

Пуск и защита двигателей переменного тока

- Системы пуска и торможения двигателей переменного тока
- Устройства защиты и анализ неисправностей двигателей переменного тока
- Руководство по выбору устройств защиты

4.1	Системы пуска асинхронного двигателя	62
4.2	Электрическое торможение трехфазных асинхронных двигателей	69
4.3	Многофункциональные пускатели двигателей	74
4.4	Защита двигателя	76
4.5	Потери в двигателе и нагрев	77
4.6	Причины неисправностей и их последствия	77
4.7	Функции защиты	83

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

C

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

Настоящий раздел посвящен системам пуска и торможения асинхронных двигателей всех типов.

Защита двигателя необходима для обеспечения надлежащей работы машин и оборудования.

Технология, регулирование скорости и пуск здесь описаны кратко, подробные описания находятся в соответствующих разделах настоящего Руководства.

В данном разделе защита обслуживающего персонала не затрагивается. Эту информацию можно найти в соответствующих изданиях. Эта тема рассмотрена в Руководстве по устройству электроустановок, опубликованном Schneider Electric.

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

■ Введение

При прямом пуске двигателей, в сети возникают большие броски тока, которые могут стать причиной падения напряжения (особенно если секция линии питания не соответствует требованиям), что может повлиять на функционирование потребителей. Это падение может быть достаточно большим, тогда оно заметно при работе систем освещения. Чтобы не допустить этого, правила запрещают использовать прямой пуск двигателей, мощность которых выше определенных значений: см. каталог Distribution BT Schneider Electric и таблицы падений напряжения по стандарту NF C 15-100.

Существует несколько систем пуска, которые отличаются в зависимости от типа двигателя и нагрузки.

Выбор определяется электрическими, механическими и экономическими факторами.

При выборе системы пуска важен и тип нагрузки.

■ Основные режимы пуска

□ Прямой пуск

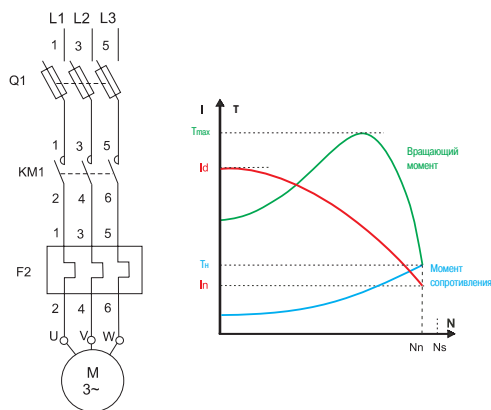
Это самый простой режим, в котором статор непосредственно соединен с питающей сетью (⇒ Рис. 1). Двигатель запускается по естественной характеристике.

В момент включения двигатель работает как трансформатор с короткозамкнутой вторичной обмоткой, образованной клеткой ротора с очень маленьким сопротивлением. В роторе появляется высокий наведенный ток, что влечет за собой кратковременный бросок тока в питающей сети: ток при пуске в 5 - 8 раз больше номинального значения.

Средний пусковой крутящий момент T при запуске равен 0,5 - 1,5 номинального момента T_n .

Несмотря на преимущества (простое по конструкции оборудование, высокий пусковой крутящий момент, быстрый запуск, низкая стоимость), система прямого пуска является подходящей только в случаях, когда:

- мощность двигателя мала по сравнению с мощностью сети, что ограничивает вредное воздействие от броска тока;
- приводимая в движение машина не требует постепенного разгона или имеет демпфирующее устройство для сглаживания толчка при пуске;
- пусковой крутящий момент может быть высоким без последствий, для работы машины или нагрузки, которые приводятся в движение.



↑ Рис. 1

Прямой пуск

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

□ Пуск переключением со звезды на треугольник

Эта система пуска (⇒ Рис. 2) может использоваться только с двигателем, в котором оба конца каждой из его трех обмоток статора выведены на клеммную колодку. Более того, обмотка должна быть выполнена так, чтобы соединение треугольником соответствовало напряжению сети, например, для трехфазной сети питания 380 В потребуются двигатель с обмоткой на 380 В по схеме треугольник и на 660 В по схеме звезда.

Принцип заключается в запуске двигателя посредством подключения обмоток, соединенных по схеме звезды, к напряжению сети, которое в $\sqrt{3}$ раз ниже номинального напряжения двигателя подключенного по схеме звезда (в указанном выше примере напряжение сети 380 В = 660 В / $\sqrt{3}$).

Пиковое значение пускового тока (SC) при этом в 3 раза меньше:
 $SC = (1,5 - 2,6) RC$ (где RC - номинальный ток).

Двигатель 380/660 В соединенный звездой, при номинальном напряжении 660 В потребляет ток в $\sqrt{3}$ раза меньше, чем при соединении треугольником при 380 В. При соединении звездой и напряжении 380 В, ток снова делится на $\sqrt{3}$, т.е., в итоге, на 3.

Так как пусковой крутящий момент (ST) пропорционален квадрату напряжения питания, он также делится на 3:

$$ST = (0,2 - 0,5) RT \text{ (где } RT \text{ - номинальный крутящий момент)}$$

Скорость двигателя стабилизируется, когда крутящий момент двигателя и момент сопротивления уравниваются, это обычно достигается при 75-85% номинальной скорости. Затем обмотки подключаются по схеме треугольник, и двигатель выходит на естественную характеристику. Переключение со звезды на треугольник регулируется таймером. Контакттор схемы треугольник включается через 30 - 50 миллисекунд после размыкания контактора схемы звезды, это предотвращает короткое замыкание между фазами, так как два контактора не должны включаться одновременно.

Ток через обмотки прекращает протекать, когда выключается контактор схемы звезда, и восстанавливается, когда включается контактор схемы треугольник. При переключении на схему треугольник возникает короткий, но большой пик тока вследствие противоЭДС двигателя.

Пуск переключением со звезды на треугольник подходит для механизмов с низким моментом сопротивления или для машин, которые запускаются без нагрузки (например, машины для валки леса). Для ограничения тока переходного процесса для больших мощностей двигателей могут потребоваться другие способы управления. Одним из них является задержка на 1-2 секунды при переключении обмоток двигателя со звезды на треугольник.

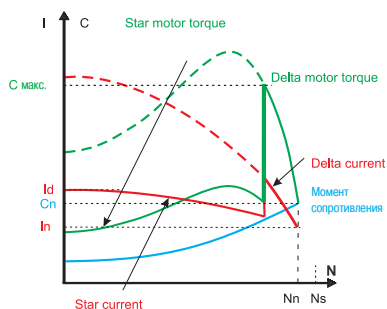
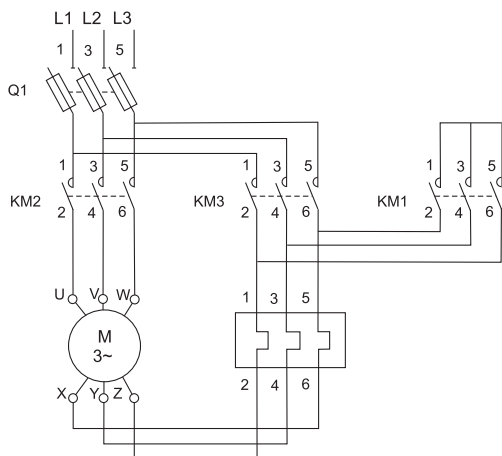
Такая задержка ослабляет противоЭДС и, следовательно, уменьшает пиковое значение переходного тока.

Этот способ может использоваться, только если машина обладает достаточной инерцией для предотвращения слишком большого снижения скорости при задержке.

Другой системой является 3-шаговый запуск: звезда-(треугольник + сопротивление)-треугольник.

Здесь по-прежнему есть размыкание, но резистор, включенный последовательно с обмотками, подключенными по схеме треугольник примерно на 3 секунды, снижает переходный ток. Это предотвращает разрыв тока и, таким образом, предотвращает возникновение переходных процессов.

Использование данных вариантов управления предполагает наличие дополнительного оборудования, что может повлечь за собой значительное увеличение стоимости.

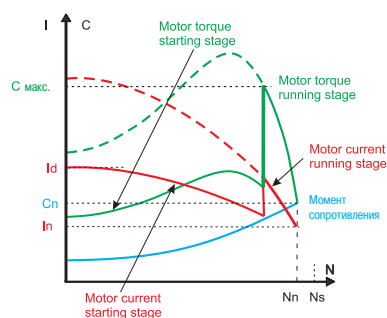
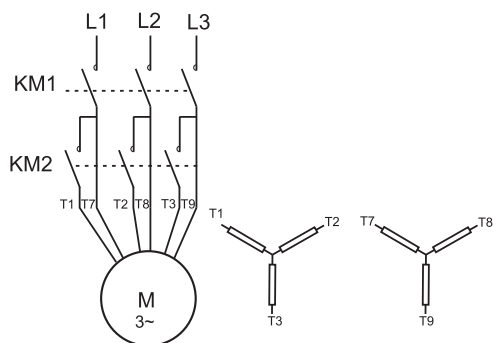


↑ Рис. 2

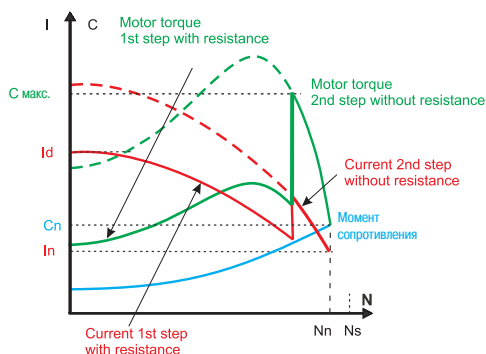
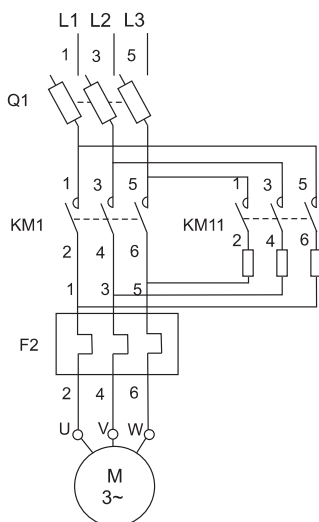
Пуск звезда-треугольник

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя



↑ Рис. 3 Пуск с использованием части обмоток



↑ Рис. 4 Реостатный пуск с помощью введения сопротивления в цепь статора

□ Пуск двигателя с использованием части обмоток

Эта система (⇒ Рис. 3) не часто используется в Европе, но весьма востребована на рынке Северной Америки (напряжение 230/460 В, соотношение 1:2). Этот тип двигателей имеет обмотку пускателя, разделенную на две параллельные обмотки с шестью или двенадцатью выходными клеммами. Он аналогичен двум «полудвигателям» равной мощности.

При запуске один «полудвигатель» подключен непосредственно на полное напряжение сети, при этом пусковой ток и крутящий момент примерно в два раза меньше номинальных. Однако в этом случае крутящий момент больше, чем он был бы у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с пуском переключением со звезды на треугольник.

В конце процесса пуска вторая обмотка подключается к сети. В этот момент пик тока незначительный и кратковременный, так как двигатель не был отключен от сети питания и работал с небольшим скольжением.

□ Реостатный пуск с помощью сопротивления в цепи статора

При использовании этой системы (⇒ Рис. 4) двигатель запускается при пониженном напряжении, так как последовательно с обмотками подключены резисторы. Когда скорость стабилизируется, резисторы отключаются, и двигатель подключается непосредственно к сети. Этот процесс обычно регулируется таймером.

Этот метод запуска не изменяет способ соединения обмоток двигателя, так что для концов каждой обмотки не требуется вывод на клеммную колодку.

Значение сопротивления рассчитывается согласно максимальному пиковому значению тока при запуске или минимальному пусковому крутящему моменту, необходимому для создания момента сопротивления для запуска машины. Пусковой ток и крутящий момент обычно равны:

- $SC = 4,5 RC$
- $ST = 0,75 RT$

На этапе ускорения двигателя с резисторами в цепи статора напряжение, подаваемое на клеммы двигателя, не является постоянным. Оно равно разности напряжения сети и падения напряжения на пусковом сопротивлении.

Падение напряжения пропорционально току, потребляемому двигателем. Так как ток уменьшается при разгоне двигателя, то же самое происходит с падением напряжения на сопротивлении. Напряжение, приложенное к клеммам двигателя, имеет поэтому самое низкое значение при запуске, а затем постепенно увеличивается.

Так как крутящий момент пропорционален квадрату напряжения на клеммах двигателя, он увеличивается быстрее, чем при запуске методом переключения со звезды на треугольник, когда напряжение остается постоянным во время включения в звезду.

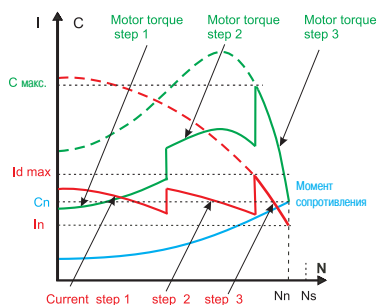
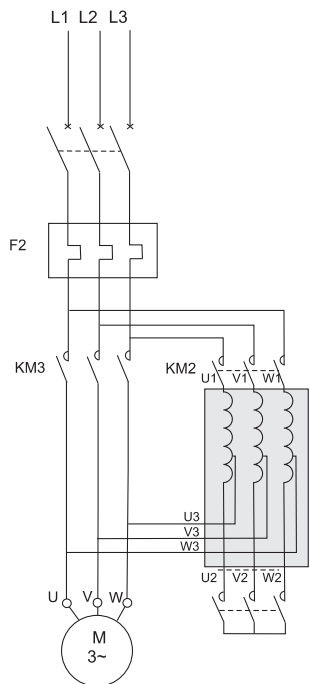
Поэтому эта система пуска подходит для механизмов с моментом сопротивления нагрузки, который увеличивается с ростом скорости, например, для вентиляторов и центробежных насосов.

У нее есть недостаток, заключающийся в достаточно высоком пиковом значении тока при пуске. Его можно снизить путём увеличения значения сопротивления резисторов, но это вызовет дальнейшее падение напряжения на клеммах двигателя и, как следствие, падение пускового крутящего момента.

С другой стороны, сопротивление в конце пуска отключается без прерывания питания двигателя, поэтому отсутствует переходный процесс.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя



↑ Рис. 5

Пуск через автотрансформатор

□ Пуск через автотрансформатор

Двигатель получает питание пониженным напряжением через автотрансформатор, который шунтируется, когда закончен процесс пуска (⇒ Рис. 5).

