогательной фазы играют размещаемые на явновыраженных полюсах статора короткозамкнутые витки. Поскольку пространственный угол между осями главной фазы (обмотки возбуждения) и витка много меньше 90°, поле в таком двигателе резко эллиптическое. Поэтому пусковые и рабочие свойства двигателей с экранированными полюсами невысоки.

Используются однофазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором: с повышенным сопротивлением пусковой фазы, с пусковым конденсатором, с рабочим конденсатором, с тем и другим, а также двигатели с экранированными полюсами.

Основные технические данные однофазных АД на напряжение 220 В приведены в табл. 6.2 [12]. В таблице приняты обозначения: k_I — кратность пускового тока; $k_П$ — кратность пускового момента; $k_М$ — кратность максимального момента или перегрузочная способность двигателя.

Таблица 6.2

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ОДНОФАЗНЫХ АД

Тип двигвтеля	$P_н$, Вт	$n_н$, об/мин	k_I	$k_П$	$k_М$	КПД, %	cosφ
С повышенным сопротивлением пусковой фазы							
АОЛБ	18 600	1,37 2,94	6,5 9,0	1,0 1,2	1,4 2,2	22 69	0,52 0,72
4АЕ	25 550	1,34 2,84	7,5 8,5	0,8 1,0	1,5 1,7	37 62	0,65 0,83
ДХМ	60 150	1,44 2,91	5,7 8,5	1,7 2,2	2,2 3,1	50 70	0,56 0,62
ДГ	70 200	1,43 2,85	7,5 9,3	1,1 2,3	1,9 2,9	60 71	0,54 0,72
С пусковым конденсатором*							
АОЛГ	18 600	1,37 2,94	3,0 5,5	2,0 2,5	1,5 1,9	22 69	0,68 0,72
4АЧ	40 550	1,34 2,84	4,0 5,5	1,6 1,8	1,5 1,7	37 62	0,65 0,82
С рабочим конденсатором**							
АВЕ	10 400	1,40 2,80	2,5 4,5	0,4 0,7	1,5 1,8	30 72	0,86 0,95
4АТ	40 750	1,32 2,82	2,5 5,0	0,4 0,6	1,5 1,7	45 68	0,82 0,95
КД	25 60	1 35 2,80	1,4 3,3	0,4 1,3	1,4 2,5	15 60	0,80 0,95
УАД	1 50	1,28 2,75	1,5 5,0	0,1 0,5	1,5 2,0	9 60	0,70 0,80
С пусковым и рабочим конденсаторвми***							
АОЛД	30 5 1000	1,43 2,94	2,5 5,0	1,0 1 2	1,6 2,0	33 70	0,88 0,98
4АУТ	40 750	1,32 2,82	2,5 5,5	1,5 2,0	1,5 1,7	45 68	0,82 0,95
С экранированными полюсами							
АДЕ	2,5 25	1,28 1,33	—	0,1 0,6	1,4 1,7	11 24	0,5 0 6
ДВЛВ	0,6 10	1,28 2,70	1,3 1,6	0,2 0,8	1,2 1,6	7 25	0,4 0,6
ДАО	1,6 16	2,35 2,68	1,3 1,5	0,1 0,6	1,2 1,5	9 23	0,4 0,6

* Двигатели АОЛГ имеют пусковые конденсаторы емкостью 5 90 мкФ двигатели 4АЧ — 10 100 мкФ

** Двигатели АВЕ имеют рабочий конденсатор емкостью 0 75 8 мкФ 4АТ — 6 82 мкФ КД — 1 8 мкФ, УАД — 0 5 5 мкФ

*** Двигатели АОЛД имеют пусковой конденсатор 5 125 мкФ рабочий — 2 5 45 мкФ двигатели 4АУТ соответственно 50 200 мкФ и 6 82 мкФ

7. Конденсаторы для асинхронных двигателей

7.1. Основные параметры конденсаторов

Конденсатор является обладающим электрической емкостью концентратором энергии электрического поля и состоит из разделенных диэлектриком проводящих электродов — обкладок с выводами для присоединения к электрической цепи.

Емкость конденсатора есть отношение величины заряда конденсатора к разности потенциалов на его обкладках, которую сообщают конденсатору:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

За единицу емкости в международной системе СИ принимают фараду (Ф) — емкость такого конденсатора, у которого потенциал возрастает на один вольт (В) при сообщении ему заряда в один кулон (Кл). Это очень большая величина, поэтому для практических целей используют более мелкие единицы емкости: микрофараду (мкФ), нанофараду (нФ) и пикофараду (пФ):

$$1\ \Ф = 10^6\ \text{мкФ} = 10^9\ \text{нФ} = 10^{12}\ \text{пФ}.$$

Емкость конденсатора зависит от площади обкладки конденсатора S, толщины слоя разделяющего их диэлектрика d и электрических свойств диэлектрика, характеризуемых диэлектрической проницаемостью ε:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}.$$

Номинальной называют емкость конденсатора, обозначенную на его корпусе. Номинальные значения емкости стандартизованы.

МЭК (Публикация № 63) установлено семь предпочтительных рядов для значений номинальной емкости: E3; E6; E12; E24; E48; E96; E192. Цифры после буквы E указывают на число номинальных значений в каждом десятичном интервале (декаде), которые соответствуют числам 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 или числам, полученным путем умножения или деления на 10^n, где n — целое положительное или отрицательное число. В услов-

ном обозначении номинальная емкость выражена в микрофарадах (мкФ) или в пикофарадах (пФ).

Для обозначения номинальных емкостей применяется система кодирования. Она состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавитов обозначает множитель, составляющий значение емкости, и определяет положение запятой. Буквы П(р), Н(п), М(м), И(1), Ф(Р) обозначают множители 10^{-12}, 10^{-9}, 10^{-6}, 10^{-3} и 1 соответственно для значений емкости, выраженной в фарадах.

