



Низковольтное оборудование

## Трехфазные асинхронные двигатели. Общие сведения и координация аппаратов АББ

Серия инженера-конструктора

Power and productivity  
for a better world™





# Трехфазные асинхронные двигатели

## Общие сведения и координация аппаратов АББ

### Содержание

#### **Введение** ..... 2

### **1 Трехфазный асинхронный двигатель**

**1.1** Классификация и области применения асинхронных двигателей 3

**1.2** Конструкция асинхронного двигателя ..... 4

### **2 Защита и коммутация асинхронного двигателя**

**2.1** Основные термины и определения .... 6

**2.2** Основные требования стандартов по координации ..... 8

2.2.1 Нормальные и тяжелые условия пуска ..... 8

2.2.2 Координация типа 1 и 2 ..... 10

### **3 Основные способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором**

**3.1** Прямой пуск ..... 11

**3.2** Пуск при пониженном напряжении .. 11

3.2.1 Пуск переключением по схеме звезда/треугольник ..... 11

3.2.2 Автотрансформаторный пуск ..... 13

3.2.3 Реостатный (реакторный) пуск ..... 14

3.2.4 Плавный пуск ..... 14

### **4 Координация аппаратов АББ**

**4.1** Теоретические аспекты координации аппаратов..... 16

4.1.1 Используемые на практике аппараты и соответствующие комбинации ..... 16

4.1.2 Специальные функции защиты и управления ..... 22

4.1.3 Координация аппаратов АББ ..... 22

**4.2** Использование таблиц АББ с данными по координации устройств защиты электродвигателей ..... 26

### **5 Основные параметры асинхронного двигателя, указываемые на заводской табличке** ..... 29

Приложение А:  
теория трехфазных асинхронных двигателей ..30

Приложение В:  
приближенный расчет времени пуска ..... 32

Приложение С:  
тепловая защита и режим работы при обрыве фазы ..... 34

Приложение D:  
Типовые режимы работы ..... 37

Глоссарий ..... 41

## Введение

Трехфазные асинхронные двигатели можно считать одними из самых распространенных электрических машин, надежно выполняющими свои функции в течение многих лет, не требуя большого технического обслуживания. Выпускается широкая гамма различных электродвигателей, предназначенных для применения в промышленных и бытовых электроустановках.

Данные электродвигатели находят широкое применение в самых разных отраслях промышленности, таких как пищевая, химическая, металлургическая, деревоперерабатывающая, различные очистные сооружения и добывающие предприятия. Электродвигатели используются для привода машин, работающих с постоянной, а также с переменной частотой вращения, например, подъемное оборудование (пассажирские и грузовые лифты), транспортное оборудование (конвейеры), системы вентиляции и кондиционирования воздуха, а также насосы и компрессоры.

Из вышеизложенного становится понятно, что в промышленности трехфазные асинхронные двигатели являются наиболее распространенными электрическими машинами (потребляемая электродвигателями мощность составляет примерно 75% от общего потребления мощности в промышленности). Поэтому, совершенно ясно, насколько важно сокращение потребления электроэнергии как с точки зрения управления предприятием (за весь срок службы расходы на оплату потребляемой двигателем электроэнергии составляют примерно 98%, и только 2% могут быть отнесены на его приобретение и техническое обслуживание), так и в отношении оптимизации энергоэффективности в целом. Например, сокращение потребления электро-

энергии может быть достигнуто за счет применения частотно-регулируемых приводов или за счет коррекции коэффициента мощности с целью получения такого cos $\phi$ , который позволит избежать штрафов за перерасход энергии, или за счет использования высокоэффективных двигателей с кодом «EFF1», созданных на основе передовых конструкторских решений и применения материалов, позволяющих сократить потребление электроэнергии на 20%.

Данная статья (седьмая из серии статей о техническом применении, написанных специалистами АББ) состоит из пяти частей. После обзора конструкции электродвигателя рассматриваются основные требования стандартов по координации двигателей с аппаратами управления и защиты. Затем приводятся общие сведения об основных способах пуска, в следующей части – обзор аппаратов АББ, предназначенных для пуска электродвигателей, и примеры таблиц АББ по координации. В последней части приведен анализ некоторых наиболее важных характеристик электродвигателей. Завершают брошюру приложения:

- основы теории асинхронных двигателей с описанием базовых элементов, объясняющих принцип их действия;
- пример приближенного расчета времени пуска в зависимости от характеристик двигателя и нагрузки;
- некоторые сведения о режиме работы электродвигателя в случае обрыва фазы;
- подробный разбор понятия «типовой режим работы».

# 1 Трехфазный асинхронный двигатель

## 1.1 Классификация и области применения асинхронных двигателей

Трехфазный асинхронный двигатель может быть  
– с фазным или  
– с короткозамкнутым ротором.

Основное различие заключается в конструкции ротора. В двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполнена аналогично обмотке статора. Ротор имеет более сложную и менее надежную конструкцию, поскольку используются щетки, скользящие по контактным поверхностям ротора. Преимуществом такой конструкции является возможность управления пуском электродвигателя за счет подключения обмоток ротора через сопротивления. Электродвигатели этого типа требуют периодического технического обслуживания и имеют большие габаритные размеры. В двигателях с короткозамкнутым ротором ротор состоит из стержней замкнутых накоротку с обоих концов. Благодаря такой более простой конструкции ротора данные электродвигатели отличаются высокой надежностью и меньшей стоимостью.

Применение современных электронных устройств, обеспечивающих очень простое и эффективное регулирование частоты вращения электродвигателей, привело к тому, что во всех машинах и механизмах с регулируемой частотой вращения вместо двигателей постоянного тока или двигателей с фазным ротором, стали применять более простые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Такие решения обычно применяют для привода насосов, вентиляторов, компрессоров и другого промышленного оборудования. Компания АББ производит и поставляет полный ассортимент низковольтных электродвигателей, от простых до самых сложных моделей. Компания АББ всегда готова предложить оптимальные и выгодные решения для любых областей применения. Наиболее распространены двигатели общего назначения, предназначенные для производителей комплектного оборудования. Их можно заказать непосредственно у наших дистрибьюторов по всему миру.

Электродвигатели этой категории характеризуются высококачественной конструкцией и предназначены, в частности, для привода вентиляторов, насосов, компрессоров, подъемного и другого оборудования. Все двигатели имеют нормальный уровень КПД – EFF2. По запросу могут быть поставлены электродвигатели с повышенным уровнем КПД – EFF1. Ассортимент электродвигателей общего назначения, производимых компанией АББ, включает в себя двигатели следующих типов:

- двигатели в алюминиевом корпусе мощностью от 0,06 до 95 кВт;
- двигатели в стальном корпусе мощностью от 75 до 630 кВт;
- двигатели в стальном корпусе мощностью от 0,25 до 250 кВт;
- двигатели открытого исполнения мощностью от 75 до 800 кВт;
- электродвигатели со встроенным тормозом мощностью от 0,055 до 22 кВт;
- однофазные электродвигатели мощностью от 0,065 до 2,2 кВт;

Электродвигатели АББ имеют маркировку SE и соответствуют основным международным стандартам данной отрасли, например, стандартам МЭК 60034-1, МЭК 60034-2, МЭК 60034-8, МЭК 60034-12 в отношении электрических характеристик и стандартов МЭК 60034-5, МЭК 60034-6, МЭК 60034-7, МЭК 60034-9, МЭК 60034-14 и МЭК 60072 в отношении механических характеристик. (В серии ГОСТ Р введены стандарты: ГОСТ Р 52776 (МЭК 60034-1), ГОСТ Р МЭК 60034-2-1, ГОСТ Р МЭК 60034-5, ГОСТ 20459 (МЭК 34-6), ГОСТ 2479 (МЭК 34-7), ГОСТ Р 53148 (МЭК 60034-9), ГОСТ Р МЭК 60034-12, ГОСТ Р МЭК 60034-14).

## 1.2 Конструкция асинхронного двигателя

Для лучшего понимания устройства трехфазного асинхронного двигателя далее приведено краткое описание основных частей, из которых состоит вращающаяся электрическая машина, то есть частей, с помощью которых электрическая энергия преобразуется в механическую.

Первой частью является статор, который состоит из электромагнитной системы, представляющей собой ферромагнитный сердечник с размещенными в пазах на его внутренней поверхности обмотками, и корпуса, служащего опорой для электродвигателя. Главная задача статора – создавать электромагнитное поле. Сердечник статора, как показано на рисунке 1, состоит из изолированных друг от друга листов электротехнической стали, что снижает потери на перемагничивание и «вихревые токи». В пазы набранного из листов сердечника укладываются три первичные обмотки, каждая из которых в свою очередь состоит из нескольких различным образом соединенных между собой обмоток. На обмотки подается напряжение сети, в результате чего создается электромагнитное поле статора. Обмотки статора трехфазного двигателя можно соединить звездой или треугольником. Такая возможность реализуется в электродвигателях с выводной коробкой, в которой находятся шесть зажимов, благодаря чему один и тот же двигатель может работать от трехфазной сети с разным напряжением.

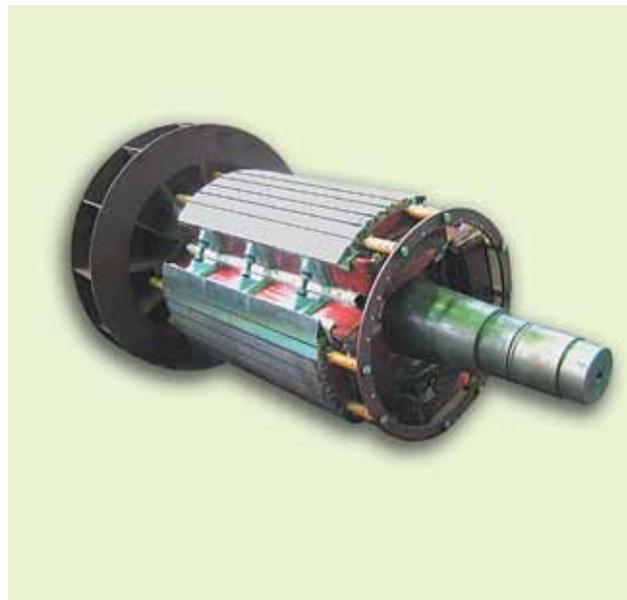
Рисунок 1. Статор трехфазного асинхронного двигателя



Двойное питание двигателя может быть указано, например, следующим образом: 230 В  $\Delta$  – 400 В Y или 400 В  $\Delta$  – 690 В Y, где символ Y или  $\Delta$  указывает схему соединения обмоток статора звездой или треугольником соответственно. Так например, во втором случае (400 В  $\Delta$  – 690 В Y) обмотки электродвигателя, соединенные треугольником, следует подключить к трехфазной сети с линейным напряжением 400 В, а обмотки соединенные звездой – к сети питания с напряжением 690 В (напряжение подаваемое на соединенные звездой обмотки будет уменьшено в  $\sqrt{3}$  раз).

Второй частью электродвигателя является ротор. Он расположен внутри статора и представляет собой ту часть электродвигателя, в которой наводится индукционный ток. Ротор, как показано на рисунке 2, состоит из медных или алюминиевых стержней,

Рисунок 2. Ротор трехфазного асинхронного двигателя



полученных методом литья под давлением в пазах внешней части ферромагнитного сердечника. Стержни расположены параллельно оси вращения ротора. С торцов стержни замыкаются механически и электрически двумя торцевыми кольцами.

Таким образом, ротор, закрепленный на валу электродвигателя, имеет очень компактную и надежную конструкцию.

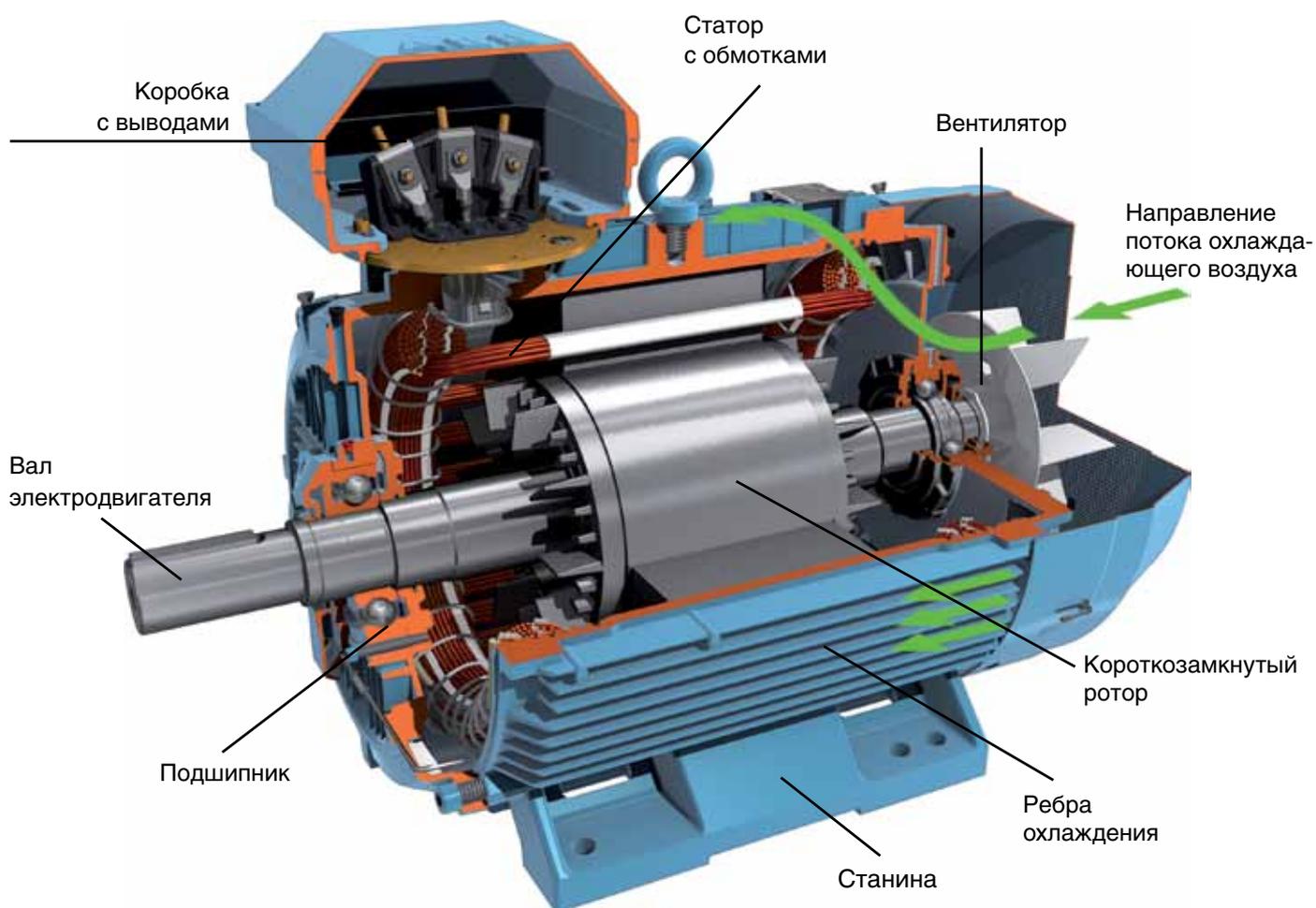
Работа электродвигателя основана на принципе электромагнитной индукции. Взаимодействуя между собой, магнитные поля вызывают вращение вала двигателя. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в механическую.

В состав электродвигателя входят и другие механические части. К основным частям относятся следующие:

- два подшипника, установленных на статоре и являющиеся опорой вала электродвигателя;
- станина, ребра которой рассеивают тепло, выделяемое главным образом статором и на которой закреплена выводная коробка;
- многолопастной вентилятор, служащий для охлаждения двигателя.

Общий вид трехфазного асинхронного двигателя в разрезе приведен на рисунке 3.

Рисунок 3. Общий вид асинхронного двигателя в разрезе



## 2 Защита и коммутация асинхронного двигателя

Один из самых важных моментов, который необходимо учитывать при выборе и реализации системы управления пуском и разгоном двигателя – это безопасность и надежность. Основная причина, по которой электродвигатели выходят из строя, – короткие замыкания, которые могут возникнуть, например, из-за высокой влажности, наличия загрязнений и пыли между обмотками или из-за перегрузки. Возникающий в результате неисправности сверхток вызывает повышение температуры, которое может привести к необратимому повреждению электродвигателя и к его возгоранию. Пуск электродвигателя представляет собой наиболее критичную фазу работы, как для электродвигателя, так и для системы управления, которая должна обеспечивать надлежащий контроль работы электродвигателя, а также все необходимые виды защиты и блокировки. Необходимо правильно подобрать пусковые и коммутационные аппараты с учетом их типоразмера. Первый шаг, который следует предпринять в этом направлении, – определить стандарт, требованиям которого должна соответствовать применяемая в системе управления аппаратура. В данном случае – это ГОСТ Р 50030.4.1-2002 (МЭК 60947-4-1-2000) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контактные и пускатели», который распространяется на контакторы переменного и постоянного тока и пускатели переменного тока, главные контакты которых предназначены для коммутации цепей с номинальным напряжением не более 1000 В переменного или 1500 В постоянного тока.

### 2.1 Основные термины и определения

В данном разделе приведены некоторые термины и определения из стандарта ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1), которые позволяют глубже понять назначение и функции основных электрических аппаратов, применяемых для управления электродвигателями.

#### Пускатели переменного тока

Аппараты переменного тока, предназначенные для пуска и разгона двигателя до номинальной скорости, обеспечения непрерывной работы двигателя, отключения питания и защиты двигателя и подключенных цепей от рабочих перегрузок. Реле перегрузки для пускателей, в том числе полупроводниковые, должны отвечать требованиям настоящего стандарта.

#### Пускатели прямого действия

Пускатели, одноступенчато подающие сетевое напряжение на зажимы двигателя и предназначенные для его пуска и разгона до номинальной скорости. Кроме того, они должны обеспечивать коммута-

цию и защиту в соответствии с общим определением. Дополнительно в стандарте приводятся два термина, касающиеся реверсирования направления вращения двигателя.

#### Реверсивные пускатели

Пускатели, предназначенные для изменения направления вращения двигателя путем переключения его питающих соединений без обязательного останова двигателя.

#### Пускатели с двумя направлениями вращения

Пускатель, предназначенный для изменения направления вращения двигателя путем переключения его питающих соединений только во время останова двигателя.

#### Пускатели переменного тока на пониженном напряжении

Пускатели переменного тока, предназначенные для пуска и разгона двигателя до номинальной скорости путем подачи сетевого напряжения на зажимы двигателя двумя или более ступенями или путем постепенного повышения напряжения на зажимах. Кроме того, они должны обеспечивать коммутацию и защиту в соответствии с общим определением. Для управления последовательными коммутациями ступеней могут использоваться контакторные реле с выдержкой времени или аналогичные устройства. Наиболее распространенный тип пускателей переменного тока на пониженном напряжении – это пускатели со схемой звезда – треугольник, определение которых также приведено в рассматриваемом стандарте.

#### Пускатели со схемой звезда – треугольник

Пускатели со схемой звезда – треугольник, предназначенные для пуска трехфазного двигателя таким образом, что в пусковом положении обмотки статора соединяются звездой, а в рабочем положении – треугольником. Кроме того, они должны обеспечивать коммутацию и защиту в соответствии с общим определением.

Пускатели со схемой звезда – треугольник, удовлетворяющие данному стандарту, не предназначены для быстрого реверсирования двигателя и поэтому не могут применяться в качестве аппаратов с категорией применения АС-4.

Данный стандарт распространяется и на другие типы пускателей (автотрансформаторные и реостатные статорные пускатели) и содержит соответствующие термины и определения.