Процесс пуска состоит из следующих трех этапов:

- Вначале автотрансформатор соединяется звездой, затем двигатель подключается к сети через часть обмоток автотрансформатора. Разгон проходит при пониженном напряжении, которое зависит от коэффициента трансформации. Обычно автотрансформатор секционируют, чтобы можно было выбрать наиболее подходящий коэффициент трансформации обеспечив требуемое напряжение.
- Перед переходом на полное напряжение соединение автотрансформатора звездой размыкается. Части обмоток автотрансформатора, подключенных к сети, действуют как катушки индуктивности, соединённые последовательно со статором двигателя. Эта коммутация производится, когда скорость в конце первого этапа стабилизируется.
- Подключение полного напряжения выполняется после второго этапа, который обычно длится только доли секунды. Часть обмотки автотрансформатора последовательно с двигателем замыкается накоротко и автотрансформатор отключается.

Ток и пусковой крутящий момент варьируются в таком же соотношении. Они определяются соотношением «напряжение сети, деленное на квадрат пониженного напряжения».

Получаемые значения:

$$SC = (\text{от } 1,7 \text{ до } 4)RC$$

$$ST = (\text{от } 0,5 \text{ до } 0,85)RT$$

Процесс пуска проходит без разрыва тока в цепи статора двигателя, поэтому не возникает скачков в переходном процессе.

Тем не менее, если не принят ряд мер, подобные переходные процессы могут возникнуть при подключении полного напряжения сети, так как значение индуктивности, подключенной последовательно с двигателем, высоко по сравнению со значением индуктивности двигателя после того, как размыкается схема звезды автотрансформатора. Это приводит к падению напряжения, которое вызывает высокий пик переходного тока при подключении полного напряжения.

Для устранения этого недостатка магнитная цепь в автотрансформаторе имеет воздушный зазор, который способствует снижению индуктивности. Это значение рассчитывается, чтобы предотвратить изменение напряжения на клеммах двигателя, когда схема звезда размыкается на втором этапе.

Воздушный зазор вызывает увеличение тока намагничивания в автотрансформаторе. Этот ток повышает бросок тока в питающей сети, при подаче питания на автотрансформатор.

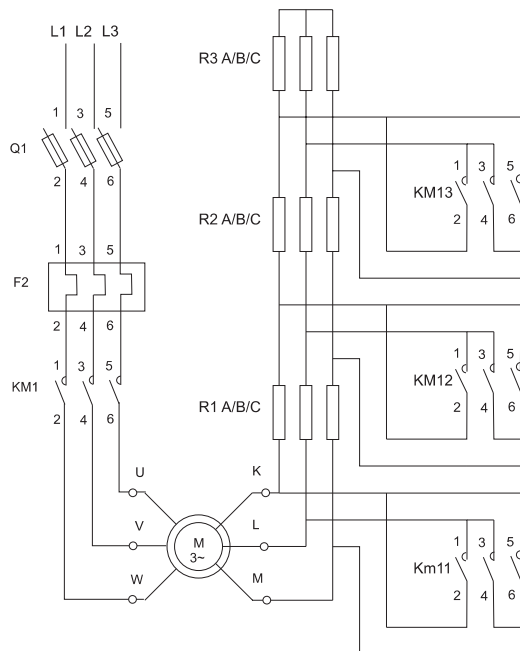
Эта система запуска обычно используется в двигателях низкого напряжения и мощностью выше 150 кВт. Однако это увеличивает стоимость оборудования из-за высокой стоимости автотрансформатора.

□ Пуск двигателя с контактными кольцами

Двигатель с контактными кольцами не может быть запущен напрямую при короткозамкнутых обмотках ротора, так как это может вызвать недопустимые пиковые значения пускового тока. Поэтому в цепь ротора должны быть включены резисторы (⇒ Рис. 6), и затем они должны постепенно шунтироваться, в то время, как статор двигателя подключен к полному напряжению сети.

Контакты в цепи ротора работают согласованно с контактором статора, и поэтому они размыкаются после него, как только напряжение на роторе полностью или практически исчезнет.

Эти контакты позволяют ограничить пусковой ток ротора до величины (1,5 – 2,5 от номинального тока ротора) и размыкают цепь ротора при обесточенной цепи. На рисунке изображено подключение контакторов (называемое W), позволяющее использовать контакторы с номиналом в 1,6 раз меньше номинального тока.



↑ Рис. 6

Пуск двигателя с контактными кольцами

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

Для обеспечения точного соответствия кривой зависимости скорости от вращающего момента рассчитываются сопротивления резисторов, включенных в каждую фазу. При пуске они должны быть полностью подключены, а когда они окончательно закорочены, достигается полная скорость.

Потребляемый ток двигателя ненамного превышает расчётное значение и приблизительно пропорционален крутящему моменту.

Например, для пускового крутящего момента, равного $2 RT$, пик тока составляет около $2 RC$. Этот пик тока намного меньше, а максимальный пусковой крутящий момент намного выше, чем для двигателя с короткозамкнутым ротором, где типовые значения около $6 RC$ для $1.5 RT$ при прямом пуске. Двигатель с контактными кольцами является лучшим выбором для тех случаев, когда пики тока при пуске должны быть низкими, и для машин, которые запускаются при полной нагрузке.

Этот тип пуска является плавным, так как легко подобрать количество и форму кривых, характеризующих последовательные этапы пуска с точки зрения требований к механическим и электрическим параметрам (момент сопротивления, значение ускорения, максимальный ток и т.д.).

□ Пуск/останов с устройством плавного пуска

Это эффективная система пуска (⇒ *Рис. 7*) для обеспечения плавного пуска и остановки двигателя (более подробно см. в разделе по преобразователям частоты).

Она может использоваться для обеспечения:

- ограничения тока двигателя;
- регулирования крутящего момента.

Регулирование путём ограничения тока задает максимальный пусковой ток $(3 - 4) \times RC$ и снижает характеристики крутящего момента. Это регулирование особенно подходит для «турбомашин» (центробежные насосы, вентиляторы).

Регулирование изменением крутящего момента оптимизирует крутящий момент в процессе пуска и снижает броски тока сети. Это подходит для механизмов с постоянным моментом сопротивления нагрузки.

Этот тип пускателя может иметь много разных схем:

- пуск двигателя;
- пуск и останов двигателя;
- шунтирование устройства в конце процесса пуска;
- пуск и останов нескольких двигателей в каскадных схемах (⇒ *Рис. 7*) и т.д.

□ Пуск с использованием преобразователя частоты

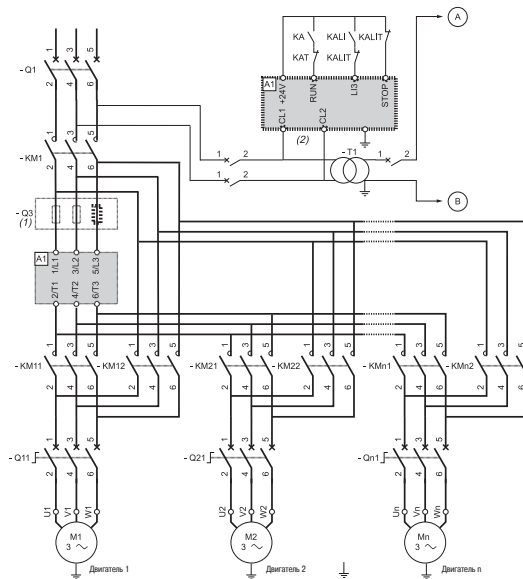
Это эффективная система пуска (⇒ *Рис. 8*) используется для контроля и регулирования скорости (более подробно см. раздел по преобразователям частоты).

Может использоваться для следующих применений:

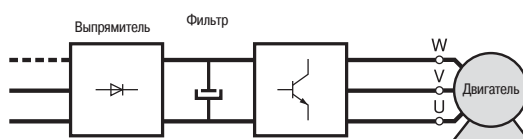
- пуск при нагрузках с большой инерцией;
- пуск больших нагрузок с источниками питания ограниченной мощности;
- оптимизация потребления электроэнергии в зависимости от скорости «турбомашин».

Рассматриваемая система пуска может использоваться для всех типов механизмов.

Это решение в основном используется для регулирования скорости двигателя, запуск является побочной целью.



↑ *Рис. 7* Запуск нескольких двигателей устройством плавного пуска



↑ *Рис. 8* Рабочая схема преобразователя частоты

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

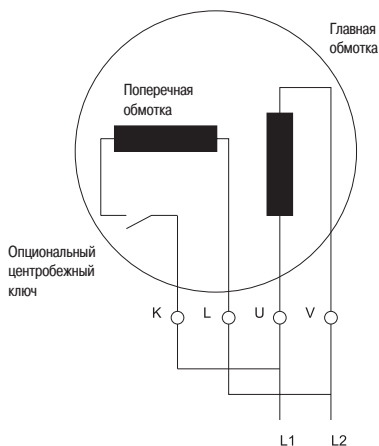
4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

□ Сводная таблица систем пуска трехфазного двигателя (⇒ Рис. 9)

	Прямой пуск	Звезда-треугольник	Часть обмотки	Резисторы	Автотрансформаторы	Двигатели с контактными кольцами	Устройство плавного пуска	Преобразователь частоты
Двигатель	Стандартный	Стандартный	6-обмоточный	Стандартный	Стандартный	Specific	Стандартный	Стандартный
Стоимость	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++
Пусковой ток двигателя	5 - 10 RC	2 - 3 RC	2 RC	Примерно 4.5 RC	1.7 - 4 RC	Примерно 2 RC	4 - 5 RC	RC
Просадка напряжения	Высокая	Высокая при смене подключения	Низкая	Низкая	Низкая; аккуратно на соединениях DOL	Низкая	Низкая	Низкая
Гармонические составляющие тока и напряжения	Высокие	Умеренные	Умеренные	Умеренные	Умеренные	Низкие	Высокие	Высокие
Коэффициент мощности	Низкий	Низкий	Умеренный	Умеренный	Низкий	Умеренный	Низкий	Высокий
Количество возможных запусков	Ограниченное	В 2-3 раза больше, чем DOL	В 3-4 раза больше, чем DOL	В 3-4 раза больше, чем DOL	В 3-4 раза больше, чем DOL	В 2-3 раза больше, чем DOL	Ограниченное	Высокое
Возможный крутящий момент	Примерно 2.5 RT	0.2 - 0.5 RT	2 RT	RT	Примерно 0.5 RT	Примерно 2 RT	Примерно 0.5 RT	1.5 - 2 RT
Температурное напряжение	Очень высокое	Высокое	Умеренное	Высокое	Умеренное	Умеренное	Умеренное	Низкое
Механический удар	Очень высокий	Умеренный	Умеренный	Умеренный	Умеренный	Низкий	Умеренный	Низкий
Рекомендуемый ток нагрузки	Любой	Нет нагрузки	Возрастающий момент	Насосы и вентиляторы	Насосы и вентиляторы	Любой	Насосы и вентиляторы	Небольшой
Высокоинерционные нагрузки	Да*	Нет	Нет	Нет				

* При этой системе пуска требуется специально определять мощность двигателя.

↑ Рис. 9 Сводная таблица



↑ Рис. 10 Однофазный двигатель со вспомогательной фазой

□ Пуск однофазного двигателя

Однофазный двигатель не может запуститься сам, поэтому существует несколько способов его пуска.

□ Пуск с помощью вспомогательной фазы

Двигатели этого типа (⇒ Рис. 10) имеют статор с двумя обмотками, сдвинутыми на 90°.

При включении, из-за того, что катушки сделаны разными, ток С1 идет по главной фазе, а более слабый ток С2, смещенный на $\pi/2$, циркулирует во вспомогательной фазе. Наведенные поля создаются двумя токами, которые сдвинуты по фазе относительно друг друга, поэтому получившееся вращающееся поле является достаточно сильным для запуска двигателя без нагрузки. При достижении двигателем примерно 80% скорости вспомогательная фаза может быть отключена (центробежный выключатель) или может оставаться в работе. Таким образом, двигатель работает как двухфазный или при пуске, или постоянно.

Чтобы изменить направление вращения, выводные концы одной из фаз необходимо поменять местами.

Так как пусковой крутящий момент низкий, его можно увеличить путем увеличения смещения между двумя полями, создаваемыми статорными обмотками.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.1 Системы пуска асинхронного двигателя

□ Пуск с помощью сопротивления в цепи вспомогательной фазы

Резистор, подсоединенный последовательно со вспомогательной фазой, увеличивает её импеданс, создавая смещение между токами C1 и C2.

Работа в конце процесса пуска такая же, как и со вспомогательной фазой в предыдущем примере.

□ Пуск с помощью катушки индуктивности в цепи вспомогательной фазы

Действует так же, как и указано выше, но резистор заменен на катушку индуктивности, включенную последовательно со вспомогательной фазой для увеличения смещения между двумя токами.

□ Пуск с помощью конденсатора в цепи вспомогательной фазы

Это наиболее распространенное устройство (⇒ *Рис. 11*), в котором конденсатор устанавливается в цепь вспомогательной фазы. Величина ёмкости конденсатора для постоянной работы составляет примерно 8 мкФ для двигателя мощностью 200 Вт. Для пуска может потребоваться дополнительный конденсатор 16 мкФ, который отключается, когда завершается процесс пуска.

Поскольку конденсатор создает сдвиг фаз, который является противоположным сдвигу фаз на катушке индуктивности, то при пуске и работе, двигатель работает как двухфазный с вращающимся полем. Крутящий момент и коэффициент мощности высокие. Пусковой крутящий момент ST приблизительно в три раза выше, чем рабочий крутящий момент RT, при этом максимальный крутящий момент достигает значения 2 RT.

При окончании пуска, необходимо поддержать сдвиг фаз между токами, емкость конденсатора может быть снижена, так как полное сопротивление статора увеличилось.

На схеме (⇒ *Рис. 11*) показан однофазный двигатель с постоянно подключенным конденсатором. Существуют другие схемы, такие как схемы размыкания фазосдвигающей цепи с помощью центробежного выключателя при достижении заданной скорости.

Трехфазный двигатель (230/400 В) может использоваться с однофазным питанием 230 В, если он оборудован пусковым конденсатором и постоянно подключенным рабочим конденсатором. Такое использование снижает полезную мощность (снижение номинальных значений составляет примерно 0,7), пусковой крутящий момент и тепловой запас.