Например, емкость 2,2 пФ обозначается 2П2 (2р2); 1500 пФ — 1Н5 (1п5); 0,1 мкФ — М1 (м1); 10 мкФ — 10М (10м); 1 фарада — 1Ф0 (1F0).

Фактическое значение емкости может отличаться от номинального на величину допускаемого отклонения в процентах. *Допускаемые отклонения* изменяются в зависимости от типа и точности конденсатора в весьма широких пределах от ±0,1 до +80%.

Номинальным называют напряжение, указанное на конденсаторе или в документации на него, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. При эксплуатации напряжение на конденсаторе не должно превышать номинальное. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры (обычно 70...85 °С) допустимое напряжение снижается. Номинальные напряжения конденсаторов устанавливаются в соответствии с рядом (ГОСТ 9665-77): 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 350; 400; 450; 500; 630; 800; 1000; 1600; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000 В.

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) определяет относительное изменение емкости (в миллионных долях) от температуры при изменении ее на 1 °С.

Тангенс угла потерь ($\mathrm{tg}\delta$) характеризует потери электрической энергии в конденсаторе. Значения тангенса угла потерь у полистирольных и фторопластовых конденсаторов находятся в пределах $(10...15)10^{-4}$, поликарбонатных $(15...25)10^{-4}$, оксидных 5...35%, полиэтилентерефталатных 0,01...0,012. Величина, обратная тангенсу угла потерь, называется *добротностью конденсатора.*

Сопротивление изоляции и ток утечки. Эти параметры характеризуют качество диэлектрика и используются при расчетах высокоомных, времязадающих и слаботочных цепей. Наиболее высокое сопротивление изоляции у фторопластовых, полистирольных и полипропиленовых конденсаторов, несколько ниже у высокочастотных керамических, поликарбонатных и лавсановых конденсаторов.

Для маркировки конденсаторов постоянной емкости применяют букву К (конденсатор постоянной емкости) и цифры, определяющие вид диэлектрика.

В табл. 7.1 приведены сокращенные обозначения и типы некоторых конденсаторов.

В табл. 7.2 приведены технические данные некоторых конденсаторов, которые можно использовать в качестве рабочих и пусковых для асинхронных двигателей [8].

Таблица 7.1

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ ПО ВИДУ ДИЭЛЕКТРИКА

Сокращенные обозначения	Тип конденсатора по виду диэлектрика
К41	Бумажные на номинальное напряжение 1600 В и выше с фольговыми обкладками
К42	Бумажные с металлизированными обкладками (металлобумажные)
К50	Электролитические алюминиевые
К51	Электролитические танталовые фольговые
К52	Электролитические танталовые объемно-пористые
К53	Оксидно-полупроводниковые
К70	Полистирольные с фольговыми обкладками
К71	Полистирольные с металлизированными обкладками
К72	Фторопластовые
К73	Полиэтилентерефталатные с металлизированными обкладками
К74	Полиэтилентерефталатные с фольговыми обкладками
К75	Комбинированные
К76	Лакопленочные
К77	Поликарбонатные
К78	Полипропиленовые

Таблица 7.2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Тип конденсатора	Классификация вариант исполнения, назначение (диапазон температур)	Диапазон номинальных емкостей, мкФ	Номинальное напряжение, В	Допускаемые отклонения емкости, %
К42-4	Металлобумажные герметизированные В корпусе цилиндрической формы Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +100 °С)	1 20 0,5 10 0,5 4	160 300 500	±5, ±10, ±20 ±5, ±10 ±20 ±5, ±10 ±20
К42-17	Бумажные с металлизированными обкладками В прямоугольных металлических корпусах Для работы в качестве пусковых для однофазных электродвигателей (–60 +85 °С)	10 100	380	±10, ±20
К42-19	Металлобумажные уплотненные частотные Для работы в качестве встроенных элементов внутреннего монтажа аппаратуры в цепях переменного и пульсирующего токов (–50 +55 °С)	2 3,9 10 16 20 1 2 3,9 6,2 10 12 16	250 250 250 250 250 500 500 500 500 500 500 500	±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20 ±5,±10, ±20 ±5, ±10,±20 ±5, ±10,±20 ±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20 ±5, ±10,±20 ±5, ±10,±20 ±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20
К42-20	Бумажные с металлизированными обкладками Для работы в схемах однофазных асинхронных электродвигателей бытовых приборов с частотой сети 50 Гц (–25 +55 °С)	30×3,3 60×4,7	250×400 250×400	+20 –5 +20 –5
К73П-2	Пленочные полиэтилентерефталатные с металлизированными обкладками непропитанные Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–25 +55 °С)	0,5 15 0,25 10 0,5 10	400 630 1000	±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20 ±5, ±10, ±20
К73П-4	Полиэтилентерефталатные герметизированные Выпускаются в металлическом корпусе Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +70 °С)	0,5 2 4 8 10 15	250 250 250	±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20
К78-4	Полипропиленовые металлизированные Для работы в схемах однофазных асинхронных двигателей при частоте сети 50 Гц (–60 +70 °С)	3,3 68 2,2 33 0,47 10	160 250 500	±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20