Пускатели, описываемые в этом стандарте, как правило, не предназначены для отключения тока короткого замыкания. Поэтому соответствующая защита от короткого замыкания должна быть реализована в системе управления.

После определения пускателей в соответствии с выполняемыми функциями приведена дополни-

тельная классификация по рабочим характеристикам и категориям применения, учитывающая возможности использования пускателей совместно с устройством защиты от короткого замыкания. Указываются способы крепления и электромонтажа.

Сначала определяется типично используемое устройство защиты, т.е. автоматический выключатель, который в соответствии со стандартом ГОСТ Р 50030.2 (МЭК 60947-2) «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели» представляет собой:

*контактный коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях цепи, включать и проводить токи в течение определенного времени и отключать их при определенных аномальных условиях цепи, например при коротком замыкании.*

Затем определяются и классифицируются устройства коммутации и защиты.

#### Комбинированный пускатель

Комбинация пускателя и аппарата защиты от короткого замыкания, смонтированных и соединенных в предусмотренной для этого оболочке. Функции комму-

тационного аппарата и аппарата защиты от короткого замыкания могут выполнять комбинация с плавкими предохранителями, выключатель с плавкими предохранителями или автоматический выключатель, пригодный или непригодный для разъединения.

#### Защищенный пускатель

Комбинация пускателя и аппарата защиты от коротких замыканий в оболочке или без нее, смонтированных и соединенных согласно инструкции изготовителя пускателя.

Коммутационный аппарат с ручным управлением и аппарат защиты от коротких замыканий могут представлять собой единый аппарат и оснащаться дополнительно защитой от перегрузки. Определение «пускатель» подразумевает коммутационный аппарат, например, контактор, плюс устройство защиты от перегрузки, например тепловое реле. Рассмотрим теперь, как в стандарте ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1) определяются эти два устройства, входящие в состав пускателя.

#### Контактор механический

Механический коммутационный аппарат с одним положением покоя, оперируемый не вручную, спо-

Таблица 1: Категории применения

Род тока	Категория применения	Типичные области применения <sup>(1)</sup>
Переменный	AC-1	Неиндуктивные или слабоиндуктивные нагрузки, печи сопротивления
	AC-2	Двигатели с контактными кольцами: пуск, отключение
	AC-3	Двигатели с короткозамкнутым ротором: пуск, отключение без предварительного останова (2)
	AC-4	Двигатели с короткозамкнутым ротором: пуск, торможение противотоком, повторно-кратковременные включения
	AC-5a	Коммутация разрядных электроламп
	AC-5b	Коммутация ламп накаливания
	AC-6a	Коммутация трансформаторов
	AC-6b	Коммутация батарей конденсаторов
	AC-7a	Слабоиндуктивные нагрузки бытового и аналогичного назначения
	AC-7b	Двигательные нагрузки бытового назначения
	AC-8a	Управление герметичными двигателями компрессоров холодильных машин с ручным взводом тепловых расцепителей
AC-8b	Управление герметичными двигателями компрессоров холодильных машин с автоматическим взводом тепловых расцепителей	
Постоянный	DC-1	Неиндуктивные или слабоиндуктивные нагрузки, печи сопротивления
	DC-3	Шунтовые двигатели: пуск, торможение противотоком, повторно-кратковременные включения.
		Динамическое отключение двигателей постоянного тока
	DC-5	Серийные двигатели: пуск, торможение противотоком, повторно-кратковременные включения.
		Динамическое отключение двигателей постоянного тока
DC-6	Коммутация ламп накаливания	

(1) В областях применения, связанных с пуском двигателя, в которых используются пускатели, относящиеся к одной или нескольким следующим категориям: AC-3, AC-4, AC-7b, AC-8a и AC-8b, – как правило, применяются пускатели прямого действия, а в тех случаях, когда пускатель применяется в категории AC-3 – пускатели со схемой «звезда – треугольник».

(2) Наиболее распространенная область применения пускателей прямого действия – коммутация трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, поэтому в этом случае необходимо ссылаться только на категорию применения AC-3. Для данной области применения стандарт предписывает рабочие условия, которые немного отличаются от условий, предусмотренных для категории AC-3, т. е. могут предусматриваться случайные повторно-кратковременные включения или торможение противотоком ограниченной длительности, например при наладке механизма; в эти ограниченные периоды число срабатываний не должно превышать пяти за 1 мин или более 10 за 10 мин.

собный включать, проводить и отключать токи в нормальных условиях цепи, в том числе при перегрузках.

### Тепловое реле

Тепловое реле предназначено для защиты двигателя от перегрева при длительном протекании недопустимо больших токов перегрузки затяжного пуска, вызванного недопустимо большим снижением напряжения, асимметрией питающего напряжения. Стандарт устанавливает различные области применения для контакторов и пускателей, основываясь на понятии «категория применения».

### Категория применения

Вводятся различные категории применения, которые характеризуются областью применения согласно таблице 1. Каждая категория применения определяет для контакторов минимально необходимые эксплуатационные характеристики (например, область применения или номинальную отключающую способность) в соответствии со значениями тока, напряжения, коэффициента мощности или постоянной времени и условиями испытаний, предписанных стандартами.

## 2.2 Основные требования стандартов по координации

К устройствам, которые подпадают под приведенные выше определения и которые обычно используются для реализации защищенных пускателей, относятся следующие:

- устройство защиты от короткого замыкания; как правило, это автоматический выключатель с электромагнитным расцепителем (возможно использование предохранителей);
- коммутационный аппарат, например, контактор;
- устройство защиты от перегрузки, например, тепловое реле.

Данные устройства необходимо правильно выбрать, так чтобы обеспечивались надлежащие управление и защита двигателя. Кроме того, они должны быть скоординированы друг с другом, так, чтобы обеспечивалась защита всех компонентов пускателя, а, следовательно, и безопасность электроустановки. Эксплуатационные характеристики устройства защиты от короткого замыкания должны отвечать предъявляемым требованиям и соответствовать характеристикам компонентов, используемых в каждой конкретной области применения. Проверка реализации защиты различными устройствами осуществляется изготовителем с учетом эксперимен-

тальных данных и характеристик продукции, которые не приводятся в техническом каталоге или каталоге продукции. По этой причине изготовитель обычно предоставляет проектировщикам таблицы с данными по координации с описанием компонентов, которые должны использоваться для обеспечения характеристик, предписанных требованиями по координации. Использование какого-либо компонента пускателя (контактора или устройства защиты от перегрузки) или устройства защиты от короткого замыкания, не соответствующего предписаниям изготовителя, может привести к нарушению координации.

Координация определяется по номинальному току двигателя, напряжению и току короткого замыкания цепи. Аппараты, участвующие в пуске двигателя (автоматический выключатель плюс контактор плюс тепловое реле), классифицируются на аппараты, предназначенные для «нормального» или «тяжелого» пуска, а также классифицируют по координации типа 1 и типа 2. Что касается первой классификации, то можно утверждать, что различие между нормальными или тяжелыми условиями пуска связано со временем пуска и характеристикой срабатывания тепловой защиты. Координация типа 1 и 2 различается тем как будут защищены коммутационный аппарат (контактор) и аппарат защиты от перегрузки (внешнее тепловое реле) в условиях короткого замыкания. Далее приводится дополнительная информация о различных способах пуска двигателя.

### 2.2.1 Нормальные и тяжелые условия пуска

Классификация способов пуска связана с характеристиками нагрузки и теплового реле. Обычно используются компенсированные тепловые реле, то есть реле, рабочие характеристики которых не изменяются при изменении температуры окружающей среды. В стандарте приводятся типовые время-токовые характеристики компенсированного и некомпенсированного по температуре тепловых реле. В частности, стандартное время расцепления устанавливается соответствующим пусковым током, равным  $7,2 \times I_r$  (где  $I_r$  – уставка по току тепловой защиты), на основании чего вводится понятие класса расцепления или класса пуска (см. таблицу 2).

Таблица 2: Класс расцепления (классы пуска)

Класс расцепления	Время расцепления $T_i$ [с] для тока $7,2 \times I_r$	Время расцепления $T_i$ [с] для тока $7,2 \times I_r$ (графа E)
2	-	$T_i \leq 2$
3	-	$2 < T_i \leq 3$
5	$0,5 < T_i \leq 5$	$3 < T_i \leq 5$
10А	$2 < T_i \leq 10$	-
10	$4 < T_i \leq 10$	$5 < T_i \leq 10$
20	$6 < T_i \leq 20$	$10 < T_i \leq 20$
30	$0,5 < T_i \leq 30$	$20 < T_i \leq 30$
40	-	$30 < T_i \leq 40$

Значение терминов, используемых в этой таблице, может быть пояснено следующим образом.

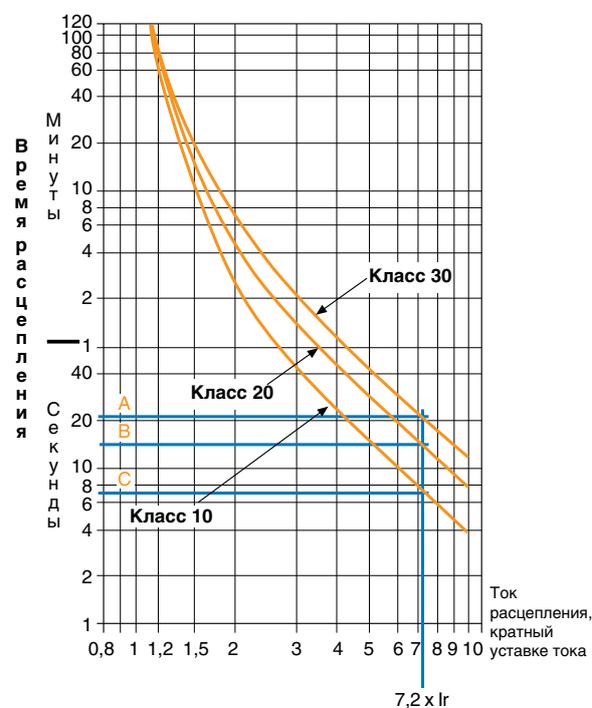
$I_r$  обычно совпадает с номинальным током двигателя  $I_e$ , значение  $7,2 \times I_r$  можно рассматривать как ток, который проходит через электродвигатель во время пуска.

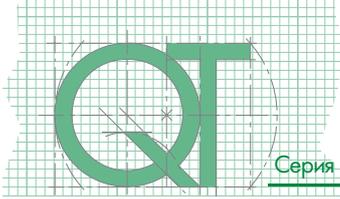
Наиболее часто применяют реле с классом расцепления: 10А, 10, 20 и 30, определяемым временем расцепления  $T_i$ , которое указано в средней колонке таблицы. Для электродвигателя, выполняющего пуск в нормальных условиях, применяют тепловые реле с классом расцепления 10А или 10, а в тяжелых условиях – с классом 20 или 30. В стандарт МЭК 60947-4-1 недавно были введены дополнительные классы расцепления и значения времени расцепления (указанные в таблице 2 (графа E)), которые характеризуются ограниченным диапазоном расцепления, связанным с увеличением минимального времени нерасцепления, но в Российском стандарте ГОСТ Р 50030.4.1 они не указаны. Пределы, установленные для параметра  $T_i$  (типичное время срабатывания устройства тепловой защиты), означают следующее:

- нижний предел представляет собой минимальное время, в течение которого реле не должно сработать и дать возможность выполнить пуск двигателя
- верхний предел представляет собой время, в течение которого реле должно обязательно сработать. Верхний предел определен для двигателей со стандартными характеристиками с таким расчетом, чтобы обмотки статора и двигатель в целом смогли выдержать тепловое воздействие пускового тока.

Чтобы лучше понять информацию, представленную в таблице, приведем численный пример. Предположим, что у нас есть двигатель для конкретной области применения, время пуска которого составляет 5 с. В этом случае выбор устройства тепловой защиты с классом расцепления 10А или 10 не будет считаться правильным, потому что срабатывание может произойти уже на второй или четвертой секунде. Поэтому необходимо выбрать реле класса 20, минимальное время расцепления которого составляет 6 с, что позволит выполнить пуск двигателя. На рисунке 4 показан типичный пример время-токовых характеристик теплового реле, учитывающих особенности пуска двигателя. По этим характеристикам можно установить соответствие между значениями времени расцепления, определяемыми параметром  $T_i$  и классами расцепления 10А, 10, 20 и 30, определенными для тепловых реле. Как видно из рисунка, для установленного стандартом значения тока  $7,2 \times I_r$  тепловое реле, с классом расцепления 30, сработает примерно через 23 с (поз. А), что согласуется с данными, приведенными в таблице 2.

Рисунок 4. Время-токовые характеристики тепловых реле с различными классами расцепления





Характеристики приводного механизма, тип двигателя и способ пуска являются факторами, влияющими на время пуска, а следовательно и на выбор устройства тепловой защиты. Рассматривая примеры из реальных областей применения, можно утверждать, что судовые гребные винты, компрессоры и центробежные насосы можно отнести к категории машин с нормальными условиями пуска. Это означает, что их приводной двигатель необходимо защищать тепловым реле с классом расцепления 10 или 10А. В то же время, например, вентиляторы, смесители и мельницы следует рассматривать как оборудование с тяжелыми условиями пуска. Приводной двигатель таких машин необходимо защищать тепловым реле с классом расцепления 30. Совершенно очевидно, что очень важно надлежащим образом определить рабочие условия. Это позволит правильно выбрать электродвигатель и устройства его защиты, чтобы получить оптимальные рабочие и защитные характеристики.

### 2.2.2 Координация типа 1 и 2

Стандарт определяет два типа координации компонентов пускателя с аппаратами защиты от короткого замыкания: тип 1 и тип 2.

**Координация типа 1.** В условиях короткого замыкания допускается повреждение контактора и теплового реле, в результате чего они могут оказаться непригодными для дальнейшей эксплуатации без ремонта и замены частей. При этом данные устройства не должны создавать опасности для людей и оборудования, например, вследствие вылета частей пускателя из оболочки.

**Координация типа 2.** В условиях короткого замыкания допускает сваривание контактов при условии, что они могут быть легко разъединены (например, отверткой) без заметной деформации. Контактор или пускатель не должны создавать опасности для людей и оборудования и должны оставаться пригодными для дальнейшей эксплуатации после восстановления нормальных условий.

Из определения двух типов координации можно сделать вывод, что координация типа 1 позволяет использовать устройства, рассчитанные на меньшие рабочие токи, обеспечивая таким образом экономию на первоначальных затратах и сокращение размеров устройств, но снижая при этом уровень безопасности и приводя впоследствии к расходам на техническое обслуживание и замену в случае возникновения неисправности. Координация типа 2 отвечает более высоким требованиям безопасности и имеет большие первоначальные расходы, которые могут быть компенсированы тем, что в случае возникновения неисправности эксплуатация коммутационного и защитного оборудования может быть продолжена без замены его частей.

## 3 Основные способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Независимо от предыдущей классификации пуск трехфазного асинхронного двигателя в тех случаях, когда не требуется изменять скорость вращения, можно различать по способу подачи напряжения на обмотки статора, который влияет на некоторые электрические и механические характеристики привода. Данные параметры имеют разную природу, приводят к получению разного пускового момента и оказывают достаточно сильное воздействие на электрическую машину. Теперь рассмотрим наиболее распространенные способы пуска.

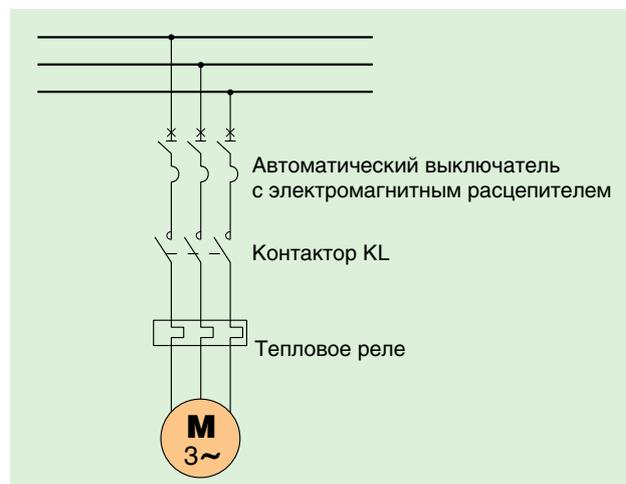
### 3.1 Прямой пуск

Прямой пуск является, пожалуй, наиболее распространенным способом пуска. Он заключается в непосредственном (т. е. прямом) подключении двигателя к питающей сети. Это означает, что пуск двигателя осуществляется при полном напряжении сети. Схема прямого пуска является наиболее простым, экономичным и чаще всего используемым решением пуска электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Схема прямого подключения к сети представлена на рисунке 5. Пуск осуществляется при полном напряжении и постоянной частоте сети. Электродвигатель развивает высокий пусковой момент при коротком времени разгона.

Типичные области применения – маломощные электродвигатели, в том числе с пуском при полной нагрузке.

Однако наряду с преимуществами имеются и определенные недостатки, например, бросок пускового тока, достигающий в первоначальный момент 10...12-кратного значения от номинального тока двигателя. Затем ток двигателя уменьшается примерно до 6...8-кратного значения номинального тока и будет держаться на этом уровне до тех пор, пока скорость двигателя не достигнет установившегося значения. Такое изменение тока оказывает значительное электродинамическое воздействие на кабель, подключенный к двигателю. Кроме того пусковой ток воздействует на обмотки двигателя. Высокий начальный пусковой момент может привести к значительному ускорению и, следовательно, к значительной нагрузке на элементы привода (ремни, крепления узлов), что вызывает сокращение их срока службы. И, наконец, следует принять во внимание возможное возникновение проблем, связанных с падением напряжения в линии питания двигателя, для другого оборудования.

Рисунок 5. Принципиальная схема прямого пуска



### 3.2 Пуск при пониженном напряжении

Принцип пуска при пониженном напряжении заключается в подключении двигателя непосредственно к электрической питающей сети таким образом, что в момент пуска на двигатель подается пониженное напряжение. Однако при этом происходит не только снижение пускового тока, но, к сожалению, и уменьшение пускового момента. Наиболее распространенными способами пуска при пониженном напряжении являются: с подключением реакторов или резисторов, переключением со звезды на треугольник, через автотрансформатор или с помощью устройства плавного пуска, которое согласует кривую вращающего момента электродвигателя с характеристикой нагрузки.

#### 3.2.1 Пуск переключением по схеме звезда/треугольник

Пуск переключением по схеме звезда/треугольник является самым известным способом и, возможно, самой распространенной схемой пуска на пониженном напряжении. С одной стороны, этот метод используется для снижения механических нагрузок и ограничения пускового тока, а с другой – обеспечивает уменьшение пускового момента. Такая возможность может быть реализована в электродвигателях с шестью входными зажимами, что позволяет питать двигатель от двух напряжений. Этот метод особенно подходит для ненагруженного пуска и пуска с низким постоянным или немного увеличивающимся вращающим моментом, например, для пуска вентиляторов или маломощных центробежных насосов. Схема пуска переключением по схеме звезда/треугольник представлена на рисунке 6. В начальный момент пуска обмотки статора соединяют звездой путем

замыкания контактов автоматического выключателя, линейного контактора КЛ и контактора КУ (соединение звездой). По истечении заданного времени контакты контактора КУ размыкаются и замыкаются контакты контактора КΔ (соединение треугольником). В результате выполняется переключение обмоток статора со схемы «звезда» на схему «треугольник». Обе схемы соединения обмоток являются схемами нормального рабочего режима. На разных этапах пуска двигателя через его обмотки протекают разные по значению токи. Как показано ниже значения этих токов ниже номинального тока двигателя.