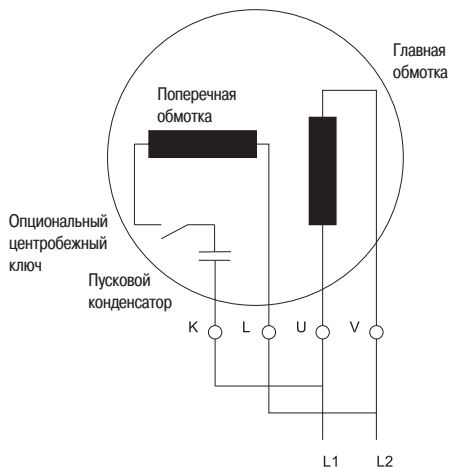
Для такой системы подходят только маломощные четырехполюсные двигатели не более 4 кВт.

Изготовители предоставляют таблицы для правильного выбора номиналов конденсаторов.

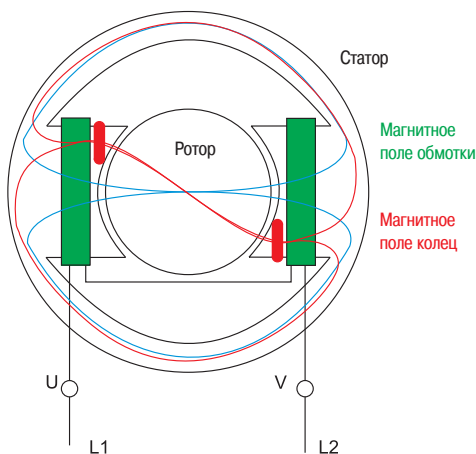
□ Пуск двигателя с расщепленными полюсами

Это устройство (⇒ *Рис. 12*) используется в очень маломощных двигателях (около 100 Вт). Полюса имеют пазы со вставленными в них короткозамкнутыми токопроводящими кольцами. Наведенный в них ток изменяет вращающееся поле и инициирует процесс запуска.

КПД низкий, но для данного диапазона мощности вполне подходит.



↑ *Рис. 11* Однофазный двигатель с пусковым конденсатором



↑ *Рис. 12* Двигатель с расщепленными полюсами

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.2 Электрическое торможение трехфазных асинхронных двигателей

4.2 Электрическое торможение трехфазных асинхронных двигателей

■ Введение

Во многих системах двигатели останавливаются свободным выбегом. Время остановки зависит только от моментов инерции и сопротивления механизма привода. Однако время часто необходимо сократить и электрическое торможение является простым и эффективным решением. По сравнению с системами механического и гидравлического торможения у нее есть преимущество, заключающееся в стабильности и в отсутствии износа деталей.

■ Торможение противовключением

Двигатель отключается от питающей сети и в то время, как он все еще продолжает вращаться, он снова подключается к сети в режиме реверса. Это очень эффективный способ торможения с крутящим моментом выше, чем пусковой крутящий момент, который должен быть закончен достаточно быстро, чтобы предотвратить запуск двигателя в противоположном направлении. Для управления остановкой при приближении скорости к нулю используются несколько приборов автоматики:

- датчики прекращения трения, центробежный датчик остановки;
- реле времени;
- измеритель частоты или реле напряжения ротора (для двигателей с контактными кольцами) и т.д.

□ Двигатель с короткозамкнутым ротором

Перед выбором этой схемы (⇒ Рис. 13) необходимо быть уверенным, что двигатель может выдержать торможение противовключением с требуемой нагрузкой. Не считая механический удар, этот процесс подвергает ротор высокому тепловому воздействию, так как энергия, вырабатываемая при каждом торможении (энергия скольжения от сети и кинетическая энергия) рассеивается в роторе. Тепловая нагрузка при торможении в три раза больше, чем при наборе скорости.

При торможении пики тока и крутящего момента существенно выше, чем при пуске.

Для плавного торможения при противовключении в каждой фазе статора часто устанавливается последовательно резистор. Это снижает крутящий момент и ток до значений, как при пуске двигателя.

У торможения противовключением так много недостатков, что эта система используется только для маломощных двигателей.

□ Двигатель с контактными кольцами

Для ограничения пикового значения тока и крутящего момента, перед переходом двигателя в режим противовключения, необходимо в цепь ротора включить резисторы, используемые для пуска, и иногда требуется добавить дополнительные резисторы в цепь ротора (⇒ Рис. 14).

Значение тормозного момента легко отрегулировать правильным выбором резистора в цепи ротора.

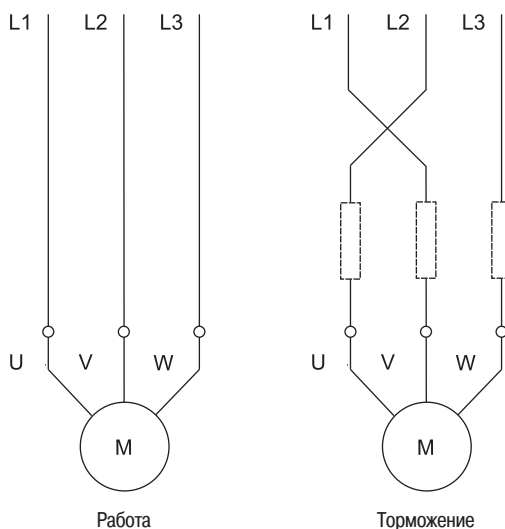
В момент переключения тока напряжение ротора практически в два раза больше, чем при остановленном роторе, что иногда заставляет предпринять специальные меры по изоляции.

Так же как и в случае с короткозамкнутыми двигателями, большое количество энергии выделяется в цепи ротора. Она полностью рассеивается (за вычетом некоторых потерь) в резисторах.

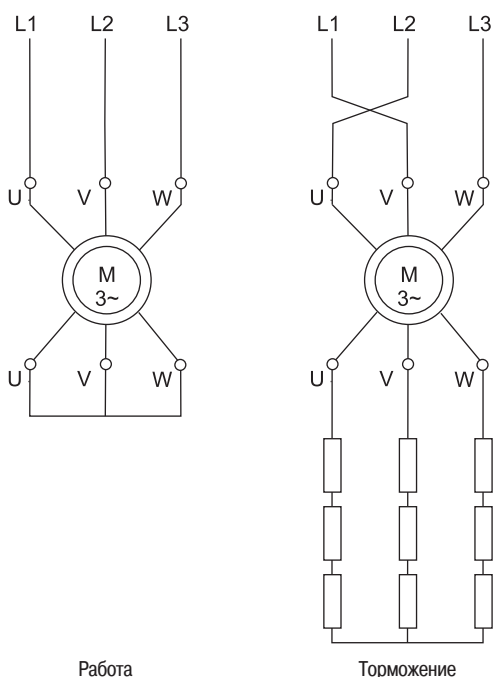
Двигатель может быть остановлен автоматически при помощи одного из указанных выше приборов, или с помощью реле контроля напряжения или частоты в цепи ротора.

В этой системе скорость нагрузки привода может поддерживаться на приемлемом уровне.

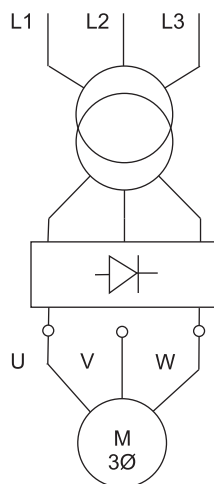
Характеристики являются очень мягкими (широкое изменение скорости при небольшом изменении момента).



↑ Рис. 13 Принцип торможения противовключением



↑ Рис. 14 Принцип торможения противовключением в асинхронных машинах с контактными кольцами



↑ Рис. 15 Принцип торможения постоянным током в асинхронных машинах

■ Торможение постоянным током

Эта система торможения используется как для асинхронных двигателей с контактными кольцами, так и для двигателей с короткозамкнутым ротором (⇒ Рис. 15). При сравнении с системой противотключения стоимость источника выпрямленного тока компенсируется стоимостью нескольких резисторов. При использовании преобразователей частоты и устройств плавного пуска этот вариант торможения не увеличивает стоимость.

Процесс включает в себя отключение статора от питающей сети и питание его выпрямленным током. Выпрямленный ток создает постоянный магнитный поток в воздушном зазоре двигателя. Чтобы значение потока обеспечивало необходимое торможение, ток должен быть примерно в 1,3 раза больше номинального. Избыток тепловых потерь, вызванных этой небольшой перегрузкой по току, обычно компенсируется паузой после торможения.

Так как значение тока задается только сопротивлением обмотки статора, то напряжение источника выпрямленного тока должно быть низким. Источники постоянного тока выполняются на базе выпрямителя или преобразователя частоты. Они должны выдерживать броски напряжения переходного процесса, вызываемого отключением обмоток от сети переменного тока (например, 380 В).

Движение ротора представляет собой скольжение относительно фиксированного поля статора в пространстве (в то время, как в системах противотключения поле вращается в противоположном направлении). Двигатель работает подобно синхронному генератору, вырабатывая в роторе энергию. Существуют важные отличия в получаемых характеристиках при постоянном токе по сравнению с системой противотключения:

- меньше энергии рассеивается в резисторах ротора или клетке. Она эквивалентна кинетической энергии, освобождаемой массами при движении. От сети берется только мощность для питания статора;
- если нагрузка не активная, то двигатель не будет вращаться в противоположном направлении;
- если нагрузка активная, то система постоянно тормозится и удерживает нагрузку на низкой скорости. Это замедляет процесс торможения по сравнению с торможением до полной остановки. Характеристики более стабильны, чем при противотключении.

Для двигателей с контактными кольцами, кривая зависимости скорости вращения от момента зависит от выбора резисторов.

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором система облегчает настройку тормозящего момента, путем воздействия на величину постоянного тока. Однако тормозящий момент будет низким, когда двигатель работает на высокой скорости.

Для предотвращения чрезмерного перегрева, должно быть предусмотрено устройство для отключения тока в статоре при окончании торможения.

■ Электронное торможение

Электронное торможение обеспечивается просто преобразователем частоты, оснащенный тормозным резистором. Асинхронный двигатель в этом случае действует как генератор, и механическая энергия рассеивается в тормозном резисторе без увеличения потерь в двигателе.

Более подробная информация по электронному регулированию скорости рассмотрена в главе «Устройства управления электродвигателями».

■ Сверхсинхронное торможение

Сверхсинхронное торможение происходит, когда нагрузка двигателя раскручивает его до скорости выше синхронной, заставляя работать в качестве асинхронного генератора и развивать тормозящий момент. За исключением некоторых потерь энергия рекуперируется в питающую сеть.

На подъёмном механизме этот режим работы соответствует спуску груза на номинальной скорости. Тормозной момент точно уравнивается крутящим моментом от нагрузки, и вместо замедления скорости, двигатель работает на постоянной скорости.

На двигателях с контактными кольцами все резисторы в цепи ротора должны быть закорочены, чтобы не допустить роста скорости намного выше номинальной, что будет опасно с механической точки зрения. Эта система обладает идеальными характеристиками для стабилизации скорости приводной нагрузки:

- скорость является постоянной и практически независимой от приводного момента;
- энергия генерируется и возвращается в сеть.

Однако данный режим предполагает работу только на одной скорости, примерно равной номинальной.

Системы сверхсинхронного торможения также используются для многоскоростных двигателей для изменения скорости с высокой на низкую.

Сверхсинхронное торможение легко достигается с электронным регулятором скорости, который автоматически запускает режим при понижении задания частоты.

■ Другие системы торможения

Иногда может использоваться однофазное торможение. Оно представляет собой питание двигателя двумя сетевыми фазами и подключение свободного вывода к одной из фаз, подключённой к сети. Тормозящий момент ограничен величиной равной 1/3 максимального крутящего момента двигателя. Эта система не может тормозить полную нагрузку и должна быть подстрахована торможением противовключением. Такая система вызывает дисбаланс и большие потери.

Существует также система торможения посредством замедления вихревых токами. Она действует по принципу, подобному используемому в промышленных транспортных машинах в дополнение к механическому торможению (электрические замедлители скорости). Механическая энергия рассеивается в замедлителе. Торможение регулируется обмоткой возбуждения. Недостатком является то, что они обладают высокой инертностью.

□ Реверсирование

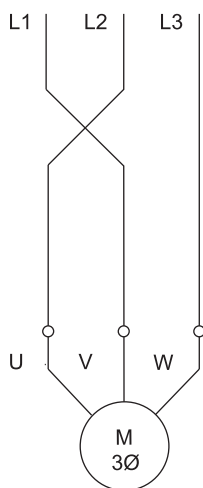
Трёхфазный асинхронный двигатель (⇒ Рис. 16) запускается в обратном направлении при помощи простого перекрестного подключения двух обмоток, в результате чего поле двигателя вращается в обратном направлении.

Двигатель обычно запускается в обратном направлении из состояния покоя. В противном случае реверсирование фазы станет причиной торможения противовключением (см. параграф по двигателям с контактными кольцами). Также могут использоваться другие системы торможения, описанные выше.

Если открыт доступ ко всем обмоткам, то существует возможность реверсирования однофазного двигателя.

■ Типы режимов

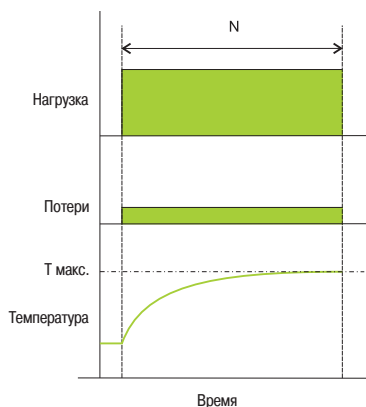
Для электрических двигателей количество пусков и торможений за единицу времени в сильной степени влияет на внутреннюю температуру. Стандарт МЭК: Вращающиеся электрические машины - часть 1: Классификация характеристик (МЭК 60034-1:2004) представляют эксплуатационные коэффициенты, которые позволяют рассчитать нагрев и правильно определить типоразмер двигателя согласно применению. Ниже дан краткий обзор эксплуатационных коэффициентов. Дополнительную информацию можно найти в соответствующем стандарте МЭК и каталогах изготовителя.