Тип конденсатора	Классификация, вариант исполнения, назначение (диапазон температур)	Диапазон номинальных емкостей, мкФ	Номинальное напряжение В	Допускаемые отклонения емкости, %
МБГВ	Металлобумажные высоковольтные импульсные, в прямоугольных корпусах с лепестковыми выводами Для формирования мощных импульсов тока разряда в нагрузке, обладают высокой энергоемкостью (–60 +60 °С)	100 100 200	500 1000 1000	±10 ±10 ±10
МБГО	Металлобумажные высоковольтные импульсные, в прямоугольных корпусах с лепестковыми выводами Для формирования мощных импульсов тока разряда в нагрузке, обладают высокой энергоемкостью (–60 +60 °С)	20 30 1 30 1 20 0,5 20 0,25 20	160 300 400 500 630	±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20
МБГП	Металлобумажные высоковольтные импульсные, в прямоугольных корпусах с лепестковыми выводами Для формирования мощных импульсов тока разряда в нагрузке, обладают высокой энергоемкостью (–60 .+70 °С)	0,5 20 0,5 10 0,1 10 0,5 10 0,25 20	200 400 630 1000 1600	±10, ±20 ±10, ±20 +10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20
МБГТ	Металлобумажные Выпускаются в металлических корпусах, герметизированные Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +100 °С)	1 20 0,5 10 0,25 10 0,1 10 0,1 10	160 300 500 750 1000	±2 ±5 ±5 ±5 ±5
МБГН	Металлобумажные, в металлических корпусах, герметизированные Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +70 °С)	1 27	200	±5, ±10
МБГЧ-1	Металлобумажные, в металлических корпусах, герметизированные Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +70 °С)	0,5 10 0,25 4 0,25 2 0,25 1	250 500 750 1000	±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20
МБГЧ-2	Металлобумажные, в металлических корпусах, герметизированные Для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов (–60 +70 °С)	0,25 1 0,5, 10	500 380 250	±10, ±20 ±10, ±20 ±10, ±20

7.2. Конденсаторы типа ДПС, КЭМ и КЭК

Конденсаторы типа ДПС, серийно выпускаемые заводом конденсаторного оборудования АО «ЭЛЕКТРОИНТЕР» (г. Серпухов), относятся к числу новых отечественных изделий, специально предназначенных для использования в качестве рабочих и пусковых конденсаторов для асинхронных двигателей.

Конденсаторы изготовлены с использованием металлизированной пленки, где полипропиленовая основа с малым уровнем потерь, является диэлектриком, а слой алюминиевого сплава, нанесенный с помощью вакуумного напыления непосредственно на диэлектрическую пленку, является подкладкой. Такая технология позволяет получить тонкое покрытие, что значительно улучшает самовосстановление конденсатора. Выпускаются в пластиковом ДПС(П) и алюминиевом ДПС(А) корпусах.

Внешний вид конденсаторов ДПС и некоторых других видов показан на рис. 7.1 [9].

Конденсаторы ДПС выпускают на номинальные напряжения от 250 до 450 В, номинальные емкости от 1 до 80 мкФ. Конденсаторы имеют $\mathrm{tg}\delta$ не более $5 \cdot 10^{-4}$, испытываются на напряжение между выводами $2{,}15U$.

Размеры конденсаторов ДПС представлены на рис. 7.2.



7.1. Внешний вид конденсаторов серий ДПС, ЛПС, КЭК и КЭМ

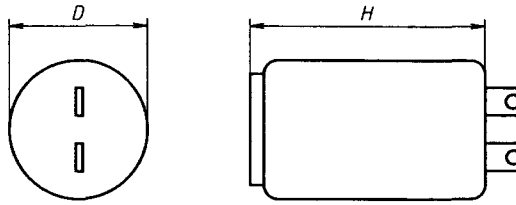


Рис. 7.2. Размеры конденсаторов типа ДПС (П)

Технические данные конденсаторов серии ДПС представлены в табл. 7.3–7.4.

Таблица 7.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КОНДЕНСАТОРОВ ДПС (П)

Емкость, мкФ	Диаметр *D*, мм	Высота *H*, мм
1,00	25	51
1,50	25	51
2,00	25	51
2,50	25	51
3,15	30	51
3,50	30	51
4,00	30	51
5,00	30	71
6,30	30	71
7,00	30	71
8,00	30	71
9,00	35	71
10,00	35	71
11,00	35	71
12,50	35	71
14,00	40	71
16,00	40	71
18,00	45	71
20,00	45	71
22,00	45	71
25,00	45	91
27,50	45	91
30,00	45	91
31,50	45	116
35,00	45	116
40,00	45	116

Таблица 7.4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КОНДЕНСАТОРОВ ДПС (А)

Емкость, мкФ	Диаметр *D*, мм	Высота *H*, мм
1,00	30	63
1,50	30	63
2,00	30	63
2,50	30	63
3,00	30	63
3,15	30	63
4,00	30	63
5,00	30	78
6,00	30	78
6,30	30	78
7,00	35	78
8,00	35	78
10,00	35	78
11,00	35	103
12,00	35	103
12,50	35	103
14,00	35	103
15,00	35	103
16,00	40	103
18,00	40	103
20,00	40	103
22,00	45	128
25,00	45	128
30,00	45	128
32,00	45	128
35,00	55	128
40,00	55	128
45,00	55	128
50,00	55	128
60,00	55	128
80,00	60	138

АО «Электроинтер» выпускает также однофазные конденсаторы для компенсации реактивной мощности серий КЭМ и КЭК (рис. 7.1).

Конденсаторы изготавливаются из металлизированной пленки (полипропилен) или металлизированной бумаги, являют-

ся самовосстанавливающимся, оснащены защитой от повышенного давления. Рабочая частота конденсаторов — 50 Гц.

Однофазный конденсатор типа КЭМ является современным решением для производства оборудования по компенсации реактивной мощности в промышленности и сельском хозяйстве. Конденсаторы КЭМ и КЭК можно также использовать и в качестве рабочих и пусковых для асинхронных двигателей.

Технические данные конденсаторов серии КЭМ представлены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КОНДЕНСАТОРОВ СЕРИИ КЭМ

Номинальное напряжение, В	Емкость, мФ	Мощность, квар	Размер, мм
230	100	1,67	60×132
400	66,3	3,33	60×132
400	83	4,17	60×132
415	61,1	3,3	60×132
415	77	4,17	60×132
450	52,4	3,33	60×132
450	65,5	4,17	60×132
500	42,4	3,33	60×132
525	38,5	3,33	60×132
550	35,1	3,33	60×132
550	43,9	4,17	60×132

8. Асинхронные энергосберегающие двигатели

8.1. Описание асинхронного энергосберегающего двигателя

Материалы этого раздела относятся к разработке и исследованию асинхронных двигателей нового типа, предложенных автором [10].