Есть еще одна особенность. Тепловое реле обычно располагается на стороне нагрузки узла переключения звезда/треугольник и уставка этого реле должна быть ниже номинального тока двигателя. Следует иметь в виду, что тепловое реле, установленное в этом месте, чувствительно к третьей гармонике тока, появляющейся в сети вследствие насыщения магнитопроводов статора и ротора, и остается в замкнутом положении, когда обмотки статора соединены треугольником.

Теперь проанализируем различные этапы пуска:

#### Этап соединения обмоток звездой (Y)

Это начальный этап пуска. Обмотки статора соединены звездой и напряжение на них составляет  $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ . Ток в обмотке статора и в линии питания будет равен  $I_{MY} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_w}$ .

где  $Z_w$  – полное сопротивление обмотки.

Как было сказано ранее, данный этап пуска является этапом разгона двигателя и длится до тех пор, пока почти полностью не будет достигнута скорость установившегося режима. Слишком малая длительность данного этапа не позволит снизить механические напряжения в приводе и приводном механизме. Это означает, что эти механические напряжения сохранятся на последующем этапе – этапе соединения треугольником, в результате чего будут воспроизведены условия, аналогичные условиям прямого пуска.

#### Этап переключения

На этом этапе путем размыкания и замыкания контактов соответствующих контакторов производится переключение со звезды на треугольник. Важное значение имеет правильное определение длительности переключения, которая должна быть такой, чтобы, во-первых, успевала погаснуть электрическая дуга в контакторе «КУ», а во-вторых, не возникало короткое замыкание из-за преждевременного замыкания контактов контактора «КΔ». При этом слишком большая длительность переключения со схемы Y на

схему Δ может привести к потере скорости электродвигателя и вследствие этого – к возникновению высокого пика тока в момент соединения обмоток статора по схеме «треугольник».

Задержка переключения определяется аналоговым или цифровым таймером. Как показывает практика, типичное время переключения равно 50 мс. С помощью таймера также регулируется и продолжительность этапа соединения обмоток по схеме «звезда», т. е. длительность разгона или время пуска, которые, вообще говоря, могут рассматриваться как функция разности между средним вращающим моментом двигателя и средним моментом нагрузки на валу двигателя.

Для того чтобы воспользоваться преимуществами пуска двигателя переключением со схемы звезды на треугольник необходимо четко скоординировать по времени (с учетом направления вращения ротора) моменты переключения обмоток. Если коммутация производится в тот момент, когда остаточный магнитный поток ротора находится в противофазе с магнитным полем, создаваемым током статора, то через контакты контакторов потечет ток, значение которого может достигать 20-кратного значения номинального тока двигателя. Последствия недостаточно хорошего выбора моментов коммутации, отрицательно влияют на работоспособность как двигателя, так и контакторов, что может стать причиной ненадлежащей работы и непредсказуемого поведения двигателя.

#### Этап соединения обмоток треугольником (Δ)

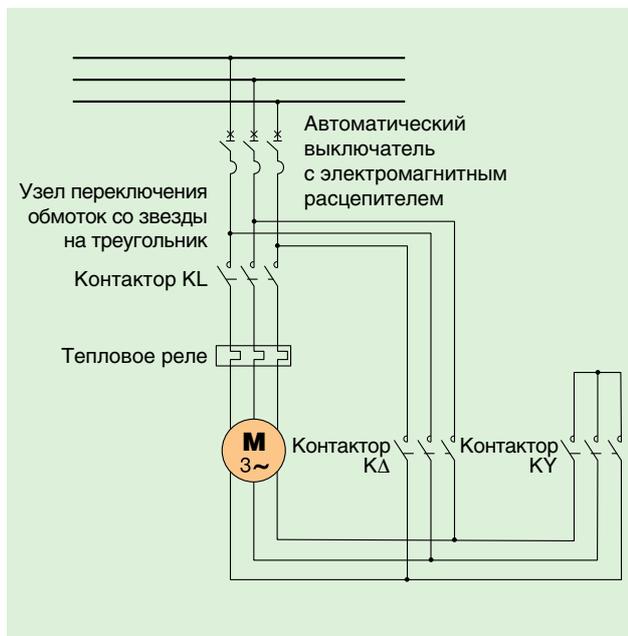
После завершения переключения осуществляется заключительный этап пуска. На этом этапе двигатель переходит в установившийся режим работы, в котором обмотки статора соединены по схеме треугольник и на них подается полное напряжение сети  $V_L$ . Двигатель развивает полный вращающий момент, при этом ток, протекающий через обмотки статора, равен:

$$I_{M\Delta} = \frac{V_L}{Z_w}$$

а потребляемый ток (номинальный ток  $I_e$  двигателя), равен:

$$I_{LM\Delta} = \frac{V_L}{Z_w} \times \sqrt{3}.$$

Рисунок 6. Принципиальная схема пуска двигателя переключением по схеме звезда/треугольник



Из анализа приведенных выше формул для тока и напряжения видно, что этап переключения обмоток со звезды на треугольник начинается при значении напряжения, равном 0,577 линейного напряжения  $V_L$ , а потребляемый ток (протекающий как в линии питания, так и в обмотках статора, соединенных звездой) в 0,33 раза меньше тока, который двигатель потреблял бы из сети в случае прямого пуска двигателя с обмотками, соединенными треугольником. На основании приведенных выражений для тока на этапе соединения обмоток звездой и линейного тока на этапе соединения обмоток тре-

угольником, можно сделать вывод, что  $I_{MY} = \frac{V_{LM\Delta}}{3}$ .

Известно, что при уменьшении потребляемого тока уменьшение возникающих электромагнитных сил происходит пропорционально, а при уменьшении напряжения уменьшение начального вращающего момента имеет квадратичную зависимость (т. е. момент уменьшается в три раза).

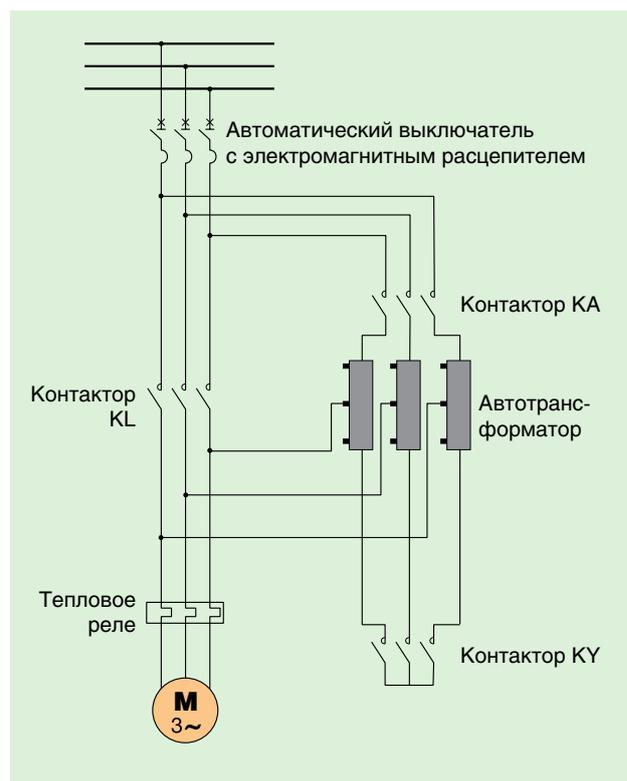
В отдельных исследованиях и технических статьях, касающихся пуска переключением обмоток со звезды на треугольник, такие явления как уменьшение падения сетевого напряжения, обусловленное уменьшение пускового тока (относительно прямого пуска), и уменьшение начального вращающего момента, который при прямом пуске может привести к повреждению узлов приводного механизма, часто не рассматриваются как достоинства и пуск переключением со звезды на треугольник не счита-

ется хорошим способом пуска. Тем не менее, такой способ часто используется на практике во многих областях промышленного применения асинхронных двигателей.

### 3.2.2 Автотрансформаторный пуск

Уменьшение напряжения на зажимах двигателя выполняется с помощью нерегулируемых автотрансформаторов или более дорогих многовыводных автотрансформаторов или даже с помощью трансформаторов с плавным регулированием напряжения. Во время пуска через автотрансформатор (см. рисунок 7) двигатель подсоединен к одному ответвлению автотрансформатора (контакты автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем и контакторов КА и КУ замкнуты), благодаря чему сетевое напряжение на зажимах двигателя уменьшается в  $k$  раз. Во столько же раз уменьшается и ток, потребляемый двигателем, по отношению к току, который он потреблял бы при прямом пуске при полном номинальном напряжении. В результате ток в первичной обмотке автотрансформатора, и, следовательно, в линии питания, сокращается в  $k^2$  раз. Следовательно, наряду со снижением напряжения в  $k$  раз, также обеспечивается уменьшение пускового вращающего момента в  $k^2$  раз по сравнению с пуском при полном напряжении.

Рисунок 7. Принципиальная схема автотрансформаторного пуска

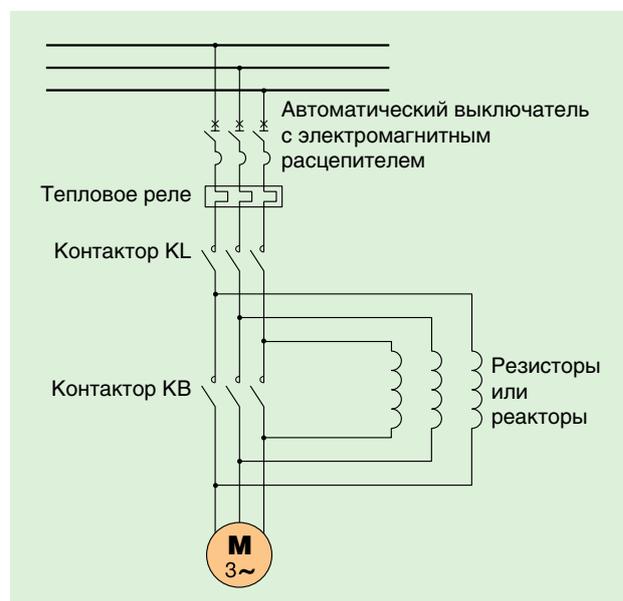


Как только скорость двигателя достигнет примерно 80–90% скорости установившегося режима, контакты контактора КУ размыкаются и на двигатель продолжает подаваться пониженное напряжение, индуцируемое в обмотках автотрансформатора. В этот момент контактор KL замкнут, а контактор КА разомкнут, благодаря чему питание подается к двигателю непосредственно от сети. Пуск через автотрансформатор считается достаточно дорогим решением по сравнению с пуском переключением по схеме звезда – треугольник, и применяется для пуска электродвигателей с короткозамкнутым ротором, средней или высокой мощности, применяемых для привода механизмов с большим моментом инерции.

### 3.2.3 Реостатный пуск

Этот способ, схема которого показана на рисунке 8, также предназначен для пуска двигателей с короткозамкнутым ротором. При использовании такого способа пуска падение напряжения происходит в реакторах или резисторах, включенных на время пуска последовательно с обмотками статора (контакты KL замкнуты, KB разомкнуты). Напряжение на зажимах двигателя в начальный период пуска уменьшено в  $k$  раз по сравнению с сетевым напряжением. Соответственно вращающий момент уменьшается в  $k^2$  раз. Пусковой ток ограничивается на уровне, соответствующем примерно половине тока при пуске двигателя на полном напряжении. По окончании разгона реакторы или резисторы закорачиваются замыканием контактов KB, после чего на зажимы двигателя подается полное напряжение. Возможно также ступенчатое (с выдержкой времени) закорачивание реакторов или резисторов. Этот способ имеет некоторые недостатки, проявляемые в период пуска, например, приводит к значительному падению коэффициента мощности, поскольку реакторы имеют большое индуктивное сопротивление или к большим потерям мощности, рассеиваемой в резисторах. Такой способ пуска используется в приводе машин с большим моментом инерции и не требующих высоких значений вращающего момента и тока при пуске.

Рисунок 8. Принципиальная схема реостатного пуска

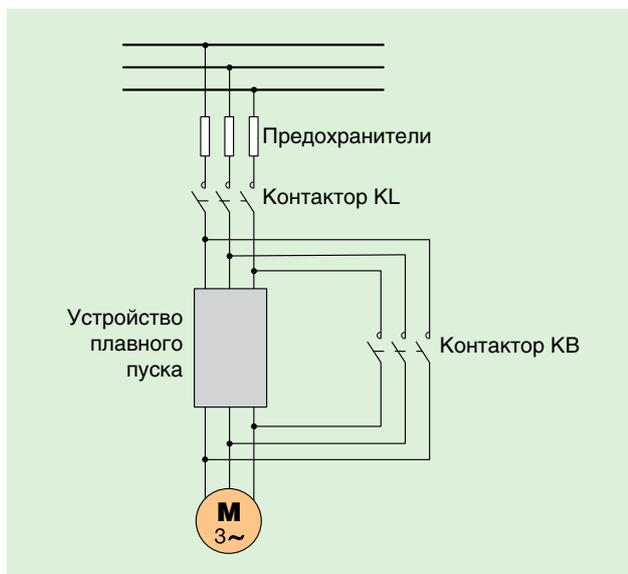


### 3.2.4 Плавный пуск

Современный способ пуска, требующий довольно высоких первоначальных затрат, основан на использовании электронных пускателей, обычно называемых устройствами плавного пуска. Применение такого устройства, показано на рисунке 9. Устройство плавного пуска позволяет ограничить пусковой ток, ограничить вращающий момент и выполнить пуск за заданное время. В результате обеспечивается очень плавное нарастание напряжения на зажимах двигателя в течение времени пуска, и удастся избежать сверхтоков и бросков токов, а также больших механических напряжений, характерных для прямого пуска и пуска переключением со звезды на треугольник. Устройства плавного пуска, как правило, состоят из двух частей: силового блока и блока управления. Основными компонентами силового блока являются радиатор и тиристоры, которые управляются с помощью цифровой, как правило, микропроцессорной системы, реализованной на плате управления. Обычно используется «последовательная» схема, представленная на рисунке 9. Предохранители можно заменить автоматическими выключателями, но следует помнить, что автоматический выключатель не обеспечивает защиту тиристоров при возникновении неисправности. Кроме того, если в устройстве

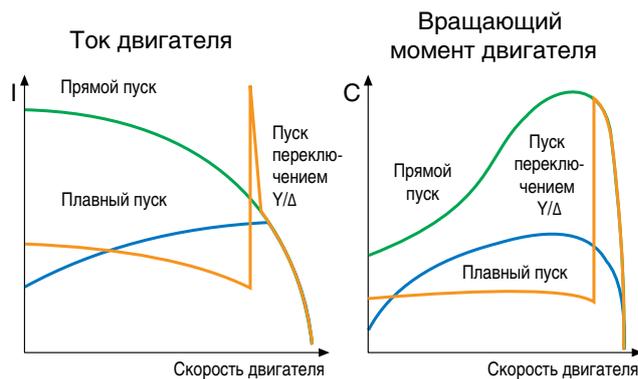
плавного пуска не реализована тепловая защита, то потребуется внешнее тепловое реле, которое лучше всего включить на стороне питания шунтирующего контактора КВ. Схему плавного пуска можно применять как часть схемы пуска переключением со звезды на треугольник, в которой схема плавного пуска заменяет пускатель, переключающий схему на треугольник. На начальном этапе пуска контакты КЛ замкнуты, а КВ разомкнуты, благодаря чему устройство плавного пуска может контролировать процесс пуска. По завершении разгона контакты КВ замыкаются. Силовой блок в устройстве плавного пуска перестает работать, а блок управления остается активным.

Рисунок 9. Принципиальная схема плавного пуска



На рисунке 10 показаны типичные кривые пусковых токов и вращающих моментов электродвигателя для прямого пуска, плавного пуска и пуска переключением со звезды на треугольник. Из рассмотрения кривых видно, что при прямом пуске электроустановка подвергается самому сильному воздействию пускового тока и при этом создается самый большой пусковой момент. Способ пуска переключением со звезды на треугольник позволяет уменьшить пусковой ток, но в момент переключения со звезды на треугольник возникают очень высокий бросок тока. При этом в начальный момент пуска создается достаточно небольшой вращающий момент. Самым благоприятным для производственного агрегата (т. е. для двигателя, передаточного и приводного механизма) бесспорно, является плавный пуск.

Рисунок 10. Кривые тока и вращающего момента двигателя для различных методов пуска



## 4 Координация аппаратов АББ

### 4.1 Теоретические аспекты координации аппаратов

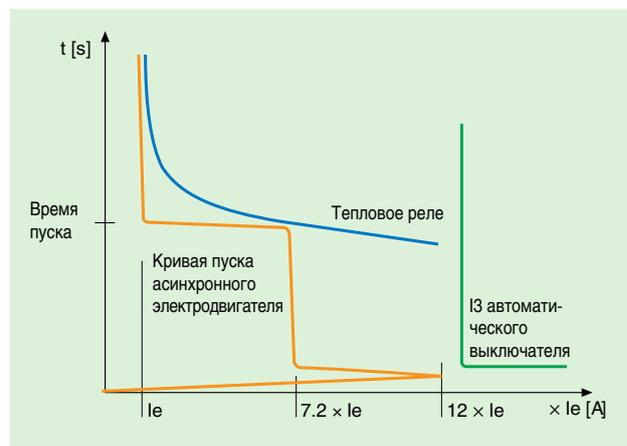
Поведение трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором описывается несколькими важными параметрами:

- номинальный ток  $I_n$ , связанный с номинальной мощностью  $P_n$  через номинальный КПД и коэффициент мощности. В стандарте ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1) приведена таблица, в которой отражена зависимость номинальной рабочей мощности двигателя от номинального рабочего тока при разных напряжениях электроустановки. Указанные значения номинального тока определены для 4-полюсного двигателя с короткозамкнутым ротором при 400 В, 1500 об/мин и 50 Гц. Номинальный рабочий ток для других напряжений рассчитывается на основе этих значений;
- ударный пусковой ток  $I_{sp}$ , равный примерно  $12 \times I_n$ ; представляет собой максимальный ток, потребляемый электродвигателем в первый момент подачи питания;
- пусковой ток  $I_{avv}$ , который в соответствии со стандартом ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1) принимается равным примерно  $7,2 \times I_n$ ; представляет собой ток, потребляемый двигателем в течение всего времени пуска.

Указанные параметры представлены на рисунке 11. Они влияют на координацию аппаратов следующим образом:

- **ударный пусковой ток  $I_{sp}$**  определяет выбор аппарата защиты, который должен иметь характеристику срабатывания электромагнитного расцепителя, не прерывающую начальный этап пуска. Кроме того, автоматический выключатель должен иметь отключающую способность, обеспечивающую отключение тока короткого замыкания при требуемом напряжении электроустановки;
- **пусковой ток  $I_{avv}$**  и время пуска позволяют определить тип тепловой защиты, подходящий для требуемого типового режима работы. Кроме того, диапазон настроек реле должен быть рассчитан на номинальный ток двигателя.

Рисунок 11. Время-токовые характеристики для пуска двигателя, параметры теплового реле и электромагнитного расцепителя



Тепловое реле и контактор необходимо выбирать с учетом указанных параметров. Кроме того, их следует скоординировать с аппаратом защиты от короткого замыкания, таким образом, чтобы обеспечивалась надежная защита от короткого замыкания, соответствующая требованиям стандарта к координации типа 2.