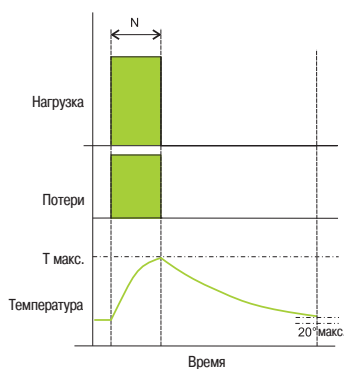
↑ Рис. 16 Принцип реверсирования асинхронного двигателя

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

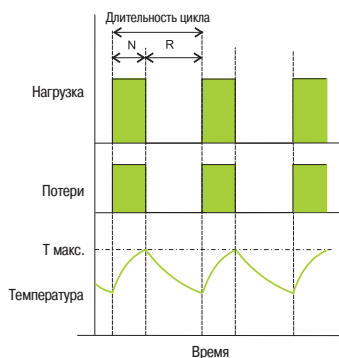
4.2 Электрическое торможение трехфазных асинхронных двигателей



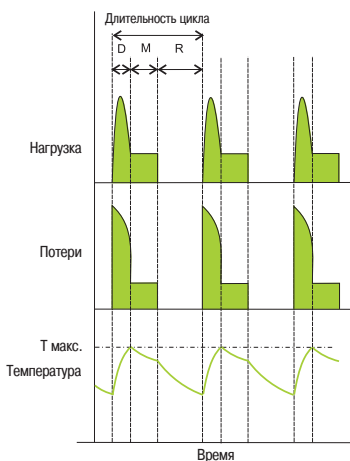
↑ Рис. 17 Режим D1



↑ Рис. 18 Режим D2



↑ Рис. 19 Режим D3



↑ Рис. 20 Режим D4

□ Продолжительный режим работы – тип D1 (⇒ Рис. 17)

Работа при постоянной нагрузке, продолжающаяся достаточно долго, чтобы достичь теплового баланса.

□ Кратковременная нагрузка – тип D2 (⇒ Рис. 18)

Работа при постоянной нагрузке в течение заданного периода времени, который меньше требуемого для достижения теплового баланса, за которым следует пауза для восстановления теплового баланса между машиной и окружающим охладителем примерно при 20° С.

□ Повторно-кратковременный режим – тип D3 (⇒ Рис. 19)

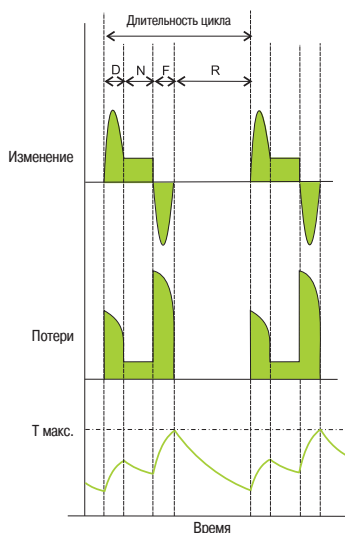
Последовательность идентичных циклов, состоящих из периода работы и паузы. Пусковой ток в данном типе режима работы такой, что он существенно не влияет на нагревание.

□ Повторно-кратковременный режим с пуском – тип D4 (⇒ Рис. 20)

Последовательность идентичных циклов, состоящих из значительного периода запуска, периода работы на постоянной нагрузке и паузы.

□ Повторно-кратковременный режим с электрическим торможением – тип D5 (⇒ Рис. 21)

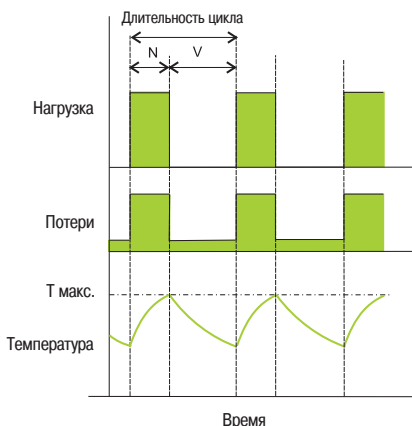
Последовательность циклов работы, состоящих из периода запуска, периода работы при постоянной нагрузке, периода электрического торможения и паузы.



↑ Рис. 21 Режим D5

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.2 Электрическое торможение трехфазных асинхронных двигателей



↑ Рис. 22 Режим D6

□ Продолжительный режим с периодической кратковременной нагрузкой – тип D6 (⇒ Рис. 22)

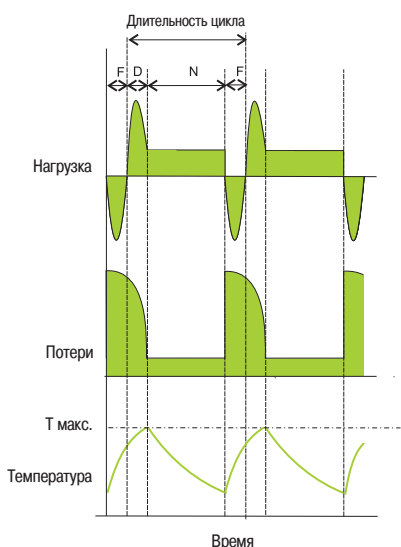
Последовательность идентичных циклов работы, состоящих из периода работы при постоянной нагрузке и периода работы без нагрузки. Нет пауз.

□ Периодический непрерывный режим с электрическим торможением – тип D7 (⇒ Рис. 23)

Последовательность идентичных циклов работы, состоящих из периода запуска, периода работы при постоянной нагрузке и периода электрического торможения. Нет пауз.

□ Периодический непрерывный режим, с взаимосвязанными изменениями скорости и нагрузки – тип D8 (⇒ Рис. 24)

Последовательность идентичных циклов работы, состоящих из периода работы при постоянной нагрузке на заданной скорости вращения, за которым следуют один или более периодов работы при постоянной нагрузке на других скоростях (например, изменением количества полюсов). Нет паузы.



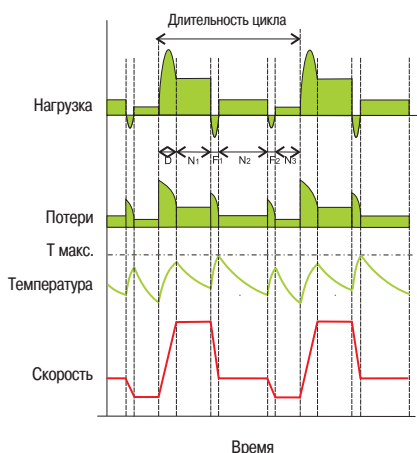
↑ Рис. 23 Режим D7

□ Режим непериодического изменения нагрузки и скорости – тип D9 (⇒ Рис. 25)

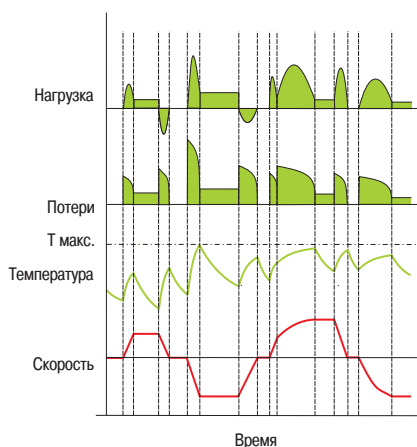
Режим, при котором нагрузка и скорость изменяются в пределах допустимого рабочего диапазона не периодически. Этот режим часто включает в себя перегрузки, которые могут значительно превышать полную нагрузку.

□ Раздельные установившиеся режимы – тип D10 (⇒ Рис. 26)

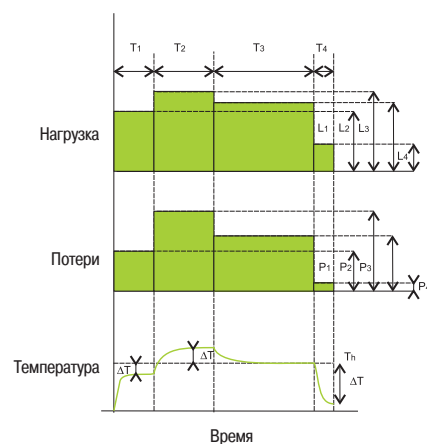
Режим не более чем с четырьмя различными значениями нагрузки (или эквивалентными величинами нагрузок), каждая из которых достаточно продолжительная для механизма, чтобы достичь установившегося значения температуры. Минимальная нагрузка в цикле может быть нулевой (работа без нагрузки или пауза).



↑ Рис. 24 Режим D8



↑ Рис. 25 Режим D9

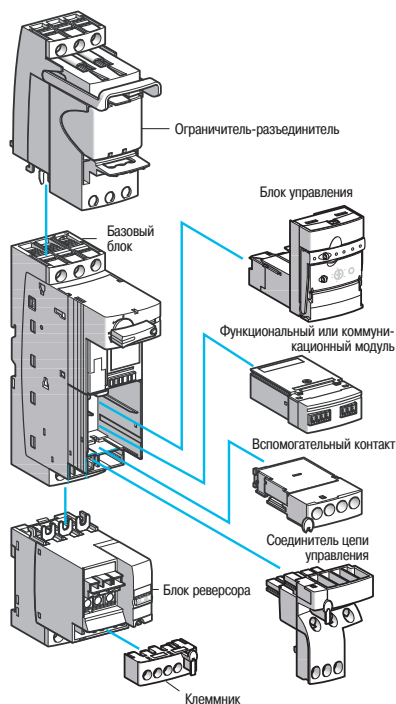


↑ Рис. 26 Режим D10

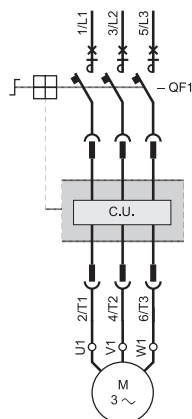
4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.3 Многофункциональные пускатели двигателей

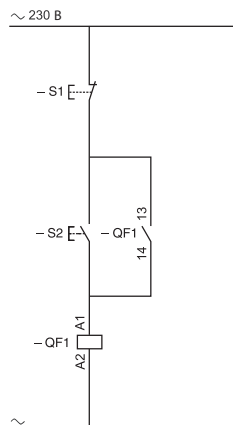
4.3 Многофункциональные пускатели двигателей



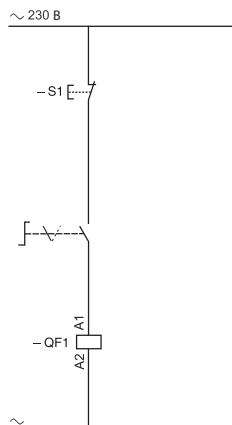
↑ Рис. 27 Tesys U



↑ Рис. 28 Рабочая схема Tesys U



↑ Рис. 29 Трехпроводное управление



↑ Рис. 30 Двухпроводное управление

В ответ на меняющиеся требования пользователей конструкция пускателя двигателя существенно изменилась в последние годы.

Эти требования включают в себя следующие положения:

- изделия должны иметь небольшой размер для облегчения установки и уменьшения габаритов оборудования;
- простые решения для координации;
- уменьшение количества комплектующих;
- быстрый и простой монтаж для снижения стоимости трудозатрат;
- функции автоматизации по доступной цене;
- возможности связи и подключений к полевой шине.

В 1983 году линейка изделий Telemecanique Integral стала первой разработкой, учитывающей эти требования. Это была первая продукция со следующими функциями в одном блоке:

- изолирования;
- переключения;
- защиты от перегрузок и короткого замыкания с характеристиками лучших приборов, имеющихся на рынке, (подробности см. в разделе по защите двигателей).

За двадцать лет технологии усовершенствовались, и теперь Schneider Electric предлагает Tesys U. Это изделие является значительным шагом вперед в изготовлении оборудования.

Оно обеспечивает полную координацию защиты двигателей, означающую, что устройство будет корректно выполнять свои функции при пуске двигателя в случае сбоя или отказа по питанию. По сравнению с обычным решением число комплектующих уменьшено в 10 раз, экономия при монтаже составляет 60% и экономия места составляет 40%.

На Рис. 27 показан Tesys U с некоторыми дополнительными устройствами.

Как и Integral, устройства серии Tesys U реализуют основные функции пускателей двигателей и, кроме того, обладают современной системой диалогового режима и функциями переключения, которые могут использоваться для перспективных экономичных схем. Пускатель Tesys U включает в себя силовой блок с функциями отключения, переключения и защиты. Именно он является основным элементом, решающим рассматриваемые ниже задачи.

■ Движение вперед

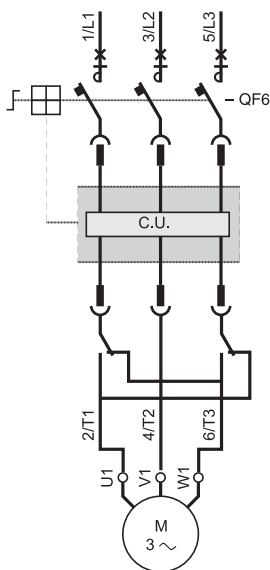
На схеме (⇒ Рис. 28) показано внутреннее устройство Tesys U. Силовой блок включает в себя все компоненты, требуемые для отключения, защиты от коротких замыканий и перегрузки и коммутации питания.

Силовой блок используется для построения классических схем без дополнительных компонентов:

- 3-проводное управление (⇒ Рис. 29), импульсное управление с самоподхватом;
- 2-проводное управление (⇒ Рис. 30), 2-позиционный переключатель.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.3 Многофункциональные пускатели двигателей



↑ Рис. 31 Tesys U с реверсивным модулем (принцип работы)

■ Движение вперед и реверс

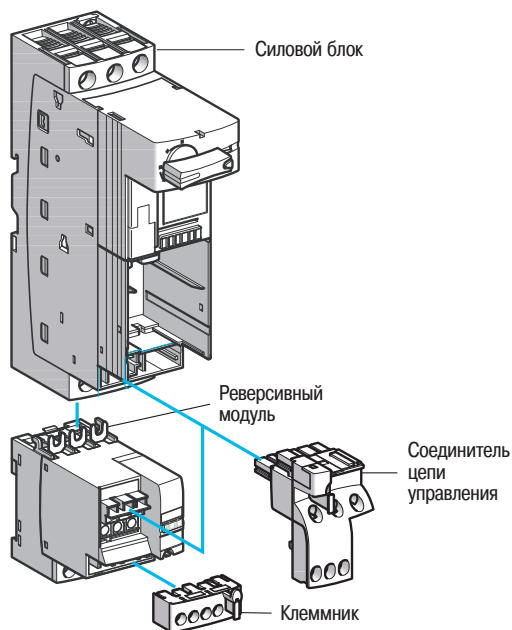
На Рис. 31 и Рис. 32 показаны силовой блок и реверсивный модуль, который может быть подключен сбоку изделия или непосредственно для компактности.