Выше отмечались, что достоинствами асинхронных двигателей (АД) являются их простота, надежность, невысокая стоимость. Одним из существенных недостатков АД является относительно невысокий коэффициент мощности, в особенности при нагрузках на валу, меньших номинального значения. Это связано с потреблением двигателем из сети реактивной мощности, доля которой в балансе полной мощности особенно возрастает в указанных режимах нагрузки.

Реактивные токи нагружают электрические сети, приводят к появлению в них дополнительных потерь электрической энергии, которые зависят от квадрата тока, обуславливают необходимость выбора проводов и кабелей большего сечения.

Проблема улучшения коэффициента мощности АД возникла еще в начале прошлого века. Были, например, предложены компенсированные асинхронные двигатели Гейланда, Осноса), разработанные в начале XX века. Принцип их действия основан на использовании трехщеточной коллекторной машины, совмещенной с АД или расположенной на одном валу. Такие машины имеют коэффициент мощности, близкий к единице или равный ей. Однако они сложны в изготовлении, имеют высокую стоимость и распространения не получили.

При сохранении основных достоинств АД: простоты, надежности и невысокой стоимости, новый тип двигателя обеспечивает во всем диапазоне нагрузок снижение потребляемой из сети реактивной мощности и улучшение коэффициента мощности, снижение полной мощности, потребляемой из сети, при той же нагрузке на валу, что и у обычной серийной машины. В силу этих особенностей двигатель предлагается называть асинхронным энергосберегающим (АЭД) [11].

АЭД отличается в конструктивном отношении от обычного АД тем, что в зубцах магнитопровода ротора выполнены углубления, в которые вмонтированы постоянные магниты (ПМ). Чис-

ло магнитов соответствует числу полюсов двигателя, число магнитов под полюсом может быть равно единице, либо числу пазов на полюс и фазу. Полюса пар магнитов, обращенные к воздушному зазору, должны быть разноименными.

Ширина и высота ПМ не должны превышать ширину и высоту зубца магнитопровода ротора. Это условие необходимо по двум причинам: во-первых, чтобы не повредить стержень обмотки ротора, во вторых, чтобы исключить возможность замыкания магнитных силовых линий магнита по высоте по стали зубца. Длина магнита зависит от его удельной магнитной энергии и может изменяться от долей до полной длины зубца.

ПМ могут иметь оболочку из алюминиевой или медной фольги, которая снижает влияние размагничивающего действия рабочего поля двигателя. Однако для магнитов с высокими удельными энергиями необходимости в использовании оболочки нет.

Пуск двигателя и его последующая работа на естественной характеристике происходит в обычном асинхронном режиме. Поле ПМ пересекает обмотку статора и наводит в ней ЭДС, направленную встречно по отношению к напряжению сети и создающую в обмотке статора реактивную составляющую тока, имеющую опережающий характер. Это приводит к снижению потребляемой двигателем из сети реактивной и, следовательно, полной мощностей при той же полезной мощности на валу, что и у обычного АД.

Характеристики АЭД существенно зависят от энергии постоянных магнитов. Очевидно, что при весьма малых ее значениях АЭД превращается в обычный АД, тогда как при другом предельном случае АЭД превращается в обычный синхронный двигатель (СД) с постоянными магнитами.

Таким образом, АЭД занимает промежуточное положение между обычным АД и СД с постоянными магнитами. АЭД можно представить как совмещенную электрическую машину, состоящую из АД и синхронного генератора, который выполняет функцию внутреннего источника реактивной мощности. При этом статор является общим для асинхронной и синхронной машин.

Постоянные магниты создают в магнитопроводе и воздушном зазоре машины симметричное стационарное магнитное поле, которое вращается при вращении ротора. Магниты, расположенные в зубцах, создают магнитное поле, замыкающееся по ярму статора и ярму ротора. В зубцовых зонах статора

и ротора в силу их малой тангенциальной магнитной проводимости поля практически нет: оно концентрируется лишь в зубцах, соседних с магнитами.

АЭД можно представить как совмещенную электрическую машину, включающую АД с короткозамкнутым ротором и вспомогательный синхронный генератор с небольшими постоянными магнитами на роторе, занимающую промежуточное положение между двумя этими типами машин. Такой двигатель приобретает новые качества, важнейшим из которых является существенное снижение потребления реактивной мощности из сети. Широкое использование АЭД может обеспечить экономию колоссального количества электроэнергии. Что касается использования АЭД в качестве конденсаторного двигателя, то это обеспечивает резкое уменьшение емкости рабочего конденсатора при той же мощности на валу, что и у обычного асинхронного двигателя.

8.2. Математическое моделирование АЭД

Ниже приводятся некоторые результаты теоретического исследования АЭД методом математического моделирования. Математическая модель разработана при общепринятых допущениях, представлены результаты расчета реактивных мощностей и коэффициентов мощности для АЭД на базе серийных многополюсных асинхронных двигателей. Последние отличаются, как известно, невысоким коэффициентом мощности.

Для расчета энергии или объема постоянных магнитов (ПМ) получено простое соотношение, используемое при построении математической модели АЭД,

$$V_{\text{ПМ}} = \frac{Q_{\Phi}}{2W_{\text{ПМ}} f \omega_1 (1 - s).} \qquad (8.1)$$

где Q_{Φ} — реактивная мощность фазы; $W_{\text{ПМ}}$ — удельная энергия ПМ; f — частота напряжения статора; ω_1 — синхронная скорость; s — скольжение двигателя.

Для асинхронных двигателей с числом полюсов 8—12 были выполнены расчеты объемов магнитов на фазу. При моделировании ПМ использовались параметры сплава ЮНДК35Т, имеющего $B_r = 0{,}8$ Тл и $H_c = 87$ А/м. Например, для двигателя АИР180МВ12 объем ПМ составил 11,6 см^3, а мощность ПМ — 29 вар при реактивной мощности фазы 2948 вар.