#### 4.1.1 Используемые на практике аппараты и их комбинации

Компания АББ предлагает скоординированные решения по применению комбинации автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем, контактора и внешнего теплового реле. Ниже приводится описание этих аппаратов:

##### – автоматический выключатель с электромагнитным расцепителем

Имеет более высокий ток срабатывания электромагнитного расцепителя I<sub>3</sub> (достигающий  $13 \times I_n$ ) по сравнению с автоматическим выключателем с термомангнитным расцепителем (только до  $10 \times I_n$ ). Применение автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем позволяет исключить возможное срабатывание расцепителя при очень большом токе в начальный момент пуска двигателя. В противном случае пришлось бы применить автоматический выключатель большего типоразмера. В качестве автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем можно применять автоматические выключатели в литом корпусе серии Tmax или автоматические выключатели серии MO, представленные на рисунке 12.

Рисунок 12. Автоматические выключатели с электромагнитным расцепителем



#### – контактор

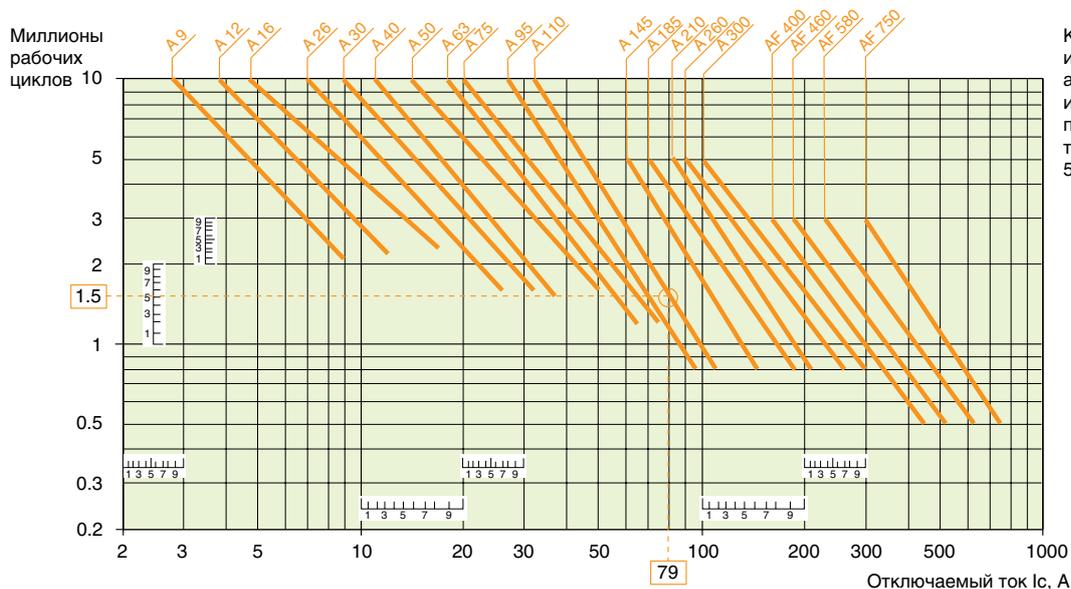
Представляет собой устройство (см. рисунок 13), предназначенное для включения и отключения двигателя при нормальных условиях, а также для отключения двигателя при срабатывании теплового реле вследствие воздействия тока перегрузки. Кроме того, контактор должен проводить номинальный ток двигателя, соответствующий категории применения АС-3. Контактор, соответствующий указанным требованиям, может выполнить гораздо больше коммутационных циклов по сравнению с автоматическим выключателем.

Как правило, коммутационная износостойкость контактора больше коммутационной износостойкости автоматического выключателя. Коммутационную износостойкость контактора можно определить с помощью графиков, предоставляемых изготовителем и действительных для указанных условий применения. Так, например, по графику, представленному на рисунке 14, можно определить, что для контактора А110, который будет коммутировать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, с отключаемым током  $I_c$ , равным 79 А при напряжении 400 В перем. тока, число коммутационных циклов, выполняемых в течение всего срока службы составляет около 1,5 млн.

Рисунок 13. Контактор



Рисунок 14. График коммутационной износостойкости контакторов для категории применения АС-3, напряжения менее 440 В и температуры окружающей среды менее 55 °С



Коммутационная износостойкость аппаратов **AF1350** и **AF1650** при номинальном токе составляет 5000 циклов

### – тепловое реле

Представляет собой устройство, предназначенное для защиты двигателя от перегрузки. Такое реле обесточивает цепь управления контактора, как правило, при значении тока перегрузки ниже тока срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя.

Конструктивно тепловое реле выполнено в виде внешнего устройства с биметаллическими пластинами или представляет собой электронное реле. Тепловое реле присоединяют к контактору. Оно выполняет функцию защиты двигателя от перегрузки, характеристики которой в части компенсации по температуре окружающего воздуха и чувствительности к обрыву фазы соответствуют стандарту ГОСТ Р 50030.4.1 (МЭК 60947-4-1).

Помимо этого могут применяться более сложные устройства с более интеллектуальными функциями защиты и управления, в том числе и для дистанционного управления. К таким устройствам относятся, например, УМС. Некоторые из применяемых тепловых реле представлены на рисунке 15.

Рисунок 15. Тепловые реле



Комбинирование трех аппаратов, соединяемых, как показано на рисунке 16, и применение ранее описанных принципов, позволяют получить компактное решение, полностью отвечающее основным требованиям с точки зрения габаритных размеров и учитывающее пусковую характеристику двигателя, коммутационную износостойкость и характеристики защиты.

Рисунок 16. Компактное решение с использованием автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем, контактора и теплового реле



Представленная выше комбинация охватывает большую часть областей управления трехфазным асинхронным двигателем. Тем не менее, можно применять и другие комбинации, например:

### – решение с использованием выключателя-разъединителя и предохранителей

Комбинация этих устройств, см. рисунок 17, используется для замены автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем.

**Рисунок 17.** Комбинация выключателя-разъединителя с предохранителями



– решение на базе автоматического выключателя с тепловым и электромагнитным расцепителями

В данном решении защита двигателя выполняется с помощью теплового и электромагнитного расцепителя автоматического выключателя. Для указанных целей используют автоматический выключатель

в литом корпусе серии Tmax с электронным расцепителем типа PR222MP, который предназначен специально для защиты двигателей. Таким образом, используя одно устройство, можно реализовать защиту от короткого замыкания и от перегрузки, чувствительную к обрыву фазы и обеспечивающую компенсацию по температуре окружающей среды. Объединив такой автоматический выключатель с контактором, предназначенным для коммутации двигателя, можно получить исключительно компактный пускатель. В то же время, если взять стандартный (предназначенный для распределительных сетей) автоматический выключатель с термомагнитным расцепителем, то его защитная характеристика, как правило, не подойдет для защиты двигателя от перегрузки и короткого замыкания. Как объясняется далее, расцепители, используемые для защиты двигателя, позволяют помимо непосредственно защиты, предотвращать последствия аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе работы двигателя.

Более простое исполнение расцепителя PR222MP, обеспечивающее только защиту от перегрузки и от короткого замыкания, реализовано в расцепителе PR221MP, устанавливаемого в автоматический выключатель Tmax типа T2. В результате с помо-

**Рисунок 18.** Примеры функциональных и компактных решений



щью автоматического выключателя в литом корпусе с встроенной непосредственно в автоматический выключатель и соответствующей классам 3E, 5E, 10E и 20E, защитой от перегрузки и от короткого замыкания, можно обеспечить защиту двигателей с относительно небольшим номинальным током. Такое же решение, интегрированное в автоматический выключатель, обеспечивающее защиту от короткого замыкания и от перегрузки, чувствительную к обрыву фазы и компенсированную по температуре окружающей среды, можно получить с помощью автоматических выключателей с термомагнитным расцепителем серии MS.

В случае применения указанных автоматических выключателей внешнее тепловое реле не требуется, но контактор, разумеется, нужен. На рисунке 18 показано, насколько компактные решения можно получить при использовании автоматического выключателя в литом корпусе с расцепителем PR222MP, или при использовании соединенного с коммутационным аппаратом автоматического выключателя с термомагнитным расцепителем.

Далее приведены описания функций защиты, выполняемых расцепителем PR222MP в дополнение к стандартным функциям: защита от перегрузки (L), реализуемая по тепловой модели двигателя, имитирующей повышение температуры медных и стальных частей электродвигателя, и защита от короткого замыкания (I).

#### Защита от заклинивания ротора (R):

Защищает двигатель от возможного заклинивания ротора в процессе нормальной работы. Данная функция различает, возникла ли неисправность во время пуска, то есть когда эта функция отключена, или во время нормальной работы, т.е. когда она активна. Время можно задать в диапазоне от 1 до 10 с, а ток – в диапазоне 3-10-кратного тока  $I_1$ . Срабатывание происходит в том случае, если ток превышает заданное значение хотя бы в одной из фаз. При необходимости данная защита может быть отключена.

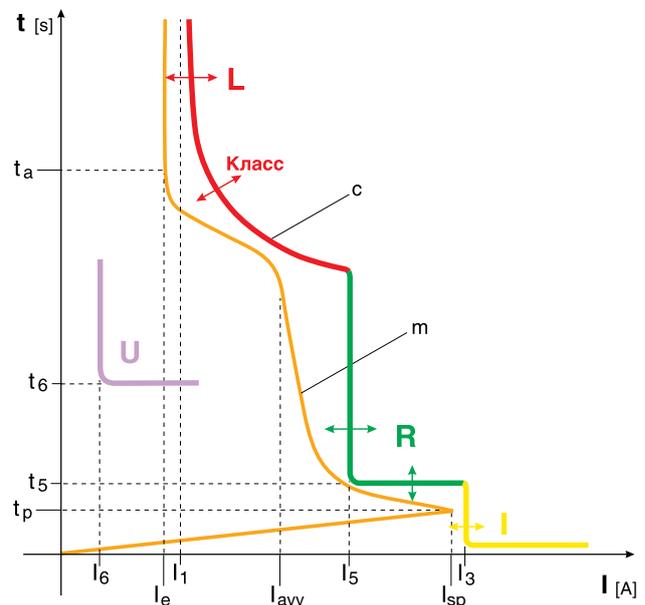
#### Защита от небаланса напряжений (U):

Срабатывает в том случае, если значение тока в одной или двух фазах падает ниже заданного и остается на этом уровне дольше заданного времени. Ручная настройка имеет фиксированный предел тока, равный  $0,4 \times I_1$ , и фиксированный предел времени в 4 с, тогда как в случае электронной настройки предел тока регулируется в диапазоне от 0,4 до  $0,9 \times I_1$ , предел времени – от 1 до 10 с. При необходимости данная функция может быть отключена.

#### Защита с помощью датчика с положительным температурным коэффициентом (PTC – термистор (Positive Temperature Coefficient))

Защищает от превышения температуры выше допустимого для двигателя значения.

На следующей схеме показана время-токовая характеристика защитной функции расцепителя PR222MP, относительно типичной кривой пуска двигателя.



- $I_1$  = ток расцепления для функции L
  - $I_3$  = ток расцепления для функции I
  - $I_5$  = ток расцепления для функции R
  - $t_5$  = время расцепления для функции R
  - $t_6$  = ток расцепления для функции U
  - $t_a$  = время расцепления для функции U
  - $I_e$  = номинальный рабочий ток двигателя
  - $I_{avv}$  = пусковой ток двигателя
  - $I_{sp}$  = ударный пусковой ток
  - $t_a$  = время пуска двигателя
  - $t_p$  = длительность ударного пускового тока
  - $m$  = типичная пусковая характеристика двигателя
  - $c$  = пример характеристики расцепления автоматического выключателя с электронным расцепителем, используемого для защиты двигателя
- Кривые функций защиты, различные предельные значения и временные параметры позволяют вывести общую характеристику расцепления, которая максимально полно соответствует пусковой характеристике двигателя, и таким образом оптимизировать его защиту.

**– решение на основе воздушного автоматического выключателя серии Emax**

Все описанные выше функции, выполняемые обычно тремя разными аппаратами, можно реализовать с помощью одного автоматического выключателя. Такое решение используется в тех случаях, когда не требуется большое число оперативных включений и отключений, например, при управлении и защите мощных двигателей (более 300 кВт), или в специальных случаях применения.

**– решения на основе устройств плавного пуска**

Устройства плавного пуска с помощью мощных полупроводниковых приборов (тиристоров) плавно увеличивают напряжение на зажимах двигателя, выполняя его плавный пуск и ограничение пускового тока.

По истечении времени разгона тиристоры, как правило, шунтируются контактором, и двигатель напрямую соединяется с линией питания. Это означает, что тиристоры работают только в период пуска двигателя, в результате чего исключается их перегрев и уменьшается тепловое воздействие на оборудование в НКУ. Устройства плавного пуска нескольких типов представлены на рисунке 19.

*Рисунок 19. Устройства плавного пуска*



#### 4.1.2 Специальные функции защиты и управления

##### – Защита от замыкания на землю

В дополнение к стандартным функциям защиты электродвигателя от перегрузки и короткого замыкания часто требуется защита по дифференциальному току, позволяющая своевременно обнаружить токи утечки и защитить двигатель от начавшегося процесса ухудшения изоляции, который в итоге своего развития может привести к перегреву двигателя и короткому замыканию. Таким образом, исключается повреждение электродвигателя. Данную защиту можно реализовать с помощью внешнего устройства, использующего для обнаружения дифференциального тока тороидальный трансформатор. Применение только устройства дифференциального тока является недостаточным, поскольку электродвигатель необходимо обязательно защищать и от короткого замыкания, что в нашем случае и выполняется автоматическим выключателем. Обычно схему управления строят таким образом, что устройство дифференциального тока размыкает цепь управления контактора, который в свою очередь отключает электродвигатель. Можно организовать отключение по-другому – устройство дифференциального тока своим контактом включает независимый расцепитель автоматического выключателя, который отключает питание.

**Таблица 3.** Типы автоматических выключателей серии MO, номинальный ток  $I_n$ , отключающая способность  $I_{cu}$  при 400 В перем. тока. Типы ручных пускателей серии MS, номинальный ток  $I_n$ , отключающая способность  $I_{cu}$  при 400 В перем. тока, класс расцепления (см. таблицу)

Автоматический выключатель «mcb» с электромагнитным расцепителем		
Тип	$I_n$ [A]	$I_{cu}$ при 400 В пер. тока [кА]
MO132	0,4–32	до 100
MO450	16–50	50
MO495	40–100	50
MO496	16–100	100

Автоматический выключатель «mms» с термомангнитным расцепителем			
Тип	$I_n$ [A]	$I_{cu}$ при 400 В пер. тока [кА]	Класс расцепления
MS116	0,16–16	50*	10
MS132	0,16–32	100***	10
MS450	16–50	50	10
MS451	16–50	50	20
MS495	40–100	50	10
MS496	40–100	100	20
MS497	16–100	100	10

\*  $I_n12 I_{cu} = 25$  кА  $I_n16 I_{cu}=16$  кА

\*\*\*  $I_n = 10$  А  $I_{cu} = 100$  кА;  $I_n = 25$  А  $I_{cu} = 50$  кА;  $I_n = 32$  А  $I_{cu} = 25$  кА

##### – Регулирование скорости

В некоторых областях применения, например, в автоматизации, используются более сложное управление двигателями, требующее применения частотно-регулируемых приводов (инверторов), что позволяет плавно изменять частоту питающего напряжения в зависимости от нагрузки (например, для того, чтобы управлять нагрузкой насоса, не прибегая к стандартной системе с редукционным клапаном). Инверторы дают возможность, во-первых, управлять и контролировать процесс по электрическим и механическим параметрам привода и приводного механизма, а во-вторых экономить от 20 до 50% электроэнергии. Компания АББ поставляет широкий ассортимент преобразователей частоты для промышленного применения. Полупроводниковые преобразователи изготавливаются с применением самых передовых технологий, что обеспечивает создание высоконадежных систем, отличающихся высокой эффективностью и низкими требованиями к техническому обслуживанию.

#### 4.1.3 Координация аппаратов АББ

В данном разделе собрана информация о некоторых основных аппаратах<sup>1</sup>. Их характеристики и сведения по координации представлены в таблицах, составленных АББ SACE. Учтены наиболее распространенные и типичные требования, предъявляемые к системам пуска. С более полными и подробными характеристиками и обзором различных аппаратов можно ознакомиться в соответствующих каталогах.

##### Автоматические выключатели

Автоматические выключатели, используемые для защиты двигателей, представлены двумя группами: автоматические выключатели (MO... MS...) и автоматические выключатели в литом корпусе (Tmax). Их основные характеристики приведены в таблицах 3 и 4 соответственно. Автоматические выключатели, как правило, четырехполюсного исполнения могут оснащаться термомангнитными или электромагнитными, или электронными расцепителями. Типы электронных расцепителей, используемых с автоматическими выключателями в литом корпусе, приведены в таблице 5.

<sup>1</sup> В данном разделе приводится описание продукции, доступной на рынке на момент публикации данного документа. При последующем обновлении ассортимента продукции соответствующие изменения будут внесены в каталоги продукции.

Таблица 4. Автоматические выключатели в литом корпусе серии Tmax – доступные исполнения, данные по отключающей способности [кА] и возможности установки электронных расцепителей для защиты электродвигателей

Автоматические выключатели в литом корпусе серии Tmax																								
	T2				T3		T4					T5					T6				T7			
Iu [A]	160				250		250 / 320					400 / 630					630 / 800				800 / 1000 / 1250			
Исполнение	N	S	H	L	N	S	N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V
415 В пер. тока	36	50	70	85	36	50	36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
440 В пер. тока	30	45	55	75	25	40	30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
500 В пер. тока	25	30	36	50	20	30	25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	40	50	85	100
690 В пер. тока	6	7	8	10	5	8	20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
MF			■																					
MA			■			■			■															
PR221DS-I			■						■					■					■					
PR231DS-I																						■		
PR222MP									■					■					■					
PR221MP			■																					

Таблица 5. Автоматические выключатели в литом корпусе серии Tmax, доступные электронные расцепители, уставки электромагнитных расцепителей

T2...160												
Электромагнитный расцепитель с нерегулируемой уставкой MF	In [A]	1	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,5	8,5	11	12,5
	I <sub>3</sub> =13×In	13	21	26	33	42	52	65	84	110	145	163
Электромагнитный расцепитель с регулируемой уставкой MA	In [A]	20	32	52	80	100						
	I <sub>3</sub> =(6...12)×In	120...240	192...384	314...624	480...960	600...1200						
Электронный расцепитель PR221MP, функции L-I*	In [A]	63	100	160								

\* I<sub>1</sub>=(0,65...1)×In I<sub>3</sub>=(2,5...17,5)×In

T3...250					
Электромагнитный расцепитель с регулируемой уставкой MA	In [A]	100	125	160	200
	I <sub>3</sub> =(6...12)×In	600...1200	750...1500	960...1920	1200...2400

T4...250									
Электромагнитный расцепитель с регулируемой уставкой MA	In [A]	10	25	52	80	100	125	160	200
	I <sub>3</sub> =(6...14)×In	60...140	150...350	314...728	480...1120	600...1400	750...1750	960...2240	1200...2800

Электронный расцепитель PR221DS-I*	In [A]				
	T2...160	10	25	63	100
T4...250	100	160	250		
T4...320	320				
T5...400	320	400			
T5...630	630				
T6...630	630				
T6...800	800				

\* I<sub>3</sub>=(1...10)×In

Электронный расцепитель PR222MP*	In [A]		
T4...250	100	160	200
T5...400	320	400	
T6...800	630		

\* I<sub>1</sub>=(0,4...1)×In I<sub>3</sub>=(6...13)×In; наличие специальных функций защиты R и U

Электронный расцепитель PR231DS-I*	In [A]
T7...800	800
T7...1000	1000
T7...1250	1250

\* I<sub>3</sub>=(1...12)×In

### Контакторы

Компания АББ предлагает контакторы различных типов. Наиболее часто для коммутации трехфазных асинхронных двигателей применяются трехполюсные контакторы серий «А» и «АF» типоразмеров от А9 до АF1650. Основные характеристики этих контакторов приведены в таблице 6. Данные трехполюсные аппараты с электромагнитами переменного тока и шихтованным магнитным сердечником (в контакторах типа «А») или с электромагнитом переменного / постоянного тока и встроенным преобразователем, что позволяет подавать на электромагнит напряжение в широком диапазоне (в контакторах типа «АF»). Кроме того, поставляется широкий ассортимент дополнительных аксессуаров, устанавливаемых сбоку или на фронтальной части контактора.