Силовой блок управляет пуском/остановкой, осуществляя защиту от короткого замыкания и тепловую защиту.

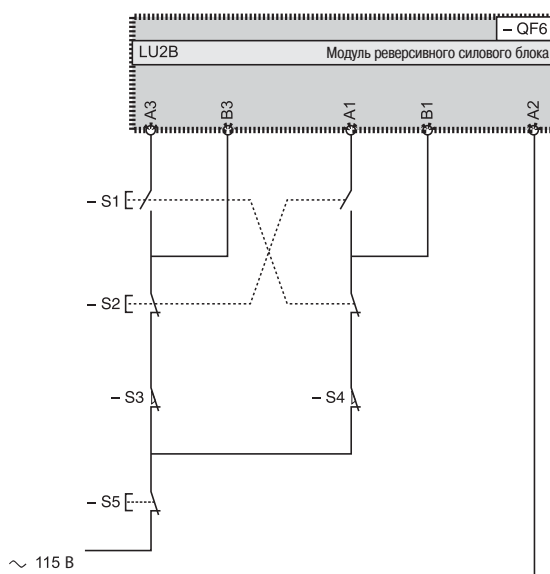
Блок реверсирования никогда не коммутируется под нагрузкой, поэтому отсутствует электрический износ контактов.

Кроме того, нет необходимости в механической блокировке, так как электромагнит обладает двумя устойчивыми состояниями, а к держателю реверсивного контакта нет доступа, поэтому его положение нельзя изменить.

Пример 3-проводного управления (⇒ Рис. 33): импульсное управление с самоподхватом, с верхним и нижним концевыми выключателями.



↑ Рис. 32 Tesys U с реверсивным модулем



↑ Рис. 33 Пример Tesys U с функцией реверсирования

4.4 Защита двигателя

У каждого электрического двигателя есть рабочие ограничения. Превышение данных ограничений в конечном итоге приводит к выходу его из строя и поломке системы привода, следствием чего являются отключение и простои.

Такие потребители, которые преобразует электрическую энергию в механическую, могут стать причиной электрического или механического отказов.

- **Отказ электрической части**
 - Перегрузка, падение напряжения, перекос и обрывы фазы, приводят к колебаниям потребляемого тока.
 - Короткие замыкания, при которых ток достигает значительной величины, могут вывести из строя потребителя.
- **Отказ механической части**
 - Заклинивание ротора, однократные или продолжительные перегрузки вызывают повышение тока двигателя и опасный нагрев его обмоток.

Убытки от этих отказов могут быть большими. Они включают в себя производственные потери, потери сырья, ремонт производственного оборудования, некачественное производство и задержки поставки. Экономической необходимостью для конкурентоспособности бизнеса является снижение убытков от простоя и брака.

Эти отказы также могут иметь серьезные последствия для безопасности людей, находящихся в прямом или косвенном контакте с двигателем.

Для предотвращения таких отказов или, как минимум, для снижения их воздействия, а также предотвращения повреждений оборудования и нарушения электропитания необходима защита. Она отключает оборудование от питающей сети посредством отключающего устройства, которое реагирует на изменения электрических показателей (напряжение, ток и т.д.).

- **Каждое устройство пуска двигателя должно включать в себя**
 - Защиту от короткого замыкания, для выявления и отключения сверхтоков – обычно в 10 раз больше номинального тока (RC) – как можно быстрее.
 - Защиту от перегрузки, реагирующую на повышение тока до 10 RC, размыкает силовую цепь, не допуская нагрева двигателя, повреждения изоляции.

Эти защиты обеспечиваются специальными приборами, такими как плавкие предохранители, расцепители и реле перегрузки или интегральными приборами с несколькими видами защит.

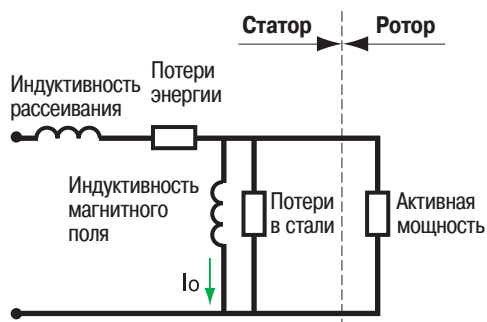
Защита от замыканий на землю, которая охватывает индивидуальную защиту и пожарную безопасность, не относится к области защиты двигателей, так как обычно является частью распределительного электрического оборудования, цехов или целых зданий.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

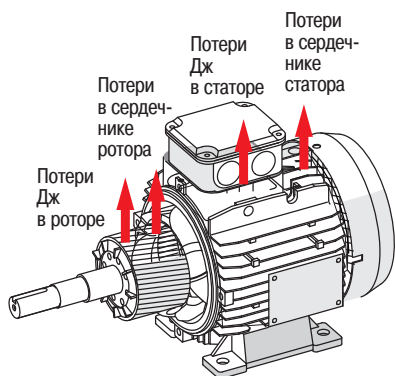
4.5 Потери в двигателе и нагрев

4.6 Причины неисправностей и их последствия

4.5 Потери в двигателе и нагрев



↑ Рис. 34 Эквивалентная схема асинхронного двигателя



↑ Рис. 35 Потери в двигателе переменного тока

■ Эквивалентная схема двигателя

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором может быть представлен эквивалентной схемой (⇒ Рис. 34).

Часть электрической энергии, подаваемой на статор, передается на вал и является мощностью привода или активной мощностью.

Остальная часть преобразуется в тепло в двигателе (⇒ Рис. 35):

- потери энергии (Джоулево тепло) в обмотках статора;
- потери энергии (Джоулево тепло) в роторе, вследствие наведенного в нём тока (см. раздел по двигателям);
- потери в стали сердечника ротора и статора.

Эти потери зависят от условий эксплуатации (см. Раздел по пуску двигателей) и приводят к нагреванию двигателя.

Неисправности, вызванные нагрузкой или напряжением питания, могут стать причиной опасного перегрева.

■ Категории изоляции

Большая часть промышленных машин обладают изоляцией категории F. См. таблицу (⇒ Рис. 36).

Категория F допускает перегрев (измеренное методом изменения сопротивления) до 105°C и максимальные температуры в самых горячих точках машины ограничены 155°C (см. МЭК 85 и МЭК 34-1). Для особых условий, в особенности при высоких температурах и высокой влажности, лучше подходит категория H.

Высококачественные машины сконструированы так, что максимальный перегрев составляет 80° при номинальных рабочих условиях (температура окружающей среды 40°C, высота меньше 1000 м над уровнем моря, номинальное напряжение, номинальная частота и номинальная нагрузка). При превышении этих значений происходит снижение номинальных расчетных характеристик.

Для категории F, существует тепловой запас в 25°C для работы при отклонении от номинальных условий работы.

	Δt (перегрев)	T макс.
Категория B	80°C	125°C
Категория F	105°C	155°C
Категория H	125°C	180°C

↑ Рис. 36 Классы изоляции

4.6 Причины неисправностей и их последствия

У электродвигателей рассматриваются два типа неисправностей: неисправности, вызванные отказом самого электродвигателя, и неисправности, вызванные внешними причинами.

• Неисправности двигателя:

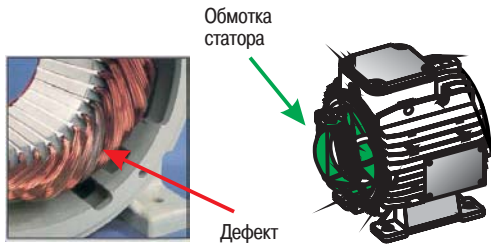
- однофазное короткое замыкание на землю;
- межфазное короткое замыкание;
- межвитковое замыкание;
- перегрев обмоток;
- поломка стержня в двигателях с короткозамкнутым ротором;
- проблемы с обмотками и т.д.

• Неисправности, вызванные внешними причинами

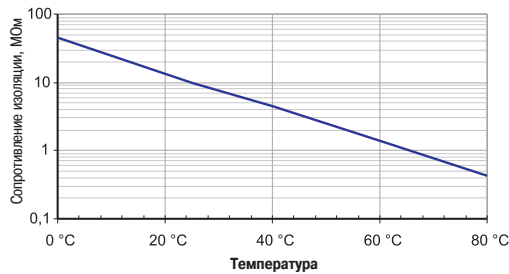
Их источник располагается снаружи электродвигателя, но его воздействие может повредить двигатель.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

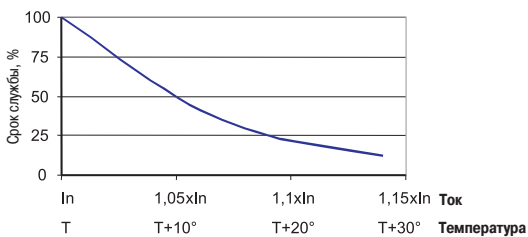
4.6 Причины неисправностей и их последствия



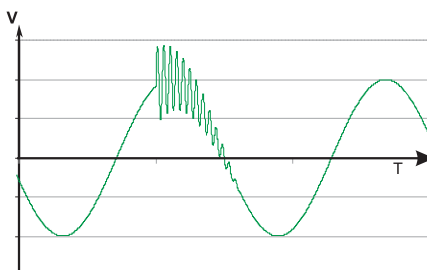
↑ Рис. 37 Обмотки - это части двигателя, наиболее чувствительны к повреждениям электрической цепи и отказам работы



↑ Рис. 38 Зависимость сопротивления изоляции от температуры



↑ Рис. 39 Зависимость срока службы от перегрузки и перегрева



↑ Рис. 40 Пример перенапряжений

□ Отказ может быть вызван:

- **Источником питания**
 - отключение питания;
 - неправильное чередование или не симметрия фаз;
 - падение напряжения;
 - перенапряжение;
 - другие причины.
- **Рабочими условия двигателя**
 - перегрузка;
 - чрезмерное количество пусков или торможений;
 - нарушение режима пуска;
 - слишком высокий момент инерции нагрузки;
 - другие причины.
- **Неправильным механическим монтажом**
 - несоосность;
 - дисбаланс;
 - механическое напряжение на валу;
 - другие причины.

■ Неисправности в двигателе

Неисправность обмотки статора или ротора

Обмотка статора в электродвигателе состоит из медной проволоки, изолированной лаком. Нарушение этой изоляции может вызвать постоянное короткое замыкание между фазой и землей, между двумя или тремя фазами или между витками в одной фазе (⇒ Рис. 37). Первопричина может быть электрическая (коронные разряды, перенапряжения), тепловая (перегрев) или механическая (вибрация, электродинамические воздействия на проводники).

Нарушение изоляции может также произойти в обмотке ротора с таким же результатом - поломкой двигателя.

Наиболее частой причиной неисправности обмоток двигателя является перегрев. Перегрузка приводит к повышению выделяемой мощности в обмотках и росту их температуры.

Кривая (⇒ Рис. 38), которую предоставляет большинство изготовителей электродвигателей, показывает, зависимость сопротивления изоляции от температуры: с ростом температуры, сопротивление изоляции уменьшается. В этом случае срок службы обмоток и, следовательно, двигателя существенно сокращается.

Кривая (⇒ Рис. 39), показывает, что повышение тока на 5%, эквивалентное повышению температуры на 10°, уменьшает вдвое срок службы обмоток.

Поэтому, для предотвращения перегрева и снижения риска отказа двигателя из-за нарушения изоляции обмотки необходима защита от перегрузки.

■ Неисправности, вызванные внешними причинами

Относящиеся к питанию двигателя

□ Перенапряжение

Любое напряжение на входе электрооборудования с пиковой величиной, превосходящей ограничения, определённые стандартом или спецификацией, является перенапряжением (см. *Cahiers Techniques Schneider Electric 151 и 179*).

У временных или постоянных перенапряжений (⇒ Рис. 40) могут быть разные источники происхождения:

- атмосферные (гроза);
- электростатические разряды;
- работа рекуператоров, подключенных к этому же источнику питания;
- другие причины.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.6 Причины неисправностей и их последствия

В таблице представлены основные характеристики (⇒ Рис. 41).

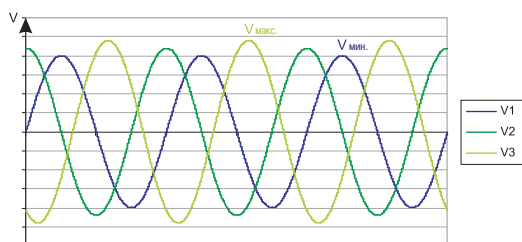
Тип перенапряжения	Длительность	Скорость нарастания (частота)	Затухание
Атмосферное	Очень короткая (1-10мкс)	Очень высокая (1000кВ/мкс)	Сильное
Электростатический разряд	Очень короткая (нс)	Высокая (10 МГц)	Очень сильное
Эксплуатационное	Короткая (1мс)	Средняя (от 1 до 200 кГц)	Среднее
Промышленной частоты	Продолжительная (>1с)	Частота сети	Нулевое

↑ Рис. 41 Характеристики типов перенапряжений

Помехи, поступающие из питающей сети, могут быть двух видов:

- синфазный режим, между активным проводником и землей;
- дифференциальный режим, между активными проводниками.

В большинстве случаев перенапряжение приводит к пробое изоляции обмоток двигателя, который выводит электрическую машину из строя.



↑ Рис. 42 Несимметрия 3-фазного напряжения

□ Несимметрия фаз

3-фазная система является несимметричной, когда три напряжения имеют неравную амплитуду и/или не имеют фазового сдвига 120° относительно друг друга.

Несимметрия (⇒ Рис. 42) может быть вызвана обрывом фазы, однофазными нагрузками в непосредственной близости или самим источником питания.