Для получения объема ПМ на всю машину это значение следует утроить. Мощность ПМ в среднем в 10 раз меньше реактивной мощности фазы. Это объясняется практически линейной зависимостью эквивалентной мощности ПМ от скорости их вращения.

Математическая модель АЭД при общепринятых допущениях имеет вид:

уравнения напряжений обмоток статора и ротора:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{\psi_{sd}}{dt} - \omega_r \psi_{sq}, \\ U_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{\psi_{sq}}{dt} - \omega_r \psi_{sd}, \\ 0 &= R_{rd} i_{rd} + \frac{\psi_{rd}}{dt}, \\ 0 &= R_{rq} i_{rq} + \frac{\psi_{rq}}{dt}; \end{aligned} \tag{8.2}$$

уравнения потокосцеплений:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= x_{sd} i_{sd} + x_{ad} i_{rd} + e_0, \\ \psi_{sq} &= x_{sq} i_{sq} + x_{aq} i_{rq}, \\ \psi_{rd} &= x_{rd} i_{rd} + x_{ad} i_{sd} + e_0, \\ \psi_{rq} &= x_{rq} i_{sd} + x_{aq} i_{sq}; \end{aligned} \tag{8.3}$$

уравнение движения ротора

$$\frac{(J/p)}{d\omega/dt} = M_э - M_c. \tag{8.4}$$

В уравнениях (2—4) помимо общеизвестных величин напряжений, токов, активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора, имеется эквивалентная ЭДС постоянных магнитов e_0. Она определяется соотношением

$$e_0 = \frac{e_b e_F}{\sqrt{2} R_\sigma G_\delta}, \tag{8.5}$$

где e_b — базисная ЭДС; e_F — ордината пересечения прямой возврата магнита с характеристикой холостого хода; R_σ — магнитное сопротивление воздушного зазора; G_δ — суммарная магнитная проводимость постоянного магнита.

Базисная ЭДС e_b зависит от числа витков статора w_1, час-оты напряжения f, рабочего магнитного потока Φ_δ, обмото-ого коэффициента обмотки статор k_{OS}, коэффициента формь юля k_Φ:

$$e_b = \frac{2\pi f w_1 k_{OS} \hat{O}_\delta}{k_\delta}. \qquad (8.6$$

Решение дифференциальных уравнений после их соответ-ствующей подготовки осуществлено на ПК в программной сре-де МАСС (машинный анализ и синтез систем).

В результате моделирования получены временные зави-симости частоты вращения ротора, величины электромагнитны: моментов, токов статора и ротора в процессе пуска АЭД и в установившемся режиме. Ограничимся здесь анализом важ-нейшего энергетического параметра двигателей — коэффици-ента мощности.

На рис. 8.1 приведена осциллограмма напряжения и тока фазы АЭД на базе двигателя 5AM250S8 мощностью 37 кВт с ПМ на роторе, объем которых равен $V = 22{,}5$ см^3 на фазу. Коэффициент мощности этого АЭД в номинальном режиме составляет $\cos\varphi = 0{,}84$, чему соответствует реактивная мощ-ность 23,8 квар, тогда как у базового двигателя эти величины равны соответственно $\cos\varphi_н = 0{,}72$ и $Q_н = 25{,}6$ квар.

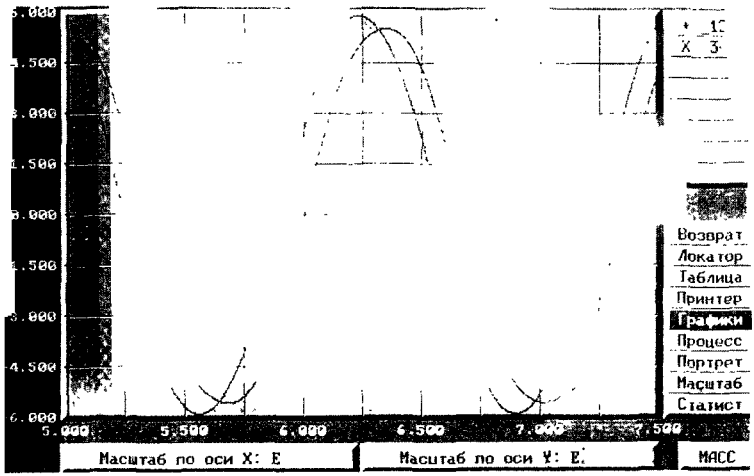


Рис. 8.1. Кривые напряжения и тока АЭД на базе двигателя 5AM250S (объем постоянных магнитов на роторе $V = 22{,}5$ см^3, $\cos\varphi = 0{,}84$)

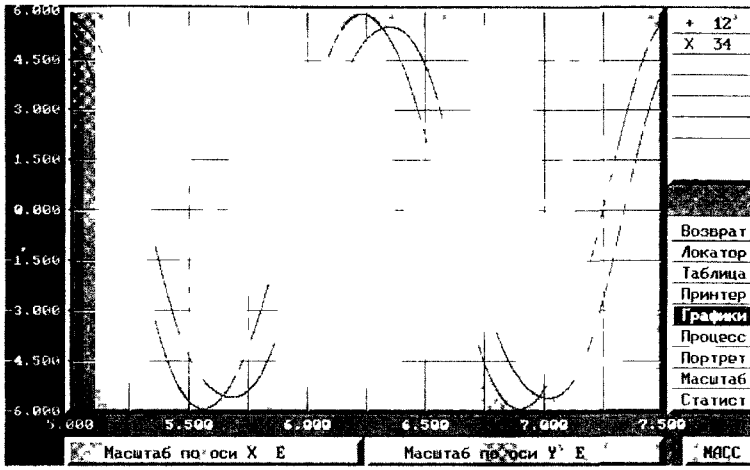


Рис. 8.2. Кривые напряжения и тока двигателя АИР180МВ12 (объем постоянных магнитов на роторе $V = 19{,}2$ см^3, $\cos\varphi = 0{,}812$)

Если увеличить объем магнитов этой же машины до величины $V = 59{,}5$ см^3, то коэффициент мощности АЭД составит $\cos\varphi = 0{,}927$, а реактивная мощность — лишь 15 квар.