### Тепловые реле

Компания АББ предлагает тепловые реле различных типов: от традиционных с биметаллическими пластинами («ТА...DU...» и «ТА...SU...») до электронных («Е...DU...»). Основные характеристики тепловых реле приведены в таблице 7. Реле в трехполюсном исполнении чувствительны к обрыву фазы, компенсированы по температуре окружающей среды. Их можно автоматически возвращать в рабочее состояние, а также оснастить вспомогательными контактами.

Кроме того, доступны и более сложные реле, например, УМС, которые по сравнению с традиционными тепловыми реле обеспечивают более полный набор функций защиты: они гораздо эффективнее благодаря контролю большего числа параметров, широкому диапазону настроек, возможности выбора защиты, наиболее подходящей для определенных условий пуска, характеризуются низким потребляемым током, высокой точностью срабатывания и возможностью интеграции в системы диспетчерского управления и контроля.

### Выключатели-разъединители с предохранителями

Комбинация выключателя-разъединителя с предохранителями используется в качестве коммутационного аппарата и устройства защиты в соответствии с таблицей 8. Данные комбинации представлены серией OS на токи от 32 до 1250 А. В указанных аппаратах применяются предохранители для защиты от короткого замыкания и перегрузки. Аппараты удовлетворяют всем требованиям безопасности, характеризуются простотой монтажа и функциональностью и компактными размерами.

Таблица 6. Контакторы серии А и АF. Основные электрические характеристики

	A9	A12	A16	A26	A30	A40	A45	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A210	A260	A300	AF400	AF460	AF580	AF750	AF1350	AF1650
Макс. ном. рабочее напряжение $U_{max}$	690 В пер. тока						1000 В пер. тока						690 В пер. тока										
Макс. ном. рабочий ток $I_e$ 415 В пер. тока* [А]	9	12	17	26	32	37	37	50	65	75	96	110	145	185	210	260	300	400	460	580	750	860	1050
Макс. ном. рабочий ток $I_e$ 690 В пер. тока* [А]	7	9	10	17	21	25	25	35	43	46	65	82	120	170	210	220	280	350	400	500	650	800	950
$I_{cw}$ , 1 с** [А]	250	280	300	400	600	600	1000	1000	1000	1000	1320	1320	1800	2000	2500	3500	3500	4600	4600	7000	7000	10000	12000
$I_{cw}$ , 10 с** [А]	100	120	140	210	400	400	650	650	650	650	800	800	1200	1500	1700	2400	2400	4400	4400	6400	6400	8000	10000
$I_{cw}$ , 30 с** [А]	60	70	80	110	225	225	370	370	370	370	500	500	800	1000	1200	1500	1500	3100	3100	4500	4500	6000	7500
$I_{cw}$ , 60 с** [А]	50	55	60	90	150	150	250	250	250	250	350	350	600	800	1000	1100	1100	2500	2500	3500	3500	4500	5500
$P_{dl}$ 440 В пер. тока*** [А]	250	250	250	420	820	820	820	1300	1300	1300	1160	1160	1500	2000	2300	2600	3000	4000	5000	6000	7500	10000	12000
$P_{dl}$ 690 В пер. тока*** [А]	90	90	90	170	340	340	490	630	630	630	800	800	1200	1600	2000	2400	2500	3500	4500	5000	7000	-	-

\* категория применения АС-3 при Токр.ср. < 55 °С  
 \*\* относится к Токр.ср. = 40 °С, пуск из холодного состояния  
 \*\*\* макс. отключающая способность ( $\cos\phi = 0,45$ ,  $\cos\phi = 0,35$  для  $I_e > 100$  А)

Таблица 7. Тепловые реле с биметаллическими пластинами и тепловые электронные реле, диапазон уставок, возможность подключения контакторов

	TA25DU..*	TA42DU..	TA75DU..	TA80DU..	TA110DU..	TA200DU..	TA450DU..	TA450SU..
Класс расцепления	10А							
	20				-	-	-	-
Малый диапазон уставок* [А]	0,1–0,16	18–25	18–25	29–42	65–90	66–90	130–185	40–60
Большой диапазон уставок [А]	24–32	29–42	60–80	60–80	80–110	150–200	220–315	220–310
Непосредственная установка вместе с	A9...A40	A30, A40	A50...A75	A95, A110		A145, A185	A210, A300	

\*) In класса 20, начиная с типа TA25DU1.8, диапазон уставок от 1,3 до 1,8 А

	E16DU	E45DU **	E80DU **	E140DU **	E200DU	E320DU	E500DU	E800DU	E1250DU
Класс расцепления	10–20–30 *		10 или 10–20–30		10–20–30***				
	Малый диапазон уставок* [А]	0,1–0,32	9–30	27–80	50–140	60–200	100–320	150–500	250–800
Большой диапазон уставок [А]	5,7–18,9	15–45							
Непосредственная установка вместе с	A9...A16	A26...A40	A50...A75	A95, A110	A145, A185	A210...A300	AF400, AF460	AF580, AF750	AF1350, AF1650

\*) каждый класс расцепления определяется соответствующим кодом заказа  
 \*\*) устройства с классом расцепления 10 и с изменяемым классом (10–20–30) имеют различные коды заказа  
 \*\*\*) для этого же устройства доступен и настраиваемый класс расцепления

### Устройства плавного пуска (УПП)

Компания АББ предлагает устройства плавного пуска четырех типов на номинальные токи от 3 до 1050 А и напряжение до 600 В АС при непосредственном подключении к сети. Основные характеристики кратко представлены в последующем описании и в таблице 9:

– PSR3...45: серия устройств плавного пуска двигателей на номинальные токи от 3 до 45 А и напряжение 400 В АС при непосредственном подключении к сети. Устройства имеют очень компактную конструкцию, легко крепятся на DIN-рейке или на монтажную плату. Устройства данной серии координируются с пускателями типа MS и имеют гибкий коммуникационный интерфейс.

– PSS18...300: серия устройств плавного пуска двигателей с номинальным током от 18 до 300 А, напряжением до 690 В АС при непосредственном подключении к сети. Благодаря высокой надежности и функциональной гибкости данные устройства можно применять в различных областях, в том числе и в самых тяжелых условиях эксплуатации.

– PSE 18...370: серия устройств плавного пуска двигателей с номинальным током от 18 до 370 А, напряжением до 600 В АС. Первые в мире компактные УПП, оснащенные всеми необходимыми функциями для эффективного управления и защиты электродвигателей независимо от области применения.

– PST30...300 и PSTB370...1050: серия устройств плавного пуска для двигателей на номинальные токи от 30 до 1050 А и напряжение до 690 В АС при непосредственном подключении к сети. Серия характеризуется наличием большого числа интеллектуальных встроенных функций (например, защита от заклинивания ротора, небаланса токов, неправильного чередования фаз). Одно и то же устройство можно подключить «в линию» или «внутри треугольника» (в этом случае максимальный ток двигателя составляет 1810 А). Устройство имеет гибкий коммуникационный интерфейс, а значения параметров легко считываются с простого ЖК-дисплея.

Таблица 8. Выключатели-разъединители с предохранителями, подбор параметров

Тип выключателя-разъединителя с предохранителями			OS Mini	OS	OS	OS	OS	OS	OS	OS	OS	OS	OS
			40	32G	63G	125G	160G	200	250	400	630	800	1250
Номинальный рабочий ток, АС-23А	690 В	А	40	32	63	125	160	200	250	400	630	800	1000
Номинальная рабочая мощность, АС-23	415 В	кВт	18,5	15	30	55	75	110	145	230	355	450	560
Номинальная рабочая мощность, АС-23	690 В	кВт	30	22	55	110	132	200	250	400	630	710	1000

Таблица 9. Устройства плавного пуска, общие характеристики

	PSR 3	PSR 6	PSR 9	PSR 12	PSR 16	PSR 25	PSR 30	PSR 37	PSR 45
Номинальный ток* [А]	3,9	6,8	9	12	16	25	30	37	45
Линейный контактор	A9	A9	A9	A12	A16	A26	A30	A40	A50
Шунтирующий контактор	Встроенный								
Тепловая защита	TA25DU						TA42DU	TA75DU	

\*SS При подключении «в линию» напряжение равно 400 В

	PSS18/30	PSS30/52	PSS37/64	PSS44/76	PSS50/85	PSS60/105	PSS72/124	PSS85/147	PSS105/181	PSS142/245	PSS175/300	PSS250/430	PSS300/515
Номинальный ток* [А]	18	30	37	44	50	60	72	85	105	142	175	250	300
Номинальный ток* [А]	30	52	64	76	85	105	124	147	181	245	300	430	515
Линейный контактор	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A260	A300
Шунтирующий контактор	A9	A16	A26	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A110	A145	A210
Тепловая защита	TA25DU		TA42DU		TA75DU			TA110DU		TA200DU		TA450DU	

\*SS При подключении «в линию» напряжение равно 400 В

\*\*SS При подключении «внутри треугольника» напряжение равно 400 В

	PST30	PST37	PST44	PST50	PST60	PST72	PST85	PST105	PST142	PST175	PST210	PST250	PST300
Номинальный ток* [А]	30	37	44	50	60	72	85	105	142	175	210	250	300
Номинальный ток* [А]	52	64	76	85	105	124	147	181	245	300	360	430	515
Линейный контактор	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A210	A260	A300
Шунтирующий контактор	A16	A26	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A95	A110	A145	A145	A210
Тепловая защита	Защита от перегрузки путем измерения тока и вычисления температуры обмоток по математической модели двигателя. Регулируемый пусковой ток для класса расщепления 10–10А–20–30												

\*SS При подключении «в линию» напряжение равно 400 В

\*\*SS При подключении «внутри треугольника» напряжение равно 400 В

	PSTB370	PSTB470	PSTB570	PSTB720	PSTB840	PSTB1050
Номинальный ток* [А]	370	470	570	720	840	1050
Номинальный ток* [А]	640	814	987	1247	1455	1810
Линейный контактор	AF400	AF460	AF580	AF750	-	-
Шунтирующий контактор	integrato	integrato	integrato	integrato	integrato	integrato
Тепловая защита						

\*S При подключении «в линию» напряжение равно 400 В

\*\*SS При подключении «внутри треугольника» напряжение равно 400 В

### Преобразователи частоты

В данном разделе приведен краткий обзор некоторых доступных на рынке преобразователей частоты. Для получения информации о наличии определенных типоразмеров и подробного анализа технических характеристик следует обратиться к специальной документации.

Преобразователи частоты типа «машинные приводы» серии от ACS50 до ACS350 (т. е. ACS55, ACS100, ACS140 и ACS150) или «стандартные приводы» серии ACS550 или ACH550, предназначены для применения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и идеально подходят для простых в установке, эксплуатации и обслуживании приводов, обеспечивающих точное регулирование скорости и вращающего момента двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью от 0,55 до 355 кВт. Данные преобразователи, управляемые с помощью широтно-импульсной модуляции, могут применяться для решения широкого круга задач в промышленности, как в самых простых системах с вентиляторной нагрузкой (насосы и вентиляторы), так и для привода более сложных динамических систем.

Преобразователи частоты типа «промышленные приводы» серии ACS800, использующих технологию DTC (непосредственное регулирование вращающего момента), обеспечивают быструю адаптацию к изменениям нагрузки двигателя, и тем самым его более стабильную работу. Устройства ACS 800, оснащенные помехоподавляющими фильтрами и встроенными в привод дросселями, обеспечивают лучшие рабочие характеристики, более удобное программирование и ввод в эксплуатацию, благодаря чему эти приводы подходят для широкого спектра применений. Преобразователи серии ACS800 позволяют управлять двигателями в широком диапазоне мощностей – от 0,55 до 5600 кВт и напряжения питания – от 380 до 690 В.

### 4.2 Работа с таблицами координации аппаратов АББ

Для облегчения реализации различных технических решений (прямой пуск, пуск переключением со звезды на треугольник, нормальные или тяжелые условия пуска – координация пускателя Тип 2) компания АББ предлагает несколько таблиц по координации, которые были разработаны на основании экспериментальных данных, а там, где это возможно, путем экстраполяции полученных результатов. Данные таблицы позволяют правильно подобрать аппараты управления и защиты электродвигателей. Таблицы составлены для наиболее распространенных значений напряжения и ожидаемых токов короткого замыкания (415, 440, 500 и 690 В перем. тока, 35, 50, 65 кА и выше). Наиболее часто используемые сочетания аппаратов, используемых для пуска электродвигателей, собраны в брошюре «Таблицы координации аппаратов защиты и управления», код 9CND0000000390, декабрь

2009 года (изображение обложки представлено на рисунке ниже). В этой брошюре вы можете найти необходимую информацию по резервированию защит и селективности автоматических выключателей АББ на напряжение 415 В переменного тока.



С более полным обзором различных решений по координации аппаратов пуска и защиты двигателя можно ознакомиться на сайте <http://www.abb.com/lowvoltage>. Перейдите по ссылкам «Поддержка – Онлайн инструменты для подбора продукции – Таблицы с данными по координации» до следующей страницы:



а затем перейдите в меню «Подбор» и в открывшейся форме задайте необходимые параметры координации:



Рассмотрим структуру (поля от 1 до 6) таблиц 10 и «Таблицы координации аппаратов защиты и управления» имеют такую же структуру.

Таблица 10. Таблица координации аппаратов для пуска и защиты электродвигателя. Прямой пуск

Прямой пуск; 400/415 В; 50 кА; координация тип 2; нормальные условия пуска

1

Двигатель		Автоматический выключатель в литом корпусе		Контактор	Тепловой расцепитель			Группа
Номинальная мощность Pe [кВт]	Номинальный ток Ie [А]	Тип	Уставка электромагнитного расцепителя [А]	Тип	Тип	Уставка		I макс [А]
						мин. [А]	макс. [А]	
0,37	1,1	T2S160 MF 1.6	21	A9	TA25DU1.4	1	1,4	1,4
0,55	1,5	T2S160 MF 1.6	21	A9	TA25DU1.8	1,3	1,8	1,6
0,75	1,9	T2S160 MF 2	26	A9	TA25DU2.4	1,7	2,4	2
1,1	2,8	T2S160 MF 3.2	42	A9	TA25DU4	2,8	4	3,2
1,5	3,5	T2S160 MF 4	52	A16	TA25DU5	3,5	5	4
2,2	5	T2S160 MF 5	65	A26	TA25DU6.5	4,5	6,5	5
3	6,6	T2S160 MF 8.5	110	A26	TA25DU8.5	6	8,5	8,5
4	8,6	T2S160 MF 11	145	A30	TA25DU11	7,5	11	11
5,5	11,5	T2S160 MF 12.5	163	A30	TA25DU14	10	14	12,5
7,5	15,2	T2S160 MA 20	210	A30	TA25DU19	13	19	19
11	22	T2S160 MA 32	288	A30	TA42DU25	18	25	25
15	28,5	T2S160 MA 52	392	A50	TA75DU42	29	42	42
18,5	36	T2S160 MA 52	469	A50	TA75DU52	36	52	50
22	42	T2S160 MA 52	547	A50	TA75DU52	36	52	50
30	56	T2S160 MA 80	840	A63	TA75DU80	60	80	65
37	68	T2S160 MA 80	960	A75	TA75DU80	60	80	75
45	83	T2S160 MA 100	1200	A95	TA110DU110	80	110	96
55	98	T3S250 MA 160	1440	A110	TA110DU110	80	110	110
75	135	T3S250 MA 200	1800	A145	TA200DU175	130	175	145
90	158	T3S250 MA 200	2400	A185	TA200DU200	150	200	185
110	193	T4S320 PR221-I In320	2720	A210	E320DU320	100	320	210
132	232	T5S400 PR221-I In400	3200	A260	E320DU320	100	320	260
160	282	T5S400 PR221-I In400	4000	A300	E320DU320	100	320	300
200	349	T5S630 PR221-I In630	5040	AF400	E500DU500	150	500	400
250	430	T6S630 PR221-I In630	6300	AF460	E500DU500	150	500	430
290	520	T6S800 PR221-I In800	7200	AF580	E800DU800	250	800	580
315	545	T6S800 PR221-I In800	8000	AF580	E800DU800	250	800	580
355	610	T6S800 PR221-I In800	8000	AF750	E800DU800	250	800	750

2

3

3a

4

5

5a

5b

6

- 1 Параметры электроустановки и тип пуска. В рассматриваемом случае:
  - тип пуска: прямой;
  - электрические характеристики установки, для которых действительна предлагаемая координация аппаратов (напряжение 400/415 В, ток короткого замыкания 50 кА);
  - координация частей пускателя с устройствами защиты: (тип 2 – нормальные условия пуска)
- 2 Номинальная мощность и номинальный ток стандартных двигателей АББ.
- 3 Тип аппарата защиты от коротких замыканий. Приводится следующая информация:
  - серия и типоразмер (T2...160 или T5...400);
  - исполнение, соответствующее параметрам рассматриваемой электроустановки (исполнение «S» предназначено для работы в цепи с напряжением 400/415 В, имеет отключающую способность 50 кА);
  - тип и номинальный ток аппарата защиты от короткого замыкания (...MF11 – ...MA100 – ...PR221-I In400); в поле 3a приведены уставки срабатывания электромагнитного расцепителя.
- 4 Обозначение типа контактора (A95 – AF750)
- 5 Тип аппарата защиты от перегрузки:
  - конструктивное исполнение (с биметаллическими пластинами TA25...- TA200... или электронное E320...);
  - соответствие характеристикам нормального пуска (...DU для биметаллических расцепителей или с настраиваемым классом расцепления для электронных реле);
  - максимальный ток нерасцепления (...2.4 - ...175 - ...320). Соединяя отдельные части кода, мы получаем полное обозначение устройства тепловой защиты (TA25DU2.4 - TA200DU175 - E320DU320); в полях 5a и 5b указаны минимальные и максимальные значения уставки.
- 6 Значение номинального тока для выбора кабеля в соответствии с МЭК 60947-4-1.