Несимметрия может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\text{Несимметрия (\%)} = 100 \times \max \left(\frac{\max - V_{\text{ moy}}}{V_{\text{ moy}}}, \frac{V_{\text{ moy}} - V_{\text{ мин}}}{V_{\text{ moy}}} \right),$$

где:

V макс. – самое высокое напряжение

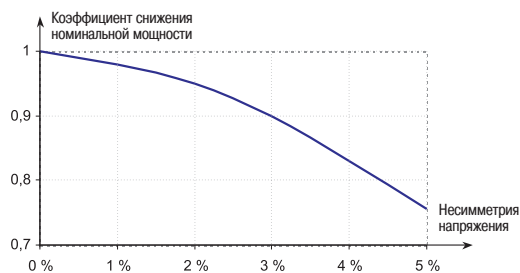
V мин. – самое низкое напряжение

$$V_{\text{ moy}} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

Результатом несимметрии напряжения питания является повышение тока, необходимого для создания требуемого крутящего момента, тем самым двигатель перегревается (⇒ Рис. 43).

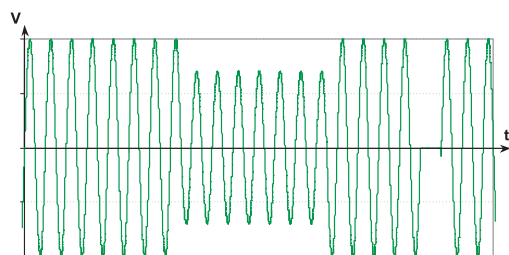
Значение несимметрии (%)	0	2	3,5	5
Ток статора (A)	In	1,01 x In	1,04 x In	1,075 x In
Увеличение потерь (%)	0	4	12,5	25
Нагревание (%)	100	105	114	128

↑ Рис. 43 Влияние несимметрии напряжения на рабочие характеристики двигателя



↑ Рис. 44 Ухудшение параметров двигателя согласно дисбалансу напряжения в его питании

Стандарт МЭК 60034-26 содержит график ухудшения параметров для несимметрии напряжений (⇒ Рис. 44) который может использоваться, когда эти явления выявлены или могут появиться в питании двигателя. Этот коэффициент снижения номинальной мощности используется, чтобы учесть несимметрию или для снижения рабочего тока двигателя относительно номинального тока путем выбора двигателя с завышенным номиналом.



↑ Рис. 45 Пример падения напряжения и кратковременного провала напряжения

□ Падение и провал напряжения

Падение напряжения (⇒ Рис. 45) – это внезапное уменьшение напряжения в источнике питания.

Падение напряжения (стандарт EN50160) рассматривается в диапазоне от 1 до 90% от номинального напряжения для половины цикла 50 Гц длительностью от 10 мс до 1 мин.

В соответствии с определением, приведенным в этом стандарте, кратковременным провалом напряжения считается уменьшение напряжения ниже 90% от номинального уровня продолжительностью менее 3 минут. Если напряжение отсутствует более 3 минут, это считается продолжительным провалом напряжения.

Под микропадением или микропровалом напряжения подразумевается отсутствие напряжения примерно в течение одной миллисекунды.

Причиной изменения напряжения могут быть как случайные внешние факторы (неполадки в сети питания или короткое замыкание), так и явления, имеющие непосредственное отношение к производству (подключение больших нагрузок, например мощных двигателей или трансформаторов). Последствия, вызванные данными факторами, могут серьезно повлиять на сам двигатель.

• Влияние на асинхронные двигатели

При падении напряжения в асинхронном двигателе происходит резкое уменьшение крутящего момента (пропорционального квадрату напряжения), в результате обороты двигателя падают в зависимости от величины и продолжительности падения напряжения, инерции вращающихся масс и кривой изменения крутящего момента в зависимости от скорости для приводной нагрузки. Если создаваемый двигателем крутящий момент становится меньше момента сопротивления, двигатель останавливается «опрокидывается». После восстановления питания при повторном пуске двигателя происходит мощный бросок тока, по величине сопоставимый с пусковым током.

Если на производстве применяется большое количество двигателей, одновременный повторный пуск этих двигателей может привести к падению напряжения в вышестоящих источниках питания. Данный факт приводит к продлению времени отсутствия напряжения и может затруднить повторный пуск двигателей (слишком продолжительный повторный пуск, сопровождающийся перегревом) или вообще воспрепятствовать ему (крутящий момент на ведущем валу меньше момента сопротивления).

Попытка быстрого повторного включения (около 150 мс) асинхронного двигателя, находящегося в состоянии торможения, без принятия соответствующих мер предосторожности может привести к тому, что напряжение сети и ЭДС асинхронного двигателя, окажутся в противофазе. В этом случае начальный бросок тока по силе может в три раза превышать пусковой ток (15-20 номинала) (см. *Cahier Technique Schneider Electric n°161*).

Упомянутые провалы питающего напряжения и происходящее в результате падение напряжения могут иметь целый ряд последствий для двигателя:

- перегрев и перенапряжения в обмотках, которые могут пробить изоляцию;
- толчковая работа двигателя с недопустимыми механическими нагрузками на сочленениях или преждевременный износ и поломка.

Кроме этого, скачки напряжения могут повлиять на другие компоненты, в частности на контакторы (износ или приваривание контактов), и привести к срабатыванию предохранительных устройств и остановке производственной линии или цеха.

• Влияние на синхронные двигатели

Эти воздействия во многом такие же, как и воздействия на асинхронные двигатели, хотя синхронные двигатели могут вследствие более высокой инерции и более низкого влияния напряжения на крутящий момент выдерживать более значительные падения напряжения (на 50% и больше) без остановки.

В случае остановки двигателя средней и большой мощности необходимо вновь начать процесс пуска, который достаточно сложен и требует времени.

• Влияние на двигатели с преобразователем частоты

Можно выделить следующие проблемы, вызванные падением напряжения в преобразователе частоты:

- невозможность питать двигатель достаточным напряжением (потеря крутящего момента, замедление);
- ненормальное функционирование цепей управления, питаемых от сети;
- возможная перегрузка по току при восстановлении напряжения питания, вследствие заряда конденсаторов фильтра, встроенных в преобразователь частоты;
- перегрузка и несимметричность тока сети, когда напряжение падает на одной фазе.

Преобразователи частоты обычно переходят в состояние аварии, когда падение напряжения превышает 15%.

□ Гармоники

Гармоники могут быть вредными для двигателей переменного тока.

Нелинейные нагрузки, подключенные к сети, вызывают несинусоидальный ток и искажение напряжения.

Это напряжение может быть разложено на сумму синусоид:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \varphi_h),$$

где:

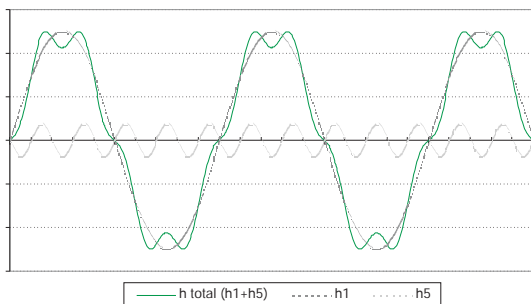
Y_0 : постоянная составляющая

h : коэффициент гармоник

ω : частота (2.π.f)

Y_h : амплитуда для коэффициента гармоник h

Y_1 : основная составляющая



↑ Рис. 46 Напряжение с 5-й гармоникой

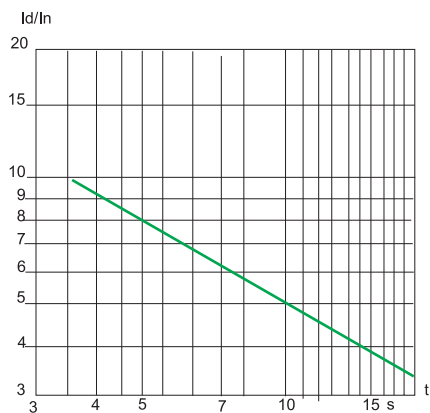
Искажение сигнала измеряется отношением суммарного коэффициента искажения гармоник (THD):

$$\text{THD}(\%) = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2}$$

При значении этого коэффициента более 5% гармоники искажают (⇒ Рис. 46) форму напряжения электрической сети, и могут вызвать проблемы.

Электронные силовые приборы (преобразователи частоты, источники бесперебойного питания и т.д.) являются главными источниками, создающими искажения в питающей сети. Так как двигатель не является идеальным, он может быть источником третьей гармоники.

Гармоники увеличивают потери в двигателях от вихревых токов и вызывают дальнейшее нагревание. Они также могут вызвать повышенные пульсации крутящего момента (вибрации, механическая усталость), зашумленность и ограничить использование двигателей на полной нагрузке.



↑ Рис. 47 Время пуска на основании отношения пускового тока к номинальному току

■ Неисправности работы двигателя, связанные с внешними причинами

□ Пуск двигателя: слишком долгий и/или слишком частый

Фаза пуска двигателя - это время, требуемое для достижения номинальной скорости вращения.

Время запуска (t_D) зависит от момента сопротивления (C_r) и вращающего момента (C_m).

$$t_D (s) = \frac{\pi}{30} \cdot J \cdot \frac{N}{C_m - C_r}, \text{ где:}$$

- J: приведённый момент инерции
- N(об/с): частота вращения ротора

С учетом внутренних характеристик двигателя, он может выдержать ограниченное количество пусков, обычно указываемых изготовителем (количество пусков в час).

Также двигатель обладает временем пуска, зависящим от пускового тока (⇒ Рис. 47).

□ Заклинивание ротора

Заклинивание двигателя по механической причине приводит к броску тока, примерно равному пусковому току. Результатом является нагрев, который намного больше, чем в других случаях, потому что потери в роторе остаются максимальными в течение всего времени заклинивания, при отсутствии охлаждения двигателя, поскольку оно обычно связано с вращением двигателя. Температура ротора может подняться до 350°C.

□ Перегрузка (небольшая перегрузка двигателя)

Небольшая перегрузка двигателя вызывается повышением момента сопротивления или падением напряжения в сети (>10% номинального напряжения). Повышение потребления тока вызывает нагревание, которое сокращает срок службы двигателя и может быть вредным для него при коротком или длительном периоде работы.

■ Краткие сведения

Краткие сведения в таблице на Рис. 48 показывают возможные причины каждого типа неисправностей, возможные эффекты и неизбежные последствия, если не предусмотрены защиты.

В любом случае двигатели всегда требуют два типа защиты:

- защиту от короткого замыкания;
- защиту от перегрузки (тепловую защиту).

Неисправности	Причины	Сопровождающий эффект	Влияние на двигатель
Короткое замыкание	• междуфазное КЗ • КЗ на землю • межвитковое КЗ	• бросок тока • электродинамическое напряжение на проводниках	• повреждение обмотки
Бросок напряжения	• молния • электростатический разряд • отключение нагрузки	• пробой диэлектрика в обмотках	• повреждение обмотки из-за нарушения изоляции
Несимметричное напряжение	• отключение фазы • однофазная нагрузка до двигателя	• понижение переменного крутящего момента • повышенные потери	• перегрев (*)
Провал и падение напряжения	• нестабильность напряжения сети • подключение больших нагрузок	• понижение допустимого крутящего момента • повышенные потери	• перегрев (*)
Гармоники	• загрязнение сети нелинейными нагрузками	• понижение допустимого крутящего момента • повышенные потери	• перегрев (*)
Затянутый пуск	• слишком высокий момент сопротивления • падение напряжения	• повышение времени запуска	• перегрев (*)
Заклинивание	• механические проблемы	• перегрузка по току	• перегрев (*)
Перегрузка	• повышение момента сопротивления • падение напряжения	• высокое потребление тока	• перегрев (*)

(*) В длительном или коротком режиме работы, в зависимости от продолжительности и/или количества неисправности, приводит к короткому замыканию обмоток и выходу из строя двигателя.

↑ Рис. 48 Возможные неисправности в двигателе и их причины и следствия

■ Защита от короткого замыкания

□ Общее описание

Короткое замыкание - это непосредственный контакт между двумя точками с разными электрическими потенциалами:

- *Переменный ток*: контакт между фазами, контакт фаза-нейтраль, контакт фаза-земля или контакт между витками в фазе.
- *Постоянный ток*: контакт между двумя полюсами или между землей и полюсом, изолированным от неё.

Короткое замыкание может иметь несколько причин: повреждение лаковой изоляции проводников, поврежденные или оголенные провода или кабели, посторонние металлические предметы, токопроводящие загрязнения (пыль, влажность и т.д.), просачивание воды или других токопроводящих жидкостей, неправильное подключение при сборке или обслуживании. Короткое замыкание вызывает внезапный бросок тока, который может в сотни раз превышать значение рабочего тока за несколько миллисекунд. Короткое замыкание может иметь разрушающее воздействие и серьезно повредить оборудование. Оно характеризуется двумя явлениями.

• Тепловое воздействие

Тепловое явление характеризуется энергией, выделяемой в электрической цепи, через которую проходит ток короткого замыкания I за время t , на основании формулы I^2t и выражается как A^2s .

Это тепловое воздействие может вызвать:

- плавление контактов проводника;
- повреждение тепловых элементов в биметаллическом реле, если тип координации 1;
- образование дуги;
- прогорание изоляционного материала;
- возгорание оборудования.

• Электродинамическое воздействие

Электродинамическое явление между проводниками, создавая интенсивное механическое напряжение при прохождении тока, вызывает:

- повреждение проводников, образующих обмотки двигателя;
- поломку изоляционных опор проводника;
- разъединение контактов (внутри контакторов), которые могут плавиться и свариваться.

Эти явления опасны для оборудования и персонала. Поэтому крайне необходимо обеспечить защиту от короткого замыкания с помощью устройств защиты, которые могут выявить неисправность и быстро прервать короткое замыкание, прежде чем ток достигнет максимального значения.

Для этого обычно используются два типа устройств защиты:

- плавкие предохранители, которые при расплавлении размыкают цепь и должны быть заменены после этого;
- электромагнитные выключатели, которые автоматически размыкают цепь и требуют только повторного включения.