На рис. 8.2 представлены кривые напряжения и тока АЭД на базе двигателя АИР180МВ12 мощностью 12,9 кВт с ПМ на роторе объемом $V = 19{,}2$ см^3. Его коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}812$, тогда как коэффициент мощности серийного двигателя $\cos\varphi_н = 0{,}678$. Соответственно, реактивная мощность для АЭД равна 9,25 квар, а для базового — 13,98 квар, т. е. ее потребление снижается на 34%.

Расчеты показывают, что применение магнитов тем эффективнее, чем больше полюсов у базового двигателя.

Следует отметить, что несколько снижается максимальный момент АЭД по сравнению с серийным АД, причем максимум момента сдвигается в сторону больших скольжений, что было отмечено и при проведении экспериментальных исследований АЭД [11].

8.3. Экспериментальные исследования АЭД

Приведем теперь результаты экспериментального исследования АЭД. В целях сравнительного анализа были выполнены экспериментальные исследования образцов серийного АД типа 4АИС56В2 номинальной мощностью 120 Вт и синхронной ско-

ростью вращения 3000 об/мин и опытного образца АЭД, выполненного на базе такого же двигателя. В зубцах ротора были выполнены пазы, в которые впрессованы ферритовые постоянные магниты с индукцией 0,5 Тл.

На рис. 8.3 представлены зависимости мощностей этих двигателей от нагрузки.

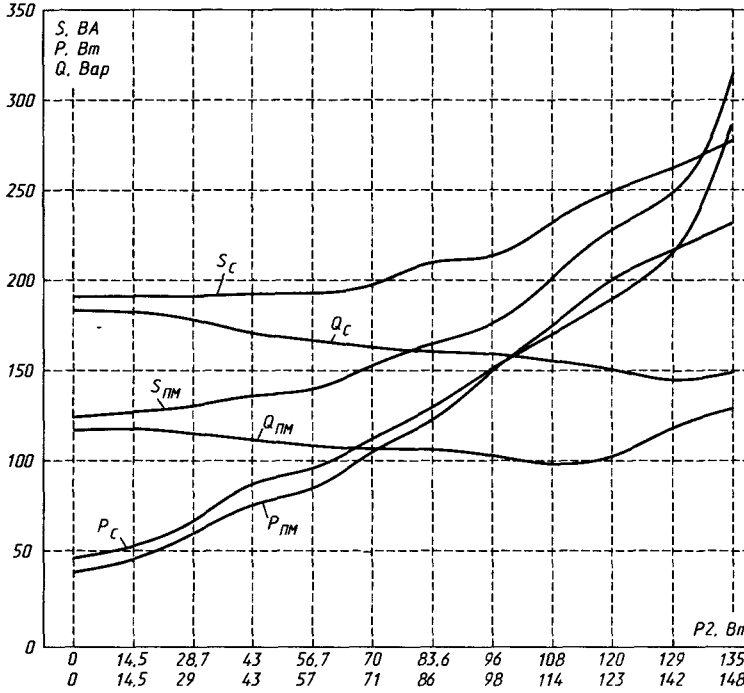


Рис. 8.3. Зависимости активной, реактивной и полной мощностей серийного асинхронного двигателя (индекс с) и асинхронного двигателя с постоянными магнитами (индекс пм) от нагрузки на валу

Анализ распределения полной *S* активной *P1* и реактивной *Q* мощностей серийного асинхронного двигателя и АЭД показывает, что в номинальном режиме потребление реактивной мощности асинхронного двигателя с постоянными магнитами снижается на 30% в сравнении с серийным двигателем, а коэффициент мощности возрастает до 0,87 (у серийного 0,77). При этом заметно снижается и потребляемая двигателем полная мощность, тогда как доля активной мощности несколько

возрастает. Об этом свидетельствуют и гистограммы мощностей для номинального режима и режима холостого хода (рис. 8.4).

В режиме холостого хода АЭД в сравнении с серийным двигателем резко снижает потребляемую полную (66%) и реактивную (65%) мощности.

Как видно из рис. 8.3, практически во всем диапазоне нагрузок двигателей от 0 до $P_{2н}$ реактивная мощность АЭД в среднем на треть меньше реактивной мощности серийного двигателя.

Во всем диапазоне нагрузок ток статора АЭД меньше тока статора серийного АД в среднем на 24...25%. В режиме холостого хода это различие составляет более 30%, что исключительно важно для электроприводов с асинхронными двигателями, в которых режим работы двигателя вхолостую занимает значительную часть диаграммы нагрузки электропривода.

Изготовление асинхронного двигателя с постоянными магнитами незначительно усложняет технологию и стоимость таких двигателей.