Таблица 11. Таблица координации аппаратов для пуска и защиты электродвигателя. Пуск переключением со звезды на треугольник

Пуск переключением со звезды на треугольник; 400/415 В; 50/60 Гц; 35 кА; координация тип 2

1

Двигатель		Автоматический выключатель в литом корпусе		Контактор			Тепловой расцепитель	
Pe [кВт]	Ie [A]	Тип	I <sub>m</sub> [A]	Тип «линия»	Тип «треугольник»	Тип «звезда»	Тип	[A]
18,5	36	T2N160 MA52	469	A50	A50	A26	TA75DU25	18-25
22	42	T2N160 MA52	547	A50	A50	A26	TA75DU32	22-32
30	56	T2N160 MA80	720	A63	A63	A30	TA75DU42	29-42
37	68	T2N160 MA80	840	A75	A75	A30	TA75DU52	36-52
45	83	T2N160 MA100	1050	A75	A75	A30	TA75DU63	45-63
55	98	T2N160 MA100	1200	A75	A75	A40	TA75DU63	45-63
75	135	T3N250 MA160	1700	A95	A95	A75	TA110DU90	66-90
90	158	T3N250 MA200	2000	A110	A110	A95	TA110DU110	80-110
110	193	T3N250 MA200	2400	A145	A145	A95	TA200DU135	100-135
132	232	T4N320 PR221-I In320	2880	A145	A145	A110	E200DU200	60-200
160	282	T5N400 PR221-I In400	3600	A185	A185	A145	E200DU200	60-200
200	349	T5N630 PR221-I In630	4410	A210	A210	A185	E320DU320	100-320
250	430	T5N630 PR221-I In630	5670	A260	A260	A210	E320DU320	100-320
290	520	T6N630 PR221-I In630	6300	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500
315	545	T6N800 PR221-I In800	7200	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500
355	610	T6N800 PR221-I In800	8000	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500

2

3

3а

4

5

5а

- 1 Параметры электроустановки и тип пуска. В рассматриваемом случае:  
 – тип пуска: по схеме звезда / треугольник (Y/Δ);  
 – электрические характеристики установки, для которых действительна предлагаемая координация аппаратов (напряжение 400/415 В, ток короткого замыкания 35 кА);  
 – координация пускателя с устройствами защиты: (тип 2)

В полях 2 3 3а приведена та же информация, что и в таблице 10.

- 4 Данные по выбору контакторов. Как видно из таблицы, для прямого пуска и пуска с обмотками статора, соединенными треугольником, используются одинаковые контакторы. В отношении пуска следует помнить, что через эти контакторы не протекает полный номинальный ток двигателя (ток уменьшается в 1,73 раза), даже если, как это часто бывает, типоразмер аппарата и выбран в соответствии с требованиями координации. Третий контактор предназначен для включения обмоток звездой. Через него протекает ток двигателя, уменьшенный в 0,33 раза. Учитывая особенности этого соединения, защита от короткого замыкания не требуется и, следовательно, типоразмер этого контактора может быть уменьшен.

- 5 Тип аппарата защиты от перегрузки. Информация аналогична информации, приведенной в таблице 10. Необходимо сделать только одно замечание об уставке, указываемой в поле 5а

– уставка должна соответствовать току двигателя, уменьшенному в 1,73 раза.

## 5 Основные параметры асинхронного двигателя, указываемые на заводской табличке

Двигатель характеризуется различными электрическими и конструктивными параметрами, которые определяют область его применения. Эти параметры являются номинальными характеристиками и указываются на заводской табличке двигателя.

Ниже приведено краткое описание и объяснение смысла основных параметров, указываемых на заводской табличке. Особое внимание уделено описанию параметров, относящихся к рабочим условиям и условиям окружающей среды. К электрическим и механическим параметрам, являющимся номинальными рабочими характеристиками двигателя, относятся:

- мощность двигателя в киловаттах, которая представляет собой номинальную механическую мощность на валу. Во многих странах номинальная механическая мощность на валу двигателя измеряется также и в лошадиных силах: 1 лошадиная сила, принятая в Великобритании и США, эквивалентна 745,7 Вт, 1 метрическая лошадиная сила эквивалентна 736 Вт;
- напряжение питания электродвигателя, например, 230 В ( $\Delta$ ), 400 В (Y). Это означает, что при подключении такого двигателя к трехфазной сети с напряжением 400 В (фазное напряжение равно 230 В, линейное – 400 В) обмотки статора могут быть соединены только звездой. При соединении обмоток такого двигателя треугольником к ним будет приложено напряжение 400 В, хотя они рассчитаны на 230 В. Это означает, что рассматриваемый двигатель с обмотками статора, соединенными треугольником, не предназначен для подключения к сети с напряжением 400 В.

Итак: двигатель с двумя рабочими напряжениями можно использовать следующим образом:

- обмотки, соединяют на все время эксплуатации треугольником и на них подают меньшее напряжение;
- обмотки, соединяют на все время эксплуатации звездой и на них подают большее напряжение;
- обмотки переключают в процессе пуска со звезды на треугольник (в двигателях с шестью зажимами в выводной коробке). Т. е. при пуске двигателя обмотки статора соединяют звездой, а после разгона – треугольником (при условии, что меньшее значение номинального напряжения двигателя совпадает с напряжением питающей сети);
- номинальный ток двигателя зависит от мощности, напряжения, КПД ( $\eta$ ) и коэффициента мощности ( $\cos\phi$ );
- частота вращения двигателя (выражается в оборотах в минуту) зависит от частоты сети (50 или 60 Гц) и числа полюсов.

На заводской табличке приводится и другая информация, понимание смысла которой, может вызвать некоторые затруднения. К такой информации относятся:

- типовой режим работы: (по стандарту *ГОСТ Р 52776 (МЭК 60034-1) «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные данные и характеристики»*), необходим для определения рабочих характеристик, которые должен обеспечивать двигатель в соответствии типом применения. Если заказчик не указал типовой режим работы, то изготовитель по умолчанию поставляет двигатель, предназначенный для типового режима работы S1 (продолжительный

режим работы). Типовые режимы работы подробно рассмотрены в приложении D;

- степень защиты (код IP): обозначает степень защиты, обеспечиваемую корпусом электрической вращающейся машины (по стандарту *ГОСТ Р МЭК 60034-5 «Машины электрические вращающиеся. Часть 5. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин»*). Первая характеристическая цифра обозначает обеспечиваемую оболочкой степень защиты персонала от прикосновения к токоведущим и движущимся частям, находящимся внутри оболочки, а также защиту машин от проникновения в них инородных твердых тел.

Вторая характеристическая цифра означает степень защиты, обеспечиваемую оболочкой, от вредных воздействий проникающей воды.

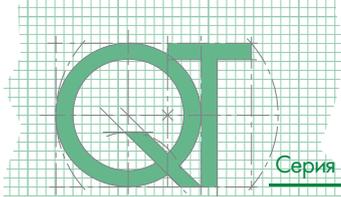
- класс нагревостойкости изоляции: указывает на предельную температуру обмоток двигателя. Класс нагревостойкости изоляции обозначается буквой, которой соответствует максимально допустимая температура обмоток (см. таблицу 12). Системы с классом нагревостойкости F используются часто. Для обеспечения достаточного запаса прочности изоляции температура не должна превышать значения, соответствующего классу нагревостойкости В.

Таблица 12. Классы нагревостойкости и соответствующая им температура

Класс нагревостойкости	Температура
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Среди других кодов, которые позволяют более подробно определить конструктивные особенности двигателя, но достаточно сложно поддаются интерпретации и относятся к проблемам, не связанным с целью данной брошюры, можно упомянуть следующие:

- Код IC: обозначает используемый метод охлаждения. Код состоит из букв и цифр, которые указывают на расположение цепей, тип хладагента и способы его циркуляции. С более подробной информацией можно ознакомиться, обратившись к стандарту МЭК 60034-6 «Машины электрические вращающиеся. Часть 6. Методы охлаждения» (В России действует ГОСТ 20459-87 «Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения. Обозначения»).
- Код IM: обозначает конструктивное исполнение (монтаж деталей машин с помощью креплений, опор и валов) и способ монтажа (расположение машины как единого целого на объекте, центрирование валов и положение креплений) вращающихся электрических машин. С более подробной информацией можно ознакомиться, обратившись к стандарту МЭК 60034-7 «Машины электрические вращающиеся. Часть 7. Классификация конструктивных исполнений по способу монтажа» (В России действует ГОСТ 2479-79 «Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа»).



## Приложение А. Теория трехфазных асинхронных двигателей

В данном приложении, не вдаваясь в подробные теоретические расчеты, рассмотрены основные принципы работы асинхронных двигателей.

Асинхронные двигатели относятся к типу электродвигателей переменного тока, частота вращения которых не равна (в двигательном режиме меньше) частоте сети. Иными словами, эти две частоты не являются синхронными, что объясняет происхождение названия двигателя. Ток, протекающий по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле, синхронная частота вращения  $n_0$  которого определяется частотой питающей сети. В замкнутой накоротко обмотке ротора, находящейся в магнитное поле статора, индуцируется ток, который в соответствии с законом электромагнитной индукции приводит к возникновению вращающего момента, препятствующего изменению магнитного поля, индуцирующего этот ток. Ротор вращается, стремясь достичь синхронной частоты, при которой вращающий момент станет равен нулю, в результате чего двигатель перейдет в неустойчивый режим. На практике, ротор достигает более низкой частоты вращения (относительная разность частот вращения магнитного поля и ротора называется скольжением), при которой в условиях отсутствия нагрузки (т. е. без внешней нагрузки, подсоединенной к валу двигателя) вращающий момент равен моментам, создаваемым силами трения, в то время как при полной нагрузке вращающий момент равен сумме выше упомянутых моментов и момента сопротивления, приложенного к валу. Как сказано выше, частота, при которой вращающий момент двигателя равен нулю называется синхронной частотой. Эта частота определяется частотой питающей сети и числом пар полюсов по следующей формуле:

$$n_0 = \frac{60 \times f}{p}, \text{ где}$$

$n_0$  – синхронная частота вращения, выражаемая в оборотах в минуту;

$f$  – частота сетевого питающего напряжения;

$p$  – число пар полюсов

(рассчитывается путем деления на два общего числа полюсов двигателя).

В соответствии с этой формулой, для 8-полюсного двигателя (с четырьмя парами полюсов) и частоты питающей сети 50 Гц, синхронная частота  $n_0$  равна:

$$n_0 = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ об/мин.}$$

В качестве примера, в таблице А1 приведены значения синхронной частоты для двигателей с различным числом полюсов при двух типичных значениях частоты сетевого питания: 50 и 60 Гц.

**Таблица А1.** Синхронная частота вращения трехфазных асинхронных двигателей в зависимости от числа полюсов и частоты питающего напряжения

Число полюсов	Синхронная частота вращения $n_0$	Синхронная частота вращения $n_0$
	50 Гц	60 Гц
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720

При нормальных рабочих условиях ротор (и, следовательно, составляющий с ним единое целое вал двигателя) имеет более низкую частоту вращения. Синхронная частота не достигается также и во время холостого хода, то есть при отсутствии нагрузки, что объясняется наличием потерь энергии внутри двигателя, связанных, например, с трением в подшипниках, которые поддерживают вал и поэтому производят небольшой момент трения.

Зная разницу между частотой вращения ротора  $n$  и частотой вращения магнитного поля статора  $n_0$  можно вычислить относительную частоту  $n_s$ , выражаемую как  $n_s = n_0 - n$  и называемую «скорость скольжения». Исходя из этого, скольжение  $s$  определяется как  $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$  и может принимать значения

в пределах от 0 до 1:

$n = 0$  – ротор не вращается, следовательно  $s = 1$  (ротор заклинило);

$n = n_0$  – ротор вращается с синхронной частотой, поэтому  $s = 0$  (только в теории).

На практике, скольжение, характеризующее работу асинхронных двигателей при полной нагрузке, составляет от 3 до 7%, при этом более низкие значения характерны для более мощных двигателей. Если вернуться к рассмотренному выше примеру двигателя, синхронная частота вращения которого составляет 750 об/мин, и предположить, что сколь-

жение равно 4%, то фактическая частота при номинальных условиях будет равна:

$$n = n_0 - (s \times n_0) = 750 - (0,04 \times 750) = 720 \text{ об/мин}$$

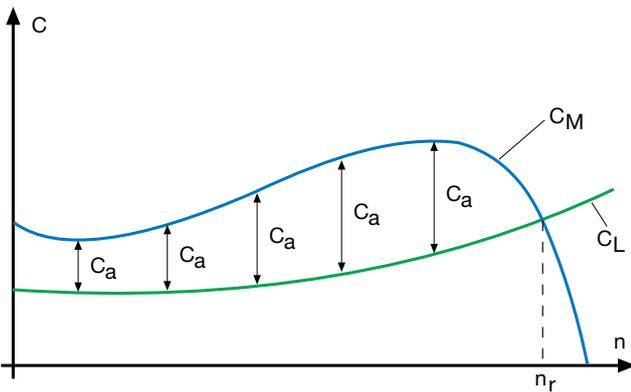
**Таблица А2.** Типичные значения КПД, коэффициента мощности и номинального тока (при напряжении питания  $V_L = 415 \text{ В}$  перем. тока)

Номинальная выходная мощность  [кВт]	КПД $\eta$ при полной нагрузке			Коэффициент мощности при полной нагрузке			Номинальный ток [А]  $I_e = \frac{P_e \times 1000}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos\phi \times \eta}$		
	2P	4P	6P	2P	4P	6P	2P	4P	6P
75	94.8	95.0	94.9	0.87	0.82	0.80	127	134	137
90	95.1	95.2	95.3	0.89	0.83	0.83	148	158	158
110	95.1	95.3	95.3	0.85	0.83	0.83	189	193	193
132	95.7	95.5	95.4	0.87	0.84	0.84	221	229	229
160	96.1	96.0	95.5	0.89	0.85	0.83	260	273	281
200	96.3	96.2	95.8	0.90	0.85	0.83	321	340	350
250	96	96.2	96.0	0.88	0.85	0.80	412	425	453
315	96.4	96.4	96.0	0.89	0.85	0.82	511	535	557
355	96.5	96.6	96.5	0.87	0.85	0.84	588	601	609
400	96.8	96.6	96.5	0.88	0.86	0.84	653	670	687

## Приложение В. Приближенный расчет времени пуска

Проблемы пуска электродвигателя, неразрывно связаны: с типом двигателя и тем вращающим моментом  $C_M$ , который он создает; способом пуска и нагрузкой электродвигателя (приводным механизмом) характеризующейся моментом сопротивления  $C_L$ . Для того чтобы двигатель запустился, необходимо чтобы значение динамического момента  $C_a = C_M - C_L$  было больше нуля. Начальное значение динамического момента (в момент пуска двигателя) следует правильно отрегулировать, т. е. оно не должно быть ни слишком малым, поскольку это приведет к продолжительному пуску и опасности подъема температуры двигателя, ни слишком большим, поскольку увеличится нагрузка на сочленения с приводным механизмом. Кривые, соответствующие вышеупомянутым характеристикам, показаны на рисунке В1.

Рисунок В1. Типичные кривые вращающего момента



Время пуска  $t_a$  зависит от регулировки параметров пуска. Для оценки времени пуска можно использовать несколько упрощений основных понятий классической динамики, которые позволяют получить результаты с достаточно хорошим приближением. Динамический момент, равный разности вращающего момента двигателя и момента сопротивления нагрузки, можно связать с моментом инерции двигателя  $J_M$ , нагрузки  $J_L$  и угловой скоростью вращения двигателя следующим образом:

$$(C_M - C_L) = (J_M + J_L) \times \frac{d\omega}{dt},$$

где  $d\omega$  равно  $d\omega = \frac{2 \times \pi \times dn}{60}$ . Это выражение полу-

чается путем дифференцирования известного выражения для угловой скорости двигателя:

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60}.$$

Путем применения простых математических преобразований и методов интегрального исчисления параметр  $t_a$  можно выразить следующей формулой:

$$t_a = \int_0^{n_0} \frac{2 \times \pi \times (J_M + J_L)}{60} \times \frac{dn}{(C_M - C_L)}$$

Чтобы найти значение пускового момента, необходимо сделать некоторые упрощения:

- первое заключается в записи среднего значения для вращающего момента двигателя в виде выражения  $C_M = 0,45 \times (C_S + C_{max})$ , где  $C_S$  – пусковой момент,  $C_{max}$  – максимальный момент;
- второе упрощение касается момента сопротивления нагрузки, который можно скорректировать путем применения коэффициента  $K_L$ , зависящего от типа нагрузки согласно таблице В1

Таблица В1. Значения коэффициента  $K_L$

Коеф-фициент нагрузки	Тип подключаемой нагрузки			
	Подъемное оборудование	Вентиляторы	Поршневые насосы	Маховики
$K_L$	1	0,33	0,5	0

Для лучшего понимания значения коэффициента  $K_L$ , можно связать типы нагрузки, указанные в таблице, с вращающим моментом, характеризующим время пуска нагрузки с помощью следующих предположений:

- Подъемное оборудование – в процессе разгона момент сопротивления не изменяется;
- Вентиляторы – в процессе разгона момент сопротивления увеличивается по квадратичному закону
- Поршневые насосы – в процессе разгона момент сопротивления увеличивается пропорционально
- Маховики – момент сопротивления равен нулю.

С учетом данных предположений значение динамического момента в момент пуска двигателя можно выразить следующим образом:

$$(C_M - C_L) = C_{acc} = 0,45 \times (C_S + C_{max}) - K_L \times C_L$$

Учитывая вышеописанное, время пуска можно выразить следующей формулой:

$$t_a = \frac{2 \times \pi \times n_0 \times (J_M + J_L)}{60 \times C_{acc}}$$

Время пуска позволяет выбрать режим пуска (в нормальных или тяжелых условиях), а также правильно подобрать коммутационные аппараты и устройства защиты.

Все необходимые параметры двигателя указываются его изготовителем. В качестве примера в пред-

ставленной ниже таблице В2 показаны значения параметров наиболее распространенных трехфазных асинхронных двигателей. Понятно, что параметры нагрузки, в каждом конкретном случае определяет конструктор приводного механизма.

**Таблица В2.** Типичные значения некоторых электрических и механических параметров трехфазных асинхронных двигателей

Номинальная выходная мощность [кВт]	Частота вращения при полной нагрузке [об/мин]	Отношение пускового тока к номинальному	Номинальный момент (момент при полной нагрузке) $C_N$ [Нм]	Отношение пускового момента к номинальному	Отношение максимального момента к номинальному	КПД при полной нагрузке	Момент инерции ротора $J/4GD^2$ [кг м <sup>2</sup> ]	Макс. время прямого пуска [с]
75	1485	6,8	483	2,4	2,8	95	1,15	18
90	1486	7,1	579	2,7	2,9	95,2	1,4	18
110	1488	6,9	706	2,1	2,8	95,3	2	18
132	1487	6,7	848	2,2	2,7	95,5	2,3	18
160	1487	7,2	1028	2,4	2,9	96	2,9	18
200	1487	7,2	1285	2,5	2,9	96,2	3,5	20
250	1489	7,5	1603	2,2	2,6	96,2	5,7	20
315	1489	7,3	2022	2,3	2,8	96,4	6,9	20
355	1490	7,5	2277	2,4	2,7	96,6	6,9	20
400	1490	7,7	2564	2,5	2,8	96,6	8,4	20

Опираясь на данные таблицы, ниже приведен пример расчета времени пуска двигателя с учетом рассмотренных ранее теоретических закономерностей.

**Пример:**

Трехфазный асинхронный двигатель, 4 полюса	160 кВт
Частота сети	50 Гц
Номинальная частота вращения	1500 об/мин
Частота вращения при полной нагрузке	1487 об/мин
Момент инерции двигателя	$J_M = 2,9$ кг м <sup>2</sup>
Момент инерции нагрузки	$J_L = 60$ кг м <sup>2</sup>
Момент сопротивления нагрузки	$C_L = 1600$ Нм
Номинальный момент двигателя	$C_N = 1028$ Нм
Пусковой момент	$C_S = 2467$ Нм ( $C_S = 2,4 \times 1028$ )
Максимальный момент	$C_{max} = 2981$ Нм ( $C_{max} = 2,9 \times 1028$ )
Коэффициент нагрузки при постоянном вращающем моменте	$K_L = 1$

$$C_{acc} = 0,45 \times (C_S + C_{max}) - K_L \times C_L = 0,45 \times (2467 + 2981) - (1 \times 1600) = 851,6 \text{ Нм}$$

$$\text{отсюда получаем } t_a = \frac{2 \times \pi \times 1500 \times (2,9 + 60)}{60 \times 851,6} = 11,6 \text{ с}$$

Нагрузка при квадратичном росте момента  $K_L = 0,33$

$$C_{acc} = 0,45 \times (C_S + C_{max}) - K_L \times C_L = 0,45 \times (2467 + 2981) - (0,33 \times 1600) = 1923,6 \text{ Нм}$$

$$\text{отсюда получаем } t_a = \frac{2 \times \pi \times 1500 \times (2,9 + 60)}{60 \times 1923,6} = 5,14 \text{ с}$$

Расчитанное для обоих типов нагрузки время пуска соответствует требованиям изготовителя в отношении максимального допустимого времени прямого пуска. Указанные данные также можно использовать для выбора устройства тепловой защиты.