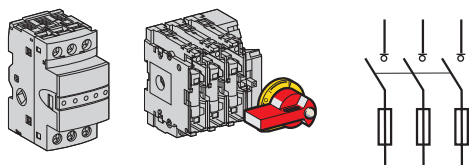
Защита от короткого замыкания также может быть встроена в многофункциональные приборы, такие как контакторы и пускатели двигателей.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.7 Функции защиты

Размыкающая способность (BC)	Cos φ	Замыкающая способность (CC)
4,5 кА < BC < 6 кА	0,7	1,5 BC
6 кА < BC < 10 кА	0,5	1,7 BC
10 кА < BC < 20 кА	0,3	2 BC
20кА < BC < 50 кА	0,25	2,1 BC
50 кА < BC	0,2	2,2 BC

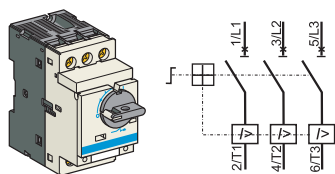
↑ **Рис. 49** Размыкающая и замыкающая способность для выключателей по стандарту МЭК 60947-2



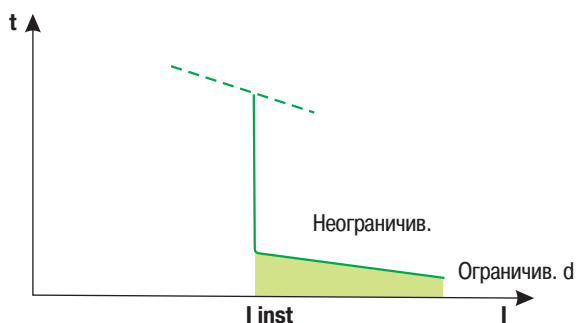
32А

125А

↑ **Рис. 50** Переключатель с держателем предохранителя



↑ **Рис. 51** Магнитный выключатель GV2-L и его схема обозначение



Ограничительная зона

↑ **Рис. 52** Кривая отключения магнитных выключателей

□ Определения и характеристики

К основным характеристикам устройств защиты от короткого замыкания относятся:

- размыкающая способность: самое высокое значение расчетного тока короткого замыкания, которое устройство защиты может разъединить при заданном напряжении;
- замыкающая способность: наибольшая величина тока, которую может коммутировать устройство защиты при номинальном напряжении в указанных условиях. Значение замыкающей способности в k раз больше размыкающей способности, как показано в таблице (⇒ Рис. 49).

□ Плавкие предохранители

Плавкие предохранители выполняют межфазную (однофазную) защиту с высокой размыкающей способностью при маленьком объеме. Они ограничивают I^2t и электродинамические воздействия ($I_{crête}$).

Они устанавливаются:

- на специальных опорах, называемых патроном предохранителя;
- на изоляторах в местах розеток и соединений (⇒ Рис. 50).

Следует отметить, что индикаторы срабатывания плавких предохранителей могут быть подключены к многополюсному переключающему устройству (обычно контактор управления двигателем) для предотвращения однофазной работы при их расплавлении.

Плавкие предохранители, используемые для защиты двигателя, имеют специфическую особенность в том, что они должны пропускать перегрузку по току, вызванную намагничиванием двигателя при пуске. Они не подходят для защиты от перегрузки (кроме плавких предохранителей gG), поэтому необходимо дополнительно использовать реле перегрузки в цепи питания двигателя.

Их номинал должен быть больше тока полной нагрузки двигателя.

□ Электромагнитные расцепители

Эти расцепители защищают установку от короткого замыкания в пределах ограничений их размыкающей способности посредством электромагнитных спусковых механизмов (один на фазу) (⇒ Рис. 51).

Электромагнитные расцепители установлены во всех полюсах: один электромагнитный спусковой механизм одновременно размыкает все полюса.

Для малых токов короткого замыкания такие выключатели работают быстрее плавких предохранителей.

Эта защита соответствует стандарту МЭК 60947-2.

Существуют три условия для удовлетворительного отключения тока короткого замыкания:

- раннее определение аварийного тока;
- быстрое размыкание контактов;
- отключение тока короткого замыкания.

Большинство электромагнитных расцепителей для защиты электродвигателей являются токоограничивающими устройствами и таким образом представляют координацию защит (⇒ Рис. 52). Их очень короткое время отключения размыкает ток короткого замыкания до достижения им максимальной амплитуды.

Это ограничивает тепловое и электродинамическое воздействие и улучшает защиту электропроводки и оборудования.

■ Защита от перегрузки

□ Краткий обзор

Перегрузка является наиболее часто встречающейся неисправностью двигателей. Она проявляется в повышении тока, поданного на двигатель, и тепловым воздействием. Категория изоляции задает нормальное нагревание двигателя при температуре окружающей среды 40°C. Любое отклонение от данных эксплуатационных пределов приводит к снижению срока службы из-за преждевременного старения изоляционного материала.

Однако необходимо отметить, что перегрузки, приводящие к перегреву, не будут оказывать немедленного вредного воздействия, если они короткие и редкие. Они необязательно приводят к остановке двигателя, но необходимо быстро восстановить нормальные условия.

Необходимость надлежащей защиты от перегрузки легко понять:

- Продлевается срок службы двигателей, предотвращая их от работы в условиях перегрева.
- Обеспечивается непрерывность работы посредством предотвращения внезапной остановки двигателей.
- После срабатывания защиты последующий перезапуск происходит в наилучших условиях безопасности для людей и оборудования.

Фактические рабочие условия (температура, высота над уровнем моря и стандартный режим работы) являются необходимыми для определения и выбора рабочих параметров двигателя (мощность, ток) и для выбора соответствующей защиты от перегрузки (⇒ Рис. 53). Рабочие значения представляются изготовителем двигателя.

Высота (м)	Температура окружающей среды						
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
1000	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,87	0,82
1500	1,04	1,01	0,97	0,93	0,89	0,84	0,79
2000	1,01	0,98	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77
2500	0,97	0,95	0,91	0,87	0,84	0,79	0,75
3000	0,93	0,91	0,87	0,84	0,80	0,76	0,71
3500	0,89	0,86	0,83	0,80	0,76	0,72	0,68
4000	0,83	0,81	0,78	0,75	0,72	0,68	0,64

Значения в таблице являются ознакомительными, так как ухудшение номинальных параметров двигателя зависит от размера, категории изоляции, конструкции (естественное или принудительное охлаждение, уровня защиты (IP 23, IP 44) и т.д.) и изменяется в зависимости от изготовителя двигателя.

Примечание: значение номинальной мощности обычно указывается на табличке с данными двигателя и определяется изготовителем для режима непрерывной работы D1 (стационарная работа достаточно длительная для достижения теплового равновесия)

Существуют и другие стандартные режимы работы, такие как временный режим D2 и периодические кратковременные режимы D3, D4 и D5, для каждого из которых изготовитель задает рабочую мощность, отличающуюся от номинальной мощности.

↑ Рис. 53 Коэффициент снижения номинальных параметров двигателя в зависимости от условий работы

В зависимости от требуемого уровня защиты защита от перегрузки может быть реализована посредством:

- реле перегрузки, тепловое (биметаллическое) или электронное реле, которое обеспечивает защиту от:
 - перегрузки, путём контроля потребляемого тока каждой фазой;
 - несимметрии или отсутствия фазы посредством дифференциального устройства;
- реле контроля температуры с терморезистором, который обладает положительным температурным коэффициентом (PTC);
- реле превышения крутящего момента;
- многофункциональных реле.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.7 Функции защиты

Напоминание: реле защиты не разрывает цепь. Оно спроектировано для отключения коммутирующего устройства с необходимой размыкающей способностью для аварийного тока, обычно это контактор.

Для этого защитные реле обладают аварийным контактом (NC) установленным последовательно с катушкой контактора.

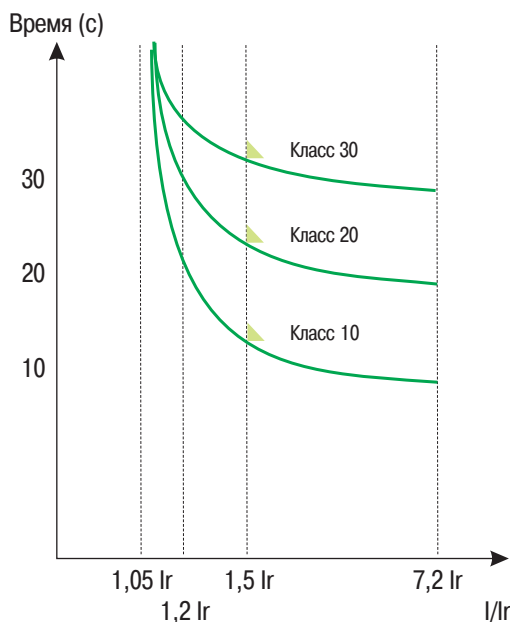
□ Реле перегрузки (тепловое или электронное)

• Краткий обзор

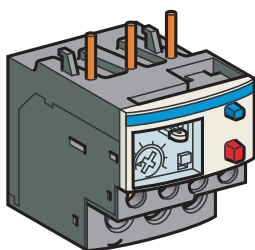
Эти реле защищают двигатели от перегрузки, но должны игнорировать кратковременную перегрузку при пуске и срабатывать только, когда пуск длится слишком долго.

В зависимости от использования пуск двигателя может варьироваться от нескольких секунд (пуск без нагрузки, малая инерция и т.д.) до нескольких десятков секунд (высокий момент сопротивления, высокая инерция привода и т.д.).

Отсюда следует необходимость адаптации реле к времени пуска. Для выполнения этого требования в стандарте МЭК 60947-4-1 указаны несколько категорий реле перегрузки, каждое из которых определяется временем срабатывания (⇒ Рис. 54).



↑ Рис. 55 Кривые реле перегрузки



↑ Рис. 56 Биметаллические тепловые реле перегрузки

Класс	Время отключения из состояния:				Минимальный допуск (группа E)
	Холодное до 1.05 x Ir	Теплое до 1.2 x Ir	Теплое до 1.5 x Ir	Холодное до 7.2 x Ir	
10 A	> 2 ч	< 2 ч	< 2 мин	2 с < tp < 10 с	-
10	> 2 ч	< 2 ч	< 4 мин	4 с < tp < 10 с	5 с < tp < 10 с
20	> 2 ч	< 2 ч	< 8 мин	6 с < tp < 20 с	10 с < tp < 20 с
30 (*)	> 2 ч	< 2 ч	< 12 мин	9 с < tp < 30 с	20 с < tp < 30 с

(*) Категория редко используется в Европе, но широко распространена в США.
Холодное состояние: исходное состояние без предварительных нагрузок.
Теплое состояние: тепловое равновесие, достигаемое при Ir.
Ir: уставка тока реле перегрузки.

↑ Рис. 54 Основные категории выключения реле перегрузки согласно стандарту МЭК 60947-4-1.

Параметры реле выбирается на основании номинального тока двигателя и расчётного времени пуска.

Диапазон использования характеризуется зависимостями (⇒ Рис. 55) параметров тока (в единицах, кратных Ir) от времени.

Эти реле обладают термической инерционностью (кроме электронных, указанных изготовителями) и могут быть подключены:

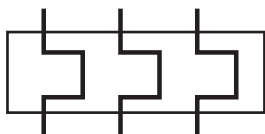
- последовательно с нагрузкой;
- для больших мощностей: к трансформаторам тока, установленным последовательно с нагрузкой.

□ Биметаллические тепловые реле перегрузки (⇒ Рис. 56 и 57)

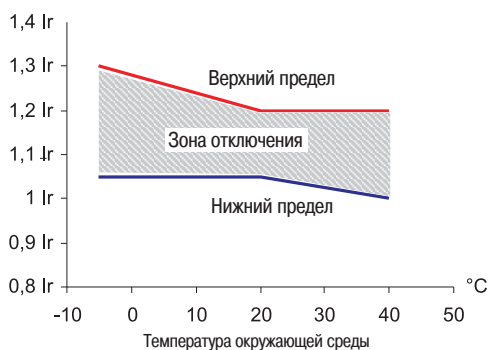
Они подключаются к контактору для защиты двигателя, питающей сети и оборудования от небольшой длительной перегрузки, поэтому они рассчитаны для обеспечения пуска двигателя без отключения. Однако они должны быть защищены от сильных перегрузок по току при помощи автоматического выключателя или плавких предохранителей (см. защита от короткого замыкания).

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

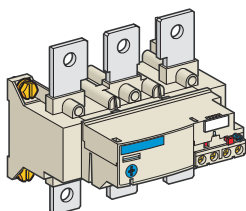
4.7 Функции защиты



↑ Рис. 57 Схема теплового реле



↑ Рис. 58 Эксплуатационные ограничения дифференциального теплового реле перегрузки (реагирующее на обрыв фазы)



↑ Рис. 60 Электронное реле перегрузки LR9F

Принцип работы теплового реле перегрузки основан на деформации его биметаллических пластин, которые нагреваются проходящим по ним током.

В следствии прохождения по ним тока, пластины деформируются и, в зависимости от уставок, вызывают размыкание контакта реле.

Реле может быть взведено только тогда, когда биметаллические пластины достаточно охлаждены.

Тепловые реле перегрузки, работающие на переменном и постоянном токе, обычно имеют следующие свойства:

- 3-полюсное исполнение;
- термокомпенсация, т.е. они не чувствительны к изменениям температуры окружающей среды (та же кривая отключения от 0 до 40°C в стандартном масштабе) (⇒ Рис. 58);
- откалиброваны в «амперах двигателя»: ток, указанный на табличке двигателя, отображается на реле.

Они могут также реагировать на потерю фазы (дифференциальное свойство). Эта способность предотвращает работу двигателя без одной фазы в соответствии со стандартами

МЭК 60947-4-1 и 60947-6-2 (⇒ таблица Рис. 59).

Время отключения	Множество значений уставок тока
> 2 ч	2 полюса: 1,0 I _r 1 полюс: 0,9 I _r
> 2 ч	2 полюса: 1,15 I _r 1 полюс: 0

↑ Рис. 59 Эксплуатационные ограничения дифференциального теплового реле перегрузки (реагирующее на потерю фазы)

Широко используемые, эти реле являются очень надежными и рентабельными. Особенно рекомендуется их применение, если есть риск блокировки ротора. Тем не менее, у них есть недостатки: неточность определения теплового состояния двигателя и чувствительность к тепловым условиям, в которых установлено данное реле (вентиляция корпуса и т.д.).