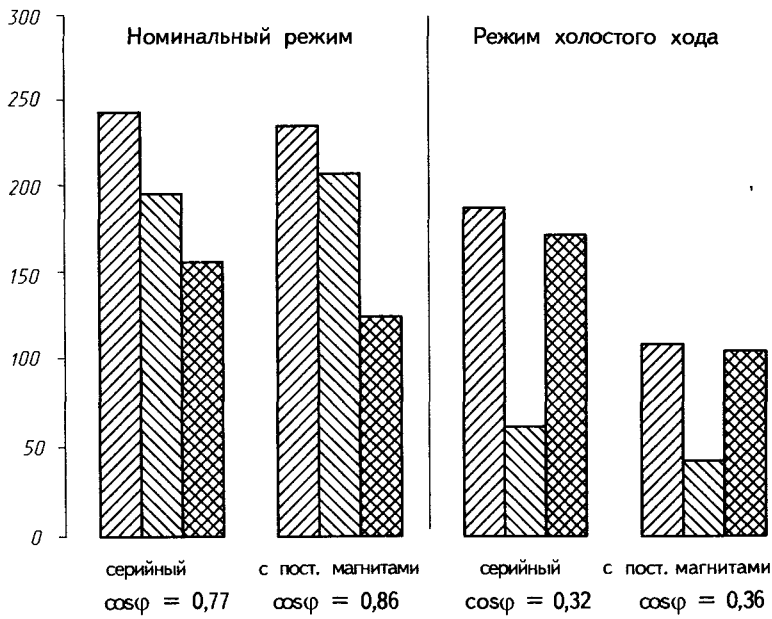


Рис. 8.4. Гистограммы полной, активной и реактивной мощностей серийного асинхронного двигателя 4АИС56В2 (120 Вт, 380 В, 3000 об/мин) и двигателя с постоянными магнитами на базе 4АИС56В2

Для сравнения можно указать, что стоимость двух магнитов, впрессованных в зубцы опытного образца асинхронного двигателя, в 150 раз меньше стоимости самого двигателя.

Недостатком АЭД является некоторое снижение критического момента двигателя. Так, для исследуемых образцов критический момент для АЭД составил 6,9 Н·м по сравнению с 9 Н·м для серийной машины, т. е. около 23%. Кроме того, на участке пуска механической характеристики АЭД (не представленных здесь) имеются провалы, характерные для пусковых характеристик синхронных двигателей с постоянными магнитами и беличьей клеткой. Однако глубина провалов существенно меньше, чем у синхронных машин.

Эти обстоятельства, возможно, несколько сужают область применения АЭД, которые, могут быть особенно успешно использованы для электроприводов механизмов с так называемой вентиляторной характеристикой: вентиляторы, центробежные насосы, компрессоры и т. д.

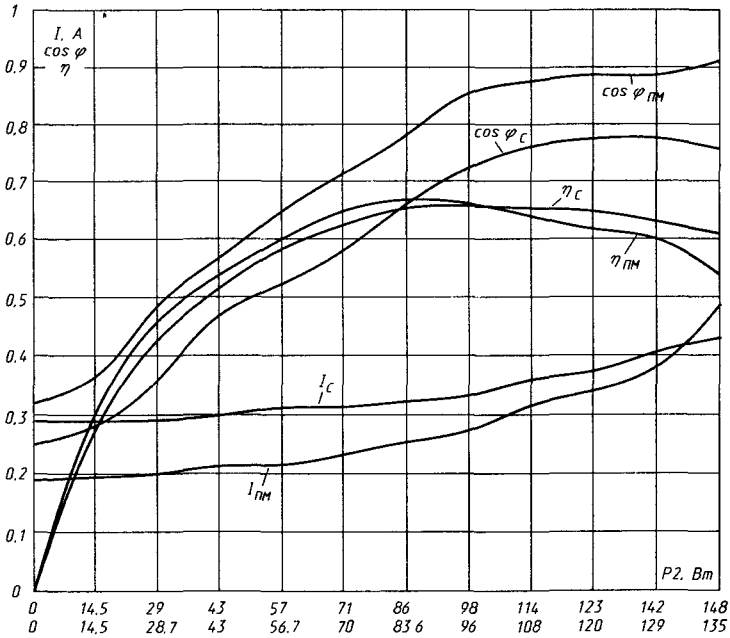


Рис. 8.5. Энергетические показатели и токи серийного асинхронного двигателя (с) и асинхронного двигателя с постоянными магнитами (пм)

Сравнительный анализ энергетических показателей обычного АД и АЭД (рис. 8.5) показывает, что во всем диапазоне нагрузок коэффициент мощности АЭД существенно больше коэффициента мощности обычного АД. Причина этого явления объяснялась выше. Что касается КПД, то эта величина у АЭД также превышает КПД АД при нагрузках, меньших номинального значения. Однако при номинальной нагрузке КПД АЭД несколько ниже КПД обычного АД (0,62 против 0,64). Представляется, что это связано с потерями электромеханического преобразования в синхронном генераторе, который в совмещенной машине «приводится во вращение» асинхронным двигателем.

Что касается токов статора, то, как видно из рис. 8.5, ток статора АЭД во всем диапазоне нагрузок меньше тока серийной асинхронной машины, причем наиболее велика разница токов в режиме холостого хода.

На рис. 8.6 представлены механические характеристики и зависимости тока серийного асинхронного двигателя 4АИС56В2 (с индексом с) и опытного асинхронного двигателя АЭД с постоянными магнитами (с индексом пм).

Следует отметить, что механические характеристики АЭД мягче характеристик серийного АД, и, следовательно, во всем диапазоне моментов на валу при одной и той же нагрузке скорость АЭД несколько ниже скорости серийного АД. Например, при номинальной нагрузке скорость вращения АЭД составляет 2650 об/мин, тогда как скорость вращения серийного двигателя — 2770 об/мин. Это явление принципиально следует объяснить потерями на электромеханическое преобразование в совмещенном синхронном генераторе. Следует объяснить, что для этого синхронного генератора питающую сеть можно представить как имеющую очень малое полное сопротивление. По этой причине «ток» генератора ограничивается лишь полным сопротивлением фазных обмоток и носит преимущественно намагничивающий характер. Отсюда ясно, например, почему в случае использования АЭД в качестве конденсаторного двигателя емкость конденсатора снизится, а его реактивная мощность уменьшится на величину компенсируемой генератором реактивной мощности.

Не исключено, однако, что смягчение механических характеристик связано с некоторым повреждением стержней короткозамкнутой обмотки, которое было допущено при изготовлении пазов в зубце ротора и с последующим незначительным, но все же увеличением активного сопротивления обмотки ротора.