## Приложение С. Тепловая защита и режим работы при обрыве фазы

Среди различных видов неисправности, называемой «обрыв фазы» трехфазного асинхронного двигателя можно выделить следующие: нарушение непрерывности фазного проводника питающей линии (работа двигателя при обрыве фазы) или обрыв обмотки (режим работы при обрыве обмотки). Наиболее распространенными последствиями такой работы могут быть перегрев двигателя, сильный шум и вибрация. Далее мы проанализируем, каким образом условия, возникающие при обрыве фазы, влияют на двигатель с обмотками, соединенными звездой и треугольником, с точки зрения мощности и тока. В трехфазном асинхронном двигателе отношения между номинальными рабочими параметрами при нормальных условиях работы (трехфазное питание) выражаются следующей формулой:

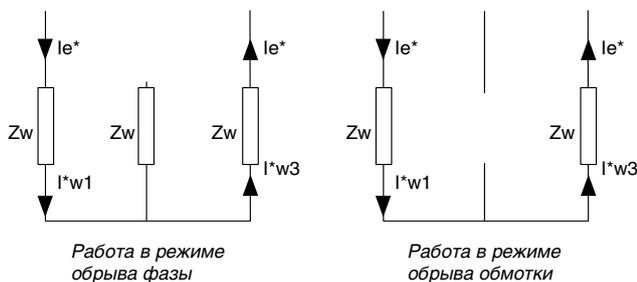
$$1) \quad P_e = \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\phi$$

### Двигатель с обмотками, соединенными звездой

Сначала проанализируем работу двигателя с обмотками, соединенными звездой, при обрыве фазы, а затем при обрыве обмотки. Если происходит обрыв фазы, то отношения между рабочими параметрами двигателя могут быть выражены формулой:

$$2) \quad P^* = V^* \times I^* \times \cos\phi^*$$

Знаком «\*» отмечены электрические величины, рассматриваемые в режиме обрыва фазы.



Если считать, что при нормальных и аномальных рабочих условиях электродвигатель будет производить одну и ту же мощность, и при этом не будут изменяться напряжение питания ( $V_n = V^*$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\phi = \cos\phi^*$ ), то, приравняв приведенные выше формулы 1) и 2) мы получим:

$$3) \quad \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\phi = V^* \times I^* \times \cos\phi^* \quad \leftarrow \square$$

$$\rightarrow \sqrt{3} \times I_e = I^* \rightarrow I^* = 1,73 \times I_e$$

Из анализа данного выражения становится ясно, что для работы при обрыве фазы, если от двигателя требуется такая же мощность, как и в нормальном режиме трехфазного питания, ток  $I_e^*$ , потребляемый двигателем должен в  $\sqrt{3}$  превышать ток  $I_e$ , потребляемый в нормальных рабочих условиях. Таким образом, для того, чтобы обеспечивать неизменную мощность, двигатель, работающий при обрыве фазы, должен потреблять ток, на 73% превышающий номинальный ток в трехфазном режиме работы, то есть, он должен работать в условиях перегрузки, что в итоге приводит к перегреву и снижает срок службы двигателя.

На практике, работа при таком высоком токе становится невозможной из-за срабатывания тепловой защиты, уставка которой выбирается по номинальному току  $I_e$  двигателя. Таким образом, устройство тепловой защиты защищает двигатель от перегрева при воздействии потребляемого тока, который в данном случае превышает номинальный ток  $I_e$ .

Теперь, предположим, что в обоих случаях (т. е. при работе в режиме нормального трехфазного питания и при работе в режиме обрыва фазы) двигатель потребляет одинаковый ток  $I_e$ . Предположим также, что и при этом сохраняются неизменными напряжение питания и коэффициент мощности. Рассмотрим значение выходной мощности в этих двух режимах работы:

Приравняв значения тока, полученные из приведенных выше формул 1) и 2), мы получаем следующее выражение:

$$4) \quad \frac{P_e}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos\phi} = \frac{P^*}{V^* \times \cos\phi^*} \quad \leftarrow \square$$

$$\rightarrow \frac{P_e}{\sqrt{3}} = P^* \rightarrow 0,58 \times P_e = P^*$$

то есть, при обрыве фазы и неизменном значении потребляемого тока  $I_e$  вырабатываемая двигателем мощность сокращается на 42% по сравнению с номинальной мощностью при трехфазном питании.

В случае соединения обмоток двигателя звездой проходящий по ним ток при любых режимах работы, будет иметь то же значение, что и ток, проходящий через устройство тепловой защиты. Это означает, что в обоих рассматриваемых режимах работы тепловое реле обеспечивает защиту двигателя при увеличении тока выше номинального тока  $I_e$ . Таким образом, если в нормальном режиме работы происходит обрыв фазы или обрыв одной из обмоток, трехфазный электродвигатель будет работать в однофазном режиме, поскольку через обмотки будет проходить один и тот же ток (т.е. не будет никаких различий в величине и сдвиге фазного тока). Вследствие этого в случае обрыва фазы вращающий момент двигателя уменьшится и, если установившийся момент будет поддерживаться постоянным, произойдет

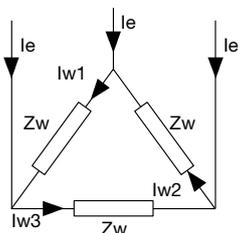
снижение частоты вращения двигателя. Это означает увеличение скольжения с последующим ростом потребляемого тока, что вызывает чрезмерный и опасный перегрев двигателя. В соответствии с принципом действия вращающегося магнитного поля, если трехфазный асинхронный двигатель работает в однофазном режиме, пусковой момент отсутствует, что приводит к невозможности пуска двигателя в условиях обрыва фазы. С другой стороны, если пуск двигателя будет произведен с помощью какого-либо вспомогательного устройства, то он начнет вращаться в направлении внешнего воздействия, и, таким образом, будет работать при описанных выше ограничениях и при этом сохранятся указанные выше проблемы.

### Двигатель с обмотками, соединенными треугольником

При соединении обмоток двигателя треугольником формулы 1) и 2) эквивалентны только в случае нарушения непрерывности фазного проводника питающей линии.

Как уже отмечалось, при работе в режиме нормального трехфазного питания двигатель потребляет линейный ток, равный номинальному току  $I_e$ . Это означает, что через соединенные треугольником обмотки будет проходить ток, равный:

$$5) \quad I_{w1} = I_{w2} = I_{w3} = I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$$

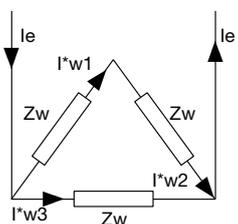


Нормальный режим работы

Если предположить, что при обрыве фазы двигатель всегда потребляет линейный ток, равный номинальному току  $I_e$ , то ток распределяется по обмоткам следующим образом:

$$6a) \quad I^*_{w1} = I^*_{w2} = \frac{V}{2 \times Z_w}$$

$$6b) \quad I^*_{w3} = \frac{V}{Z_w}$$



Работа в режиме обрыва фазы

Выражая напряжение в зависимости от общего сопротивления обмоток, получаем:

$$7) \quad V = \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e \quad (\text{эквивалентное сопротивление будет равно } \frac{(Z_w + Z_w) \times Z_w}{(Z_w + Z_w) + Z_w} = \frac{2 \times Z_w}{3})$$

Заменяя в приведенных выше формулах 6a) и 6b) параметр  $V$  выражением 7), можно выразить ток в обмотках как функцию номинального тока:

$$8a) \quad I^*_{w1} = I^*_{w2} = \frac{1}{2 \times Z_w} \times \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e = \frac{I_e}{3}$$

$$8b) \quad I^*_{w3} = \frac{1}{Z_w} \times \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e = \frac{2}{3} \times I_e$$

Рассчитывая отношение между токами в обмотках, определенными в режиме нормальной работы (формула 5), и в режиме работы при обрыве фазы (формулы 8a) и 8b)), получаем следующие результаты:

$$9a) \quad \frac{I_{w1}}{I^*_{w1}} = \frac{I_{w2}}{I^*_{w2}} = \frac{I_e}{\sqrt{3}} \times \frac{3}{I_e} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,73 \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \frac{I^*_{w1}}{I_{w1}} = \frac{I^*_{w2}}{I_{w2}} = 0,578$$

$$9b) \quad \frac{I_{w3}}{I^*_{w3}} = \frac{I_e}{\sqrt{3}} \times \frac{3}{2 \times I_e} = \frac{3}{2 \times \sqrt{3}} = 0,876 \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \frac{I^*_{w3}}{I_{w3}} = 1,153$$

Как уже отмечалось, при работе в режиме нормального трехфазного питания двигатель потребляет линейный ток  $I_e$ , а через обмотки протекает ток  $I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$ . Вследствие этого, из выражений 9a) и 9b)

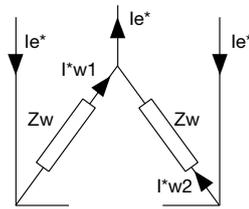
можно сделать вывод, что при обрыве фазы, даже если потребляемый линейный ток равен  $I_e$ , одна из обмоток (в данном примере обмотка 3) потребляет примерно на 15% больше чем при работе в нормальном режиме питания.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что тепловое реле не сработает, поскольку через него протекает ток  $I_e$ , даже если на самом деле одна из обмоток испытывает перегрузку (потребляемый ток возрастает на 15% по сравнению с нормальным режимом работы), что не обнаруживается тепловой защитой.

Вследствие этого, защита двигателя не обеспечивается надлежащим образом.

Если обрыв фазы происходит при сохранении выходной мощности, то во внимание могут быть приняты такие же соображения, как и в случае соединения обмоток двигателя звездой (согласно выражению 4). В случае соединения обмоток двигателя треугольником и наличия обрыва обмотки формулы 1) и 2) не эквивалентны и поэтому должно быть рассмотрено новое выражение:

$$2a) \quad P^* = 2 \times V^* \times I_e^* \times \cos\phi^*$$



Работа при обрыве обмотки

Если считать, что электродвигатель будет производить ту же мощность, и при этом не будут изменены напряжение питания ( $V_n = V^*$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\phi = \cos\phi^*$ ), то, приравнявая приведенные выше формулы 1) и 2) получим:

$$10) \quad \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\phi = 2 \times V^* \times I_e^* \times \cos\phi^* \quad \leftarrow$$

$$\sqrt{3} \times I_e = 2 \times I_e^* \rightarrow I_e^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_e \rightarrow I_e^* = 0,866 \times I_e$$

$I_e^*$  – это ток, потребляемый двигателем и протекающий через одну обмотку в режиме работы при обрыве обмотки.  $I_e^* = I^*w$  и является также током, определяемым устройством тепловой защиты. При работе в режиме нормального трехфазного питания ток, протекающий через обмотку, равен  $I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$ , в то время

как через устройство тепловой защиты протекает ток, равный  $I_e$ . Подставляя это выражение в формулу 10), получаем следующее:

$$11) \quad \sqrt{3} \times \sqrt{3} \times I_w = 2 \times I^*w \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow I^*w = \frac{3}{2} \times I_w = 1,5 \times I_w$$

Исходя из вышеизложенного, становится очевидно, что в данном аномальном режиме через обмотку двигателя проходит ток  $I^*w$ , который превышает максимально допустимый ток в обмотке при работе в режиме нормального питания, при этом тепловая защита не срабатывает, поскольку, как видно из формулы 10), через устройство защиты протекает ток, значение которого меньше номинального тока двигателя для нормального режима работы.

Совершенно ясно, что это наиболее тяжелый режим работы двигателя.

Если же предположить, что двигатель потребляет линейный ток, равный номинальному току  $I_e$  нормального режима, то, приравнявая значения тока из приведенных выше выражений 1) и 2а) и считая, что при этом не будут изменены напряжение питания ( $V_n = V^*$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\phi = \cos\phi^*$ ), получим:

$$12) \quad \frac{P}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos\phi} = \frac{P^*}{2 \times V^* \times \cos\phi^*} \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow P^* = \frac{2 \times P}{\sqrt{3}} = 1,15 \times P$$

Таким образом, при работе в режиме обрыва обмотки двигатель производит мощность на 15 % превышающую мощность двигателя в режиме нормального питания. Через обмотки проходит ток, который примерно на 73 % больше тока, проходящего через обмотки в режиме нормального трехфазного питания. Такие условия являются более тяжелыми по сравнению с предыдущими и при этом не вызывают срабатывания устройства тепловой защиты, поскольку через него проходит номинальный ток  $I_e$ . В двигателях с обмотками, соединенными треугольником, обрыв фазы приводит к тому, что трехфазный асинхронный двигатель начинает работать в однофазном режиме, поскольку через обмотки проходят токи, имеющие различные значения, но один и тот же сдвиг фаз. По этой причине вращающееся магнитное поле не создается и двигатель может быть запущен только принудительным вращением вала.

В отличие от этого, работа в случае обрыва одной обмотки приводит к тому, что асинхронный двигатель переходит в двухфазный режим питания, через обмотки проходят токи, имеющие одинаковые значения

( $|I_w| = \frac{|V|}{|Z_w|}$ ) но сдвинутые по фазе ( $\phi_1 - \phi_2 = \phi_w$ ).

В данном разделе были рассмотрены характеристики двигателя при обрыве фазы. При этом был использован теоретический подход, основанный на предположении, что выходная мощность и потребляемый ток имеют такие же значения, как и в нормальном трехфазном режиме работы. Однако реальные рабочие условия характеризуются наличием гармоник, которые генерируются вихревым вращающимся магнитным полем (прямым или обратным) и влияют на КПД, частоту вращения и выходную мощность. Поэтому реальная рабочая ситуация не может быть сведена к простому линейному приближению, как указано выше, даже если оно позволяет оценить значения токов, проходящих через двигатель, и объяснить, как он работает в режиме обрыва фазы и каким повреждениям он может быть подвержен.

## Приложение D. Типовые режимы работы

Термин режим работы определяет цикл работы двигателя, в который могут входить, периоды пуска, электрического торможения, холостого хода, состояния покоя, с учетом их продолжительности и последовательности во времени. Различают продолжительный, кратковременный и периодический режимы работы. Процентное отношение продолжительности работы двигателя с нагрузкой к общей продолжительности рабочего цикла называется коэффициентом относительной продолжительности включения (ПВ%).

Режим работы двигателя устанавливает потребитель (заказчик). Если потребитель (заказчик) не определил режим работы, то изготовитель считает, что необходим двигатель, предназначенный для типового режима работы S1 (для продолжительного режима работы). Типовой режим работы обозначается соответствующим кодом. Потребитель (заказчик) может выбрать типовой режим работы, пользуясь приведенной ниже классификацией.

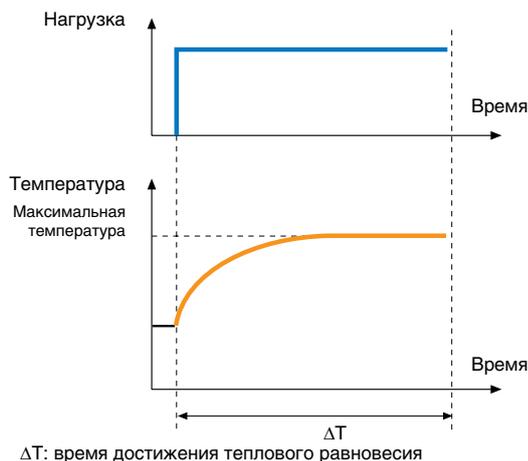
Определяя номинальные характеристики для двигателя (по значениям, указанным изготовителем для определенных условий эксплуатации) изготовитель должен выбрать один из классов номинальных характеристик. Если класс не указан, то применяются номинальные характеристики, относящиеся к продолжительному режиму работы.

Ниже приведены характеристики некоторых типовых режимов работы, соответствующие классификации, приведенной в стандарте ГОСТ Р 52776 (МЭК 60034-1), которые, как правило, рассматриваются в качестве исходных данных для описания номинальных характеристик двигателя.

### Продолжительный режим работы

Электродвигатель, предназначенный для работы в данном режиме, имеет номинальные характеристики, обеспечивающие работу с постоянной нагрузкой неограниченное время. Этот класс номинальных характеристик соответствует типовому режиму работы, обозначаемому кодом S1. Типовой режим работы S1 можно рассматривать как режим работы двигателя с постоянной нагрузкой и продолжительностью, достаточной для достижения практически установившегося теплового состояния.

*Продолжительный режим работы. Типовой режим работы S1*

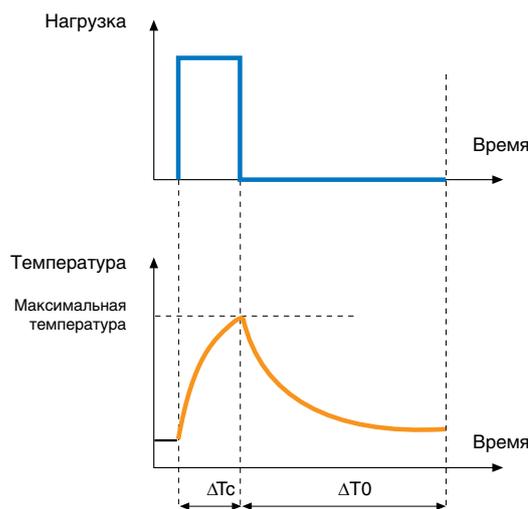


### Кратковременный режим:

Электродвигатель, предназначенный для кратковременного режима работы, имеет номинальные характеристики, при которых он после пуска при определенной температуре окружающей среды может работать указанный ограниченный период времени. Этот класс номинальных характеристик соответствует типовому режиму работы, обозначаемому кодом S2.

Типовой режим работы S2 можно рассматривать как режим работы двигателя с постоянной нагрузкой в течение времени, не достаточном для достижения установившегося теплового состояния, за которым следует состояние покоя длительностью, достаточной для того, чтобы его температура сравнялась с температурой охлаждающей среды. Полное обозначение состоит из кода S2, после которого указывается длительность периода нагрузки (например, S2 40 мин.).

*Кратковременный режим. Типовой режим работы S2*



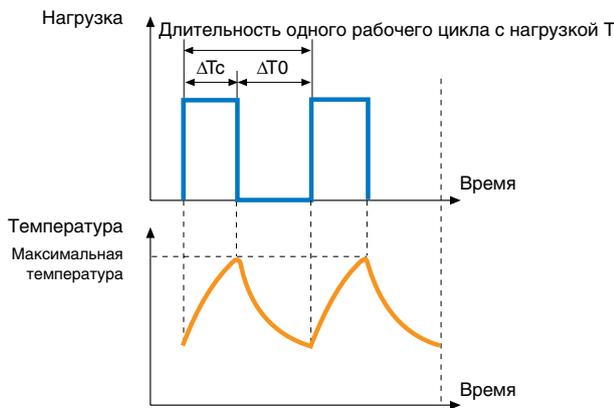
ΔTс: время работы с постоянной нагрузкой  
ΔT0: время нахождения в состоянии покоя

### Периодический режим

Электродвигатель, предназначенный для периодического режима работы, имеет номинальные характеристики, позволяющие ему выполнять определенную последовательность рабочих циклов. В данном типичном режиме цикл работы двигателя с нагрузкой не позволяет машине достичь установившейся температуры всех частей. Этот набор номинальных данных связан с определенным типовым режимом от S3 до S8, а полное обозначение позволяет точно определить параметры периодического режима. Если не указано иное, то продолжительность рабочего цикла составляет 10 минут, а коэффициент ПВ% принимает одно из следующих значений: 15, 25, 40 или 60%. Коэффициент ПВ% определяется как отношение продолжительности работы двигателя с нагрузкой, включая пуск и электрическое торможение, к общей продолжительности рабочего цикла и выражается в процентах.