□ Электронное реле перегрузки (⇒ Рис. 60)

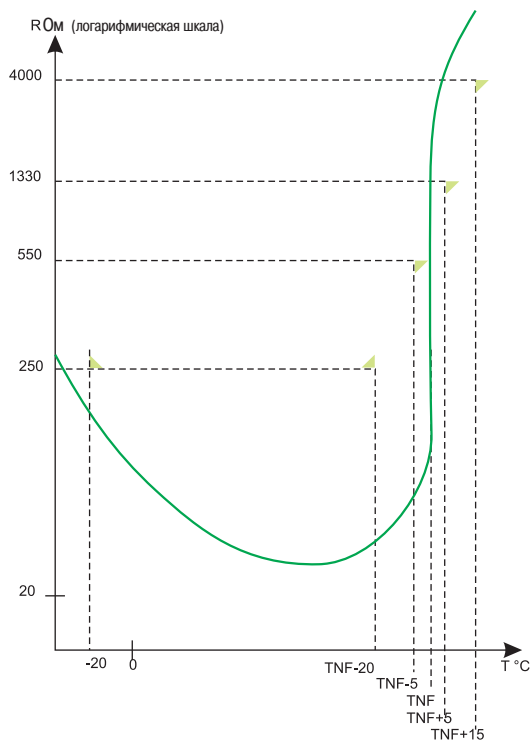
Эти реле обладают преимуществами электронных систем и моделируют более точно тепловое состояние двигателя. Используя модель с тепловыми постоянными времени двигателя, система постоянно рассчитывает температуру двигателя на основании тока, проходящего через него, и времени работы. Отсюда защита оказывается точнее и может предотвратить случайное отключение. Реле электронной перегрузки менее чувствительны к тепловым условиям, в которых они установлены.

Кроме обычных функций реле перегрузки (защита от перегрузки двигателя, несимметрия и отсутствие фаз) электронное реле перегрузки может включать в себя следующие опции:

- управление по датчику температуры РТС;
- защита от заклинивания и перегрузки по моменту;
- защита от неправильного чередования фаз;
- защита от нарушения изоляции;
- защита от работы без нагрузки и т.д.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.7 Функции защиты



↑ Рис. 61 Пределы датчика терморезистора PTC или рабочие точки

□ Реле с датчиком PTC

Эти реле защиты реагируют на фактическую температуру защищаемого двигателя.

Датчики установлены в двигателе, так как они имеют маленькие габариты, их тепловая инерция низкая, они гарантируют короткое время срабатывания и поэтому обеспечивают точное измерение температуры двигателя.

Они непосредственно измеряют температуру обмоток статора, таким образом, они могут использоваться для защиты двигателей от: перегрузок, повышения температуры окружающей среды, неисправностей системы вентиляции, слишком частых процессов запуска, медленного перемещения и т.д.

Они состоят из одного или более датчиков-терморезисторов с положительным температурным коэффициентом (PTC), установленных в обмотках или в любой точке, которая может нагреться (подшипники и т.д.).

Это статические компоненты с сопротивлением, которое быстро растёт, когда температура достигает порога, называемого номинальной рабочей температурой (NOT) как показано на кривой (⇒ Рис. 61).

• Электронный блок

Электронный прибор, питающийся переменным или постоянным током, непрерывно измеряет сопротивление датчиков, подключенных к нему. При достижении NOT пороговой схемой определяется значительное повышение сопротивления цепи, затем следует переключение выходных контактов. В зависимости от выбранных датчиков режим защиты может использоваться для:

- сигнализации без остановки машины (NOT датчиков ниже, чем максимальная температура, заданная для защищаемого элемента);
- остановки машины (NOT достигла максимального уровня) (⇒ Рис. 62).

Эта система должна быть выполнена заранее, поскольку датчики, монтируются на обмотках при изготовлении двигателя, хотя они могут быть также установлены во время перемотки двигателя после аварии.

Выбор датчиков PTC зависит от категории изоляции и конструкции двигателя. Монтаж обычно выполняется изготовителем двигателя или квалифицированным обмотчиком электрических машин.

Эти два условия означают, что защита датчиками PTC устанавливается только на высококачественном оборудовании с дорогими двигателями.

□ Реле перегрузки по крутящему моменту: дополнительная защита (⇒ Рис. 63)

В дополнение к тепловой релейной защите или датчиками PTC оно гарантирует защиту привода системы в случае блокировки ротора, механического заедания или медленного перемещения.

В отличие от большинства реле перегрузки этот способ не обладает тепловой памятью. У него есть заданное время работы (регулируемый порог тока и времени).

Реле перегрузки по моменту может использоваться для защиты двигателя от перегрузки, когда процесс пуска затягивается или очень частый (например, медленное перемещение).

□ Многофункциональные реле

• Электромеханические или электронные реле

Электромеханические или электронные реле защищают двигатель посредством измерения тока двигателя. Они идеально подходят для постоянной работы. Однако они не могут учитывать множество возможных проблем из-за изменения температуры, напряжения или специфики применения. Кроме того требования потребителей, такие как обслуживание или управление производством, стали главной проблемой, и изготовители электрического оборудования выпустили на рынок новые изделия, которые могут быть выполнены на заказ согласно применению и предлагают защиту двигателя и приводной нагрузки.



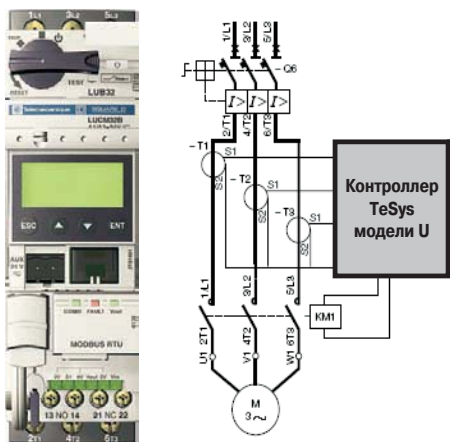
↑ Рис. 62 Электронный блок LT3 для трех датчиков терморезистора



↑ Рис. 63 Реле перегрузки по моменту LR97D

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

4.7 Функции защиты



↑ Рис. 65 Многофункциональное реле отделено от пускателя двигателя

• Характеристики

Эти реле разработаны с использованием следующих технологий: датчики напряжения и тока, последние используют приборы без магнитопровода (датчики Роговского), которые обладают достаточным быстродействием и линейностью:

- сочетание цифровых и аналоговых технологий, результатом чего является хорошая обработка и хранение данных;
- использование полевых шин для двустороннего обмена данными с ПЛК и другими приборами;
- использование точных алгоритмов моделирования двигателя;
- использование встроенных программ, параметры которых могут быть изменены пользователем.

Это новое поколение продукции позволяет снижать стоимость на всех этапах жизненного цикла оборудования: от этапа проектирования оборудования, в виду упрощённого программирования ПЛК, до этапа эксплуатации, из-за сокращения расходов и времен простоя.

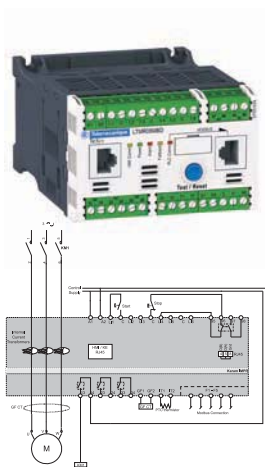
Далее рассмотрим краткое описание возможных решений и основные указания по выбору.

Читатели должны обратиться к технической документации Schneider Electric, в которой информация представлена более глубоко.

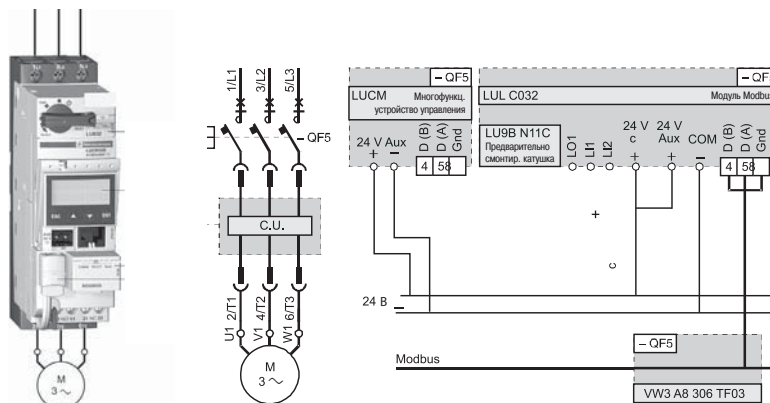
• Весь ассортимент изделий может быть разбит на три группы

Решение 1: многофункциональное реле встроено в пускатель двигателя (⇒Рис. 64).

Преимуществом этого решения «все в одном» являются малые габариты изделия с ограниченным количеством соединений. Верхний предел 32 А.



↑ Рис. 66 Многофункциональное реле с множеством входов/выходов



↑ Рис. 64 Многофункциональное реле, встроенное в пускатель двигателя

Решение 2: многофункциональное реле отделено от пускателя двигателя и использует те же комплектующие, как и предыдущее решение (⇒Рис. 65)

Преимуществом является возможное соединение с любым пускателем двигателя.

Решение 3: многофункциональное реле отделено от пускателя двигателя и имеет много входов/выходов

Это наиболее универсальное решение (⇒Рис. 66).

Указания по выбору реле защиты

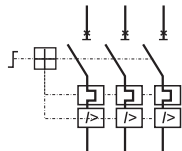
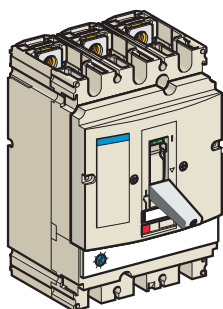
Основные функции представлены в таблице ниже (⇒Рис. 67). Более подробную информацию можно найти в каталогах изготовителя.

4. Пуск и защита двигателей переменного тока

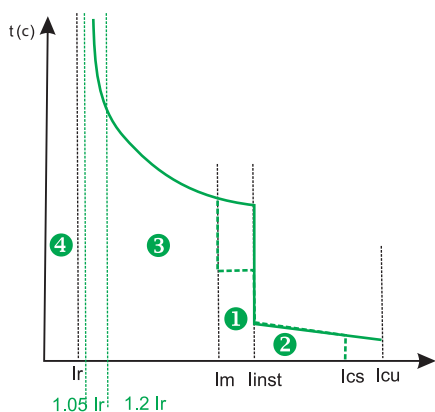
4.7 Функции защиты

Тип реле	Реле перегрузки (тепловое или электронное)	Реле датчика РТС	Реле высокого крутящего момента	Многофункциональные реле		
				Встроенные в пускатель	Снаружи пускателя	Отделенный монитор двигателя
Тип регулирования						
Ток						
Классы защиты	10 - 20			5 - 20	5 – 20	5 - 30
Перегрузка по току	++		+++	+++	+++	+++
Замыкание на землю						
Не симметрия фаз	++			++	++	+++
Механическая блокировка при пуске/ после пуска	+		++	++	++	+++
Работа без нагрузки				модуль	модуль	+++
Напряжение и силовое питание						
Не симметрия напряжений						+++
Обрыв фаз						+++
Чередование фаз						+++
Пониженное напряжение						+++
Перенапряжение						+++
Коэффициент мощности						+++
Температура						
Датчики РТС				модуль	модуль	+++
Датчики РТ100				модуль	модуль	+++
Цифровые функции						
Таблица истинности				3 I/O	10 I/O	10 - 20 I/O
Таймер						++
Режим запуска						
Прямой				+++	+++	+++
Реверсивный				+++	+++	+++
Переключением со звезды на треугольник				+++	+++	+++
Частичная обмотка – двухскоростной двигатель					+++	+++
Работа / обслуживание						
Диагностика				+	+	+++
Регистрация				модуль	модуль	+++
Соединения / связь						
Локальный дисплей	+			модуль	модуль	+++
Дистанционный дисплей (коммуникационная шина)				модуль	модуль	+++
Дистанционное управление (коммуникационная шина)				модуль	модуль	+++

↑ Рис. 67 Таблица по защитам двигателя



↑ Рис. 68 Выключатель GV7 и его схема



↑ Рис. 69 Кривая отключения

■ Выключатели двигателя

□ Краткий обзор

В своём корпусе этот прибор имеет тепловой и магнитный расцепители, которые защищают двигатель от коротких замыканий и перегрузок быстрым отключением аварийной цепи. Он является сочетанием магнитного расцепителя и реле перегрузки и соответствует стандартам МЭК 60947-2 и 60947-4-1 (⇒ Рис. 68).

В этих выключателях магнитные расцепители (защита от короткого замыкания) обладают нерегулируемым порогом, обычно в 10 раз больше максимальной уставки тока тепловых расцепителей.

Тепловые элементы (защита от перегрузки) имеют компенсацию изменения температуры окружающей среды. Порог тепловой защиты может быть отрегулирован на передней панели устройства. Его значение должно соответствовать номинальному току двигателя, подлежащего защите.

Во всех этих выключателях устройство координации (тип II) между тепловыми элементами и защитой от короткого замыкания встроено в прибор.

Более того, в открытом положении расстояние между контактами в большинстве этих приборов гарантирует соответствующую изоляцию. Они также обладают устройством блокировки.

□ Кривая отключения

Выключатель двигателя характеризуется кривой отключения, которая представляет зависимость времени срабатывания t_s от тока (кратное I_r).

Эта кривая разделена на 4 зоны (⇒ Рис. 69):

- нормальная рабочая зона ①. Пока $I < I_r$, отключения нет;
- зона тепловой перегрузки ②. Отключение обеспечивается «тепловым» механизмом; чем больше перегрузка, тем меньше время отключения. Стандарты определяют это как «обратное время»;
- зона высоких значений тока ③, контролируемая «мгновенным магнитным» или механизмом «короткого замыкания», который срабатывает мгновенно (менее 5 мс);
- на некоторых выключателях (электронного типа), имеется промежуточная зона ④, контролируемая элементом «магнитное поле с задержкой по времени» с функцией задержки (0 – 300 мс). Стандарты дают ссылку на эту функцию, как на «независимую выдержку времени». Она предотвращает внезапное выключение при включении с бросками токами намагничивания.

Предельные значения:

I_r : заданный ток для защиты от перегрузки, соответствующий номинальному значению тока (I_n) защищаемого двигателя

I_m : ток отключения временной магнитной защитой

I_{inst} : ток отключения мгновенной магнитной защитой. Может варьироваться от 3 до 17 I_r , но обычно близок к 10 I_r

I_{cs} : рабочая номинальная размыкающая способность при коротком замыкании

I_{cu} : предельная (максимальная) размыкающая способность при коротком замыкании

■ Заключение

Защита двигателя является важной функцией для обеспечения непрерывной работы механизма. Выбор устройства защиты необходимо выполнять очень тщательно. Пользователь поступит разумно, если выберет устройства, которые имеют средства информационной связи, чтобы получать информацию по коммуникационной шине и предотвратить неисправности. Эти устройства существенно улучшают определение аварийных ситуаций и уменьшают сроки для восстановления функционирования.