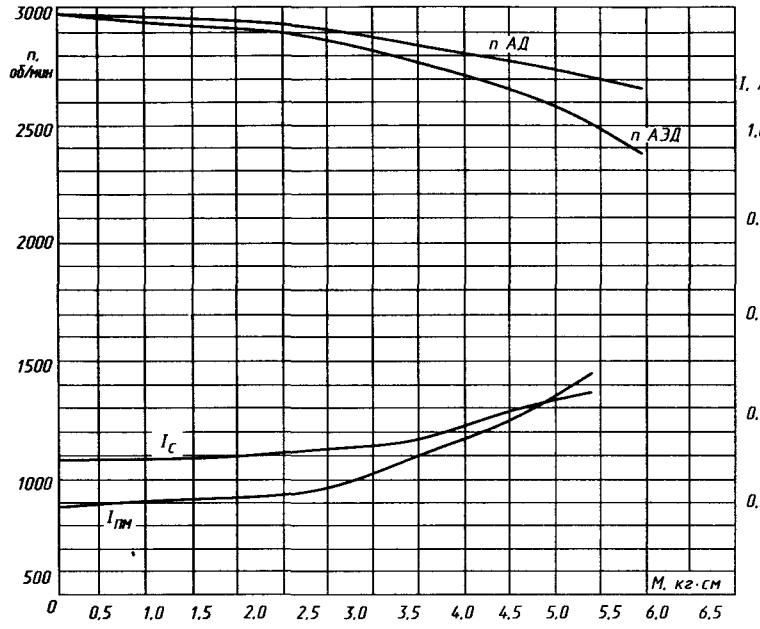


Рис. 8.6. Механические характеристики и зависимости тока серийного асинхронного двигателя 4АИС56В2 (с) и опытного асинхронного двигателя с постоянными магнитами (пм)

Изменения токов того и другого двигателей на рис. 8.6 имеют такой же характер, как и на рис. 8.5. Ток АЭД меньше тока серийного АД на величину компенсированной реактивной составляющей тока статора.

Ограничимся на этом рассмотрением свойств АЭД и сделаем некоторые выводы. АЭД можно представить как совмещенную электрическую машину, включающую АД с короткозамкнутым ротором и вспомогательный синхронный генератор с постоянными магнитами, занимающую промежуточное положение между двумя этими типами машин. АЭД обеспечивает существенное (до 25...30%) снижение потребляемой из сети реактивной мощности и полного тока статора при нагрузке на валу, одинаковой с серийным АД.

Применение АЭД обеспечивает увеличение коэффициента мощности асинхронных электроприводов и значительное снижение потерь электрической энергии как в двигателях, так и в энергосистеме.

Качественное сравнение данных, полученных теоретическим путем, с экспериментальными данными, показывает, что применение небольших постоянных магнитов на роторе асинхронного двигателя позволяет существенно увеличить его коэффициент мощности в сравнении с серийной машиной той же мощности, снизить потребление реактивной мощности, разгрузить сети от реактивных токов и обеспечить тем самым значительную экономию электроэнергии.

Массовое использование АЭД может обеспечить экономию электроэнергии, сопоставимую с количеством электроэнергии, производимой мощными системообразующими станциями.

Литература

1. Проектирование электрических машин. Учебник для вузов/ Под ред. И. П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп.— М.: Высшая школа, 2002.— 727 с., ил.
2. *Кацман М. М.* Электрические машины и электропривод автоматических устройств.— М.: Высшая школа,1987.— 336 с., ил.
3. *Иванов И. И., Равдоник В. С.* Электротехника.— М.: Высшая школа, 1983.— 375 с., ил.
4. *Торопцев Н. Д.* Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.— М.: Энергия, 1979.— 81 с., ил.
5. *Алиев И. И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию. 3-е изд.— М.: Высшая школа, 2002.— 255 с., ил.
6. *Алиев И. И.* Кабельные изделия. Справочник.— М.: ИП РадиоСофт, 2002.— 224 с., ил.
7. *Алиев И. И., Абрамов М. Б.* Электрические аппараты. Справочная книга.— М.: ИП РадиоСофт, 2003.— 302 с., ил.
8. *Аксенов А. И., Нефедов А. В.* Резисторы, конденсаторы, провода.— М.: Солон-Р, 2000.— 240 с., ил.
9. Конденсаторы для пуска однофазных двигателей. Каталог АО «ЭЛЕКТРОИНТЕР».— Серпухов, 2000.
10. Свидетельство РФ на полезную модель №17751. Асинхронный двигатель/И.И. Алиев//Открытия. Изобретения. 2001, № 11.
11. *Алиев И. И.* Асинхронный энергосберегающий двигатель. Электротехника, 2001, №11, с. 39–41.
12. Электротехнический справочник. В 4-х т. Т 2. Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. 8-е испр. изд.— М.: МЭИ, 1998.— 518 с., ил.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «РАДИОСОФТ»
http://www.radiosoft.ru e-mail: info@radiosoft.ru

Отдел реализации
тел./факс: (095) 177-4720 e-mail: real@radiosoft.ru

Адрес и телефон для заявок на книги по почте:
111578 Москва, Саянская, 6а, «Пост-Пресс»,
тел: (095) 307-0661, 307-0621 e-mail: postpres@dol.ru

АЛИЕВ Исмаил Ибрагимович

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМАХ

Ответственный за выпуск
А. А. Халоян

Редактор
М.Ю. Нефёдова

Дизайн обложки
Л.К. Абдрашитова

Компьютерная верстка
О.В. Розанова

Сдано в набор 12.02.2004. Подписано в печать 20.04.2004.
Формат 70x100/32 Гарнитура «TextBook». Бумага газетная.
Печать высокая. Печ. л. 4. Авт. л. 7. Тираж 5000 экз. Заказ 2484.

Издательское предприятие РадиоСофт
109125, Москва, Саратовская ул., д. 6/2

ОАО «Владимирская книжная типография»
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7
Качество печати соответствует качеству предоставленных диапозитивов