Типовой режим работы S3 можно рассматривать как последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых включает в себя время работы при постоянной нагрузке и время покоя. В этом режиме цикл работы таков, что пусковой ток не оказывает существенного влияния на повышение температуры электродвигателя. Полное обозначение состоит из кода S3, после которого указывается коэффициент ПВ% (например, S3 30 %).

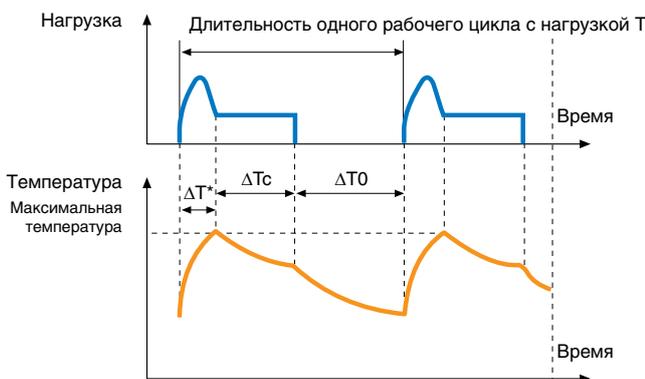
Периодический повторно-кратковременный режим: Типовой режим работы S3



$\Delta T_c$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta T_0$ : время покоя  
 Коэффициент ПВ% =  $\Delta T_c / T$

Типовой режим работы S4 можно рассматривать как последовательность одинаковых циклов работы, каждый из которых содержит относительно длинный пуск, время работы с постоянной нагрузкой и время покоя. Полное обозначение типового режима состоит из кода S4, после которого указываются коэффициент ПВ%, момент инерции двигателя  $J_M$  и момент инерции нагрузки  $J_L$ , причем оба момента отнесены к валу двигателя (например, S4 20%  $J_M = 0,15 \text{ кг м}^2$ ,  $J_L = 0,7 \text{ кг м}^2$ ).

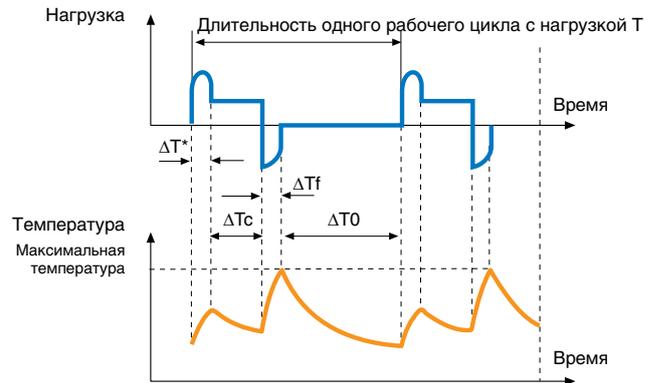
Периодический повторно-кратковременный режим с длинными пусками. Типовой режим работы S4



$\Delta T^*$ : время пуска (разгона)  
 $\Delta T_c$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta T_0$ : время состояния покоя  
 Коэффициент ПВ% =  $(\Delta T^* + \Delta T_c) / T$

Типовой режим работы S5 можно рассматривать как последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из времени пуска, времени работы с постоянной нагрузкой, времени динамического торможения и времени покоя. Полное обозначение типового режима состоит из кода S5, после которого указываются такие же данные, что и в обозначении режима S4.

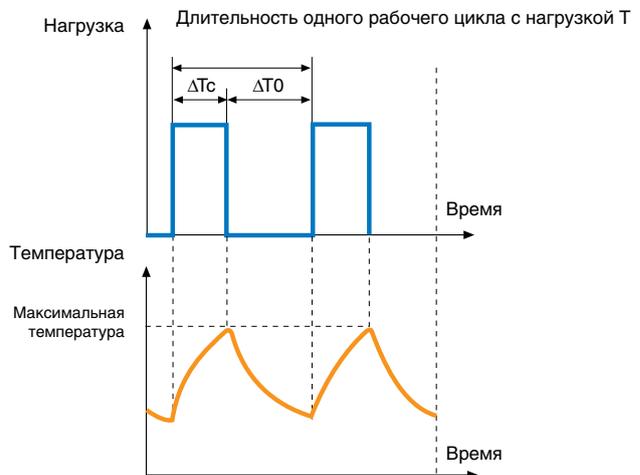
Периодический повторно-кратковременный режим с динамическим торможением. Типовой режим работы S5



$\Delta T^*$ : время пуска (разгона)  
 $\Delta T_c$ : время работы с постоянной нагрузкой  
 $\Delta T_f$ : время динамического торможения  
 $\Delta T_0$ : время покоя  
 Коэффициент ПВ% =  $(\Delta T^* + \Delta T_c + \Delta T_f) / T$

Типовой режим работы S6 можно рассматривать как последовательность одинаковых рабочих циклов работы, каждый из которых состоит из времени работы при неизменной нагрузке и времени работы на холостом ходу. Время покоя отсутствует. Полное обозначение типового режима состоит из кода S6, после которого указывается коэффициент ПВ% (например, S6 30%).

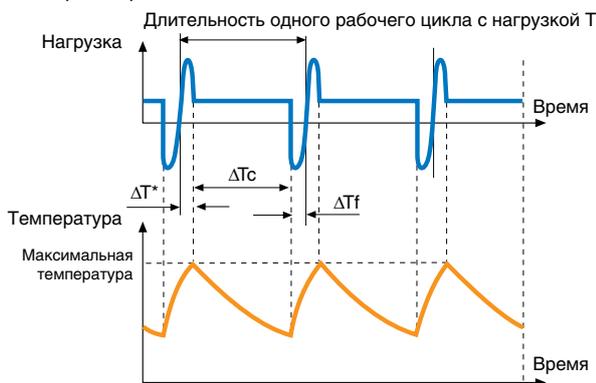
Периодический непрерывный режим с кратковременной нагрузкой: типовой режим работы S6



$\Delta T_c$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta T_0$ : время работы на холостом ходу  
 Коэффициент ПВ% =  $\Delta T_c / \Delta T_0$

Типовой режим работы S7 можно рассматривать как последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из пуска, работы при постоянной нагрузке и динамического торможения. Время покоя отсутствует. Полное обозначение типового режима состоит из кода S7, после которого указывается момент инерции двигателя  $J_M$  и момент инерции нагрузки  $J_L$ , которые отнесены к валу двигателя (например, S7  $J_M = 0,4 \text{ кг м}^2$ ,  $J_L = 7,5 \text{ кг м}^2$ ).

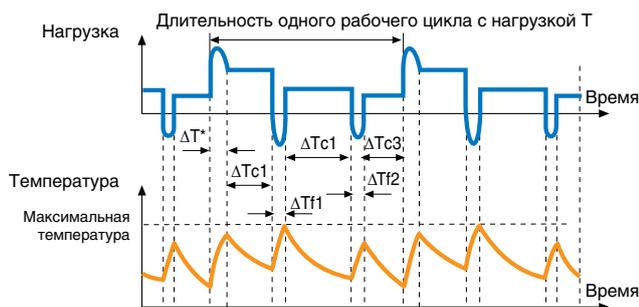
Периодический непрерывный режим с динамическим торможением: типовой режим работы S7



$\Delta T^*$ : время пуска  
 $\Delta Tc$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta Tf$ : время динамического торможения  
 Коэффициент ПВ% = 1

Типовой режим работы S8 можно рассматривать как последовательность одинаковых рабочих циклов, где каждый цикл состоит из работы при постоянной нагрузке, соответствующей заданной частоте вращения, за которым следует один или более периодов работы при других постоянных нагрузках, соответствующих различным частотам вращения. Время покоя отсутствует. Полное обозначение типового режима состоит из кода S8, после которого указывается момент инерции двигателя  $J_M$  и момент инерции нагрузки  $J_L$ , которые отнесены к валу двигателя, а также нагрузка и коэффициент относительной продолжительности включения для каждой частоты вращения (например, S8  $J_M = 0,7 \text{ кг м}^2$ ,  $J_L = 8 \text{ кг м}^2$ , 25 кВт, 800 об/м, 25% 40 кВт, 1250 об/мин, 20%, 25 кВт, 1000 об/мин, 55%).

Периодический непрерывный режим с взаимозависимыми изменениями нагрузки и частоты вращения: типовой режим работы S8

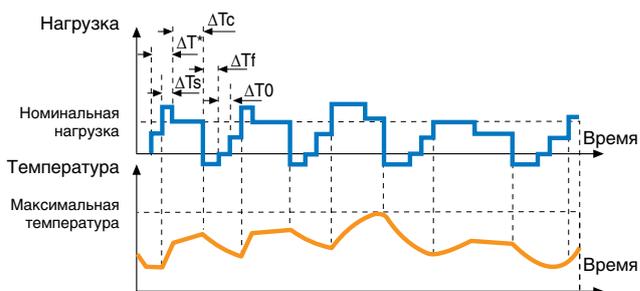


$\Delta T^*$ : время пуска  
 $\Delta Tc1$ ;  $\Delta Tc2$ ;  $\Delta Tc3$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta Tf1$ ;  $\Delta Tf2$ : время динамического торможения  
 Коэффициент ПВ% =  $(\Delta T^* + \Delta Tc1)/T$ ;  $(\Delta Tf1 + \Delta Tc2)/T$ ;  $(\Delta Tf2 + \Delta Tc3)/T$

### Непериодический режим:

Электродвигатель, предназначенный для непериодического режима работы, имеет номинальные характеристики, позволяющие ему работать с непериодическими изменениями нагрузки и частоты вращения. Этот класс номинальных характеристик соответствует типовому режиму работы, обозначаемому кодом S9. Типовой режим работы S9 можно рассматривать как режим, при котором нагрузка и частота вращения изменяются непериодически в допустимом рабочем диапазоне. Этот режим работы предусматривает частое воздействие перегрузок, которые могут значительно превосходить номинальную нагрузку.

Режим работы с непериодическими изменениями нагрузки и частоты вращения: типовой режим работы S9



$\Delta T^*$ : время пуска  
 $\Delta Ts$ : время работы при перегрузке  
 $\Delta Tc$ : время работы при постоянной нагрузке  
 $\Delta Tf$ : время динамического торможения  
 $\Delta T0$ : время покоя

### Режим работы с дискретными постоянными нагрузками и частотами вращения

Двигатель, предназначенный для данного режима работы, имеет номинальные характеристики, позволяющие ему работать в режиме, состоящем из ограниченного числа дискретных нагрузок, при этом каждая нагрузка действует достаточно длительное время, за которое двигатель достигает практически установившегося теплового состояния.

Должно учитываться воздействие максимально допустимой нагрузки, действующей в течение одного цикла, на части машины (систему изоляции, подшипники или других части, испытывающие тепловое воздействие).

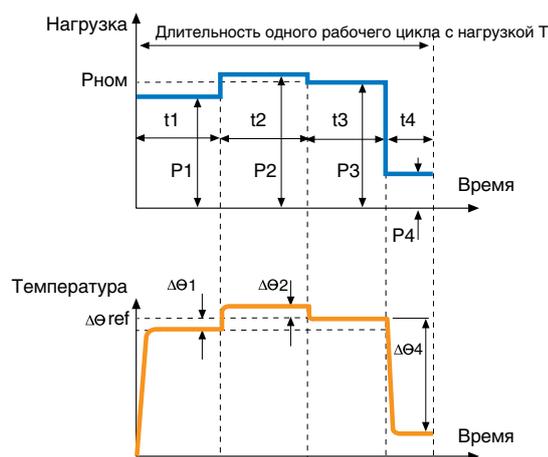
Максимальная нагрузка не должна превышать 1,15 значения нагрузки, рассчитанной для типового режима S1. Другие ограничения в отношении максимальной нагрузки связаны с предельной температурой обмотки. Минимальная нагрузка в течение рабочего цикла может иметь нулевое значение, если двигатель работает на холостом ходу или остановлен и находится в состоянии покоя. Этот класс номинальных характеристик соответствует типовому режиму работы, обозначаемому кодом S10.

Полное обозначение типового режима состоит из кода S10, после которого указываются следующие параметры:  $p/\Delta t$  ( $p$  – соответствующая нагрузка в долях базовой нагрузки и  $\Delta t$  – ее продолжительность в долях продолжительности полного цикла нагрузки) и относительная величина ожидаемого термического срока службы  $T_L$  изоляционной системы. Нормативной базовой величиной для оценки ожидаемого термического срока службы изоляции является ожидаемый термический срок службы при номинальной мощности и допуске превышения температуры, соответствующих продолжительному типовому режиму S1. (например, S10  $p/\Delta t = 1,1/0,4; 1/0,3; 0,9/0,2; r/0,1$   $T_L = 0,6$ ).

### Режим работы при эквивалентной нагрузке

Электродвигатель, предназначенный для данного режима работы, имеет подтвержденные испытаниями номинальные характеристики, позволяющие ему работать при постоянной нагрузке до достижения установившегося теплового состояния в результате роста температуры обмоток статора будет равен среднему росту температуры в течение одного цикла нагрузки указанного типового режима. Этот класс номинальных характеристик соответствует типовому режиму работы, обозначаемому кодом «eq».

Режим работы с дискретными постоянными нагрузками и частотами вращения. Типовой режим работы S10



$\Delta\theta_1; \Delta\theta_2; \Delta\theta_4$ : разность между превышением температуры обмотки на каждой нагрузке в течение одного цикла и превышением температуры, при базовой нагрузке в режиме работы S1.

$\Delta\theta_{ref}$ : температура при номинальной нагрузке в типовом режиме S1;  
 $t_1; t_2; t_3; t_4$ : время работы с постоянной нагрузкой внутри цикла нагрузки;  
 $P_1; P_2; P_3; P_4$ : постоянная часть нагрузки внутри одного цикла нагрузки;  
 $P_{ном}$ : номинальная нагрузка для типового режима S1

## Глоссарий

$I_r$	уставка по току тепловой защиты
$T_i$	время срабатывания тепловой защиты
$V_L$	напряжение между двумя линейными проводникам сети (линейное напряжение)
$Z_w$	полное сопротивление обмотки
$I_e$	номинальный ток двигателя
$I_w$	ток в обмотках двигателя при стандартных условиях
$I^*w$	ток в обмотках двигателя при аномальных условиях
$P_e$	номинальная мощность двигателя
$I_{sp}$	ударный пусковой ток, равный $12 \times I_e$
$I_{av}$	пусковой ток, равный $7,2 \times I_e$
$I_3$	уставка магнитного расцепителя
$I_n$	номинальный ток реле
$\eta$	номинальный КПД
$\cos\varphi$	номинальный коэффициент мощности
$Y$	схема соединения звездой
$\Delta$	схема соединения треугольником
$n_0$	синхронная частота вращения или частота вращения магнитного поля статора
$f$	частота питающей сети
$p$	число пар полюсов
$n$	частота вращения ротора
$n_s$	скорость скольжения
$s$	скольжение
$C_M$	вращающий момент двигателя
$C_L$	момент сопротивления нагрузки
$C_a$	динамический момент
$t_a$	время пуска
$J_M$	момент инерции двигателя
$J_L$	момент инерции нагрузки
$\omega$	угловая скорость двигателя
$\frac{d\omega}{dt}$	угловое ускорение
$C_s$	пусковой момент
$C_{max}$	максимальный момент
$C_{acc}$	значение динамического момента в момент пуска двигателя
$K_L$	коэффициент для расчета момента сопротивления нагрузки
$S..$	типовой режим работы
$\varphi_i$	угол сдвига фаз тока
$\varphi_v$	угол сдвига фаз напряжения
$\varphi_w$	угол сдвига фаз общего сопротивления обмоток

## Статьи о техническом применении



### QT1

Селективность автоматических выключателей АББ в сетях низкого напряжения

### QT2

Выбор электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций в сетях среднего/низкого напряжения

### QT3

Системы распределения электроэнергии, защита при косвенном прикосновении и защита от замыкания на землю

### QT4

Методические рекомендации по выбору и размещению автоматических выключателей в распределительных сетях 0,4 кВ и низковольтных комплектных устройствах

### QT5

Автоматические выключатели АББ для применений на постоянном токе

### QT6

Низковольтные комплектные устройства с защитой от электрической дуги

### QT7

Трехфазные асинхронные двигатели. Общие сведения и координация аппаратов АББ

### QT8

Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках

**Для заметок**

**Для заметок**



# Наши координаты

**117997, Москва,**  
ул. Обручева, 30/1, стр. 2  
Тел.: +7 495 960 2200  
Факс: +7 495 960 2220

**193029, Санкт-Петербург,**  
Б. Смоленский пр., 6  
Тел.: +7 812 326 9915  
Факс: +7 812 326 9916

**400005, Волгоград**  
пр. Ленина, 86  
Тел.: +7 8442 24 3700  
Факс: +7 8442 24 3700

**394006, Воронеж,**  
ул. Свободы, 73  
Тел.: +7 473 239 3160  
Факс: +7 473 239 3170

**620066, Екатеринбург,**  
ул. Бархотская, 1  
Тел.: +7 343 369 0069  
Факс: +7 343 369 0000

**664033, Иркутск,**  
ул. Лермонтова, 257  
Тел.: +7 3952 56 2200  
Факс: +7 3952 56 2202

**420061, Казань,**  
ул. Н. Ершова, 1 а  
Тел.: +7 843 279 3330  
Факс: +7 843 279 3331

**350049, Краснодар,**  
ул. Красных Партизан, 218  
Тел.: +7 861 221 1673  
Факс: +7 861 221 1610

**603140, Нижний Новгород,**  
Мотальный пер., 8  
Тел.: +7 831 461 9102  
Факс: +7 831 461 9164

**630073, Новосибирск,**  
пр. Карла Маркса, 47/2  
Тел.: +7 383 346 5719  
Факс: +7 383 315 4052

**614077, Пермь,**  
ул. Аркадия Гайдара, 86  
Тел.: +7 342 263 4334  
Факс: +7 342 263 4335

**344065, Ростов-на-Дону,**  
ул. 50-летия Ростсельмаша, 1/52  
Тел.: +7 863 203 7177  
Факс: +7 863 203 7177

**443010, Самара,**  
ул. Красноармейская, 1  
Тел.: +7 846 269 8047  
Факс: +7 846 269 8046

**354002, Сочи,**  
Курортный проспект, 73  
Тел.: +7 8622 62 5048  
Факс: +7 8622 62 5602

**450071, Уфа,**  
ул. Рязанская, 10  
Тел.: +7 347 232 3484  
Факс: +7 347 232 3484

**680000, Хабаровск,**  
ул. Муравьева-Амурского, 44  
Тел.: +7 4212 30 2335  
Факс: +7 4212 30 2327

**693000, Южно -Сахалинск,**  
ул. Курильская, 38,  
Тел.: +7 4242 49 7155  
Факс: +7 4242 49 7155

По вопросам заказа оборудования обращайтесь к нашим официальным дистрибьюторам: <http://www.abb.ru/lowvoltage>