

## 9 ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), на двигателях напряжением выше 1000 В должны устанавливаться следующие устройства релейной защиты:

- защита от междуфазных коротких замыканий;
- защита от замыканий на землю;
- защита от двойных замыканий на землю;
- защита от перегрузки.

Для синхронных двигателей дополнительно требуется защита от асинхронного режима.

Применяемые для этой цели виды защиты зависят от мощности электродвигателей:

В качестве защиты от междуфазных КЗ при мощности двигателей до 5000 кВт применяется токовая отсечка. Она может применяться и для двигателей большей мощности, не имеющих фазных выводов со стороны нейтрали двигателя. При двигателях большей мощности, а также если токовая отсечка для двигателей меньшей мощности не удовлетворяет требованиям чувствительности, применяется дифференциальная защита при условии, что эти двигатели имеют выводы со стороны нейтрали.

В качестве защиты от замыканий на землю при токах замыкания более 5 А для двигателей мощностью более 2000 кВт, и 10 А для двигателей меньшей мощности, применяется токовая защита нулевой последовательности, действующая на отключение. На линиях, питающих двигатели передвижных механизмов, защита от замыканий на землю, по соображениям электробезопасности, должна действовать на отключение независимо от величины тока замыкания на землю. На блоках трансформатор–двигатель защита от замыканий на землю действует на сигнал. Указанная защита входит в состав всех перечисленных ниже устройств.

В качестве защиты от двойных замыканий на землю применяется токовая защита нулевой последовательности, действующая на отключение. Она применяется в тех случаях, когда защита от замыканий на землю имеет выдержку времени. Ее применение обязательно, если защита от междуфазных КЗ выполняется в двух фазах.

Защита от перегрузки требуется для двигателей, подверженных перегрузке по технологическим причинам, или с особо тяжелыми условиями пуска. Защиту от перегрузки согласно нормам СНГ, можно выполнять с зависимой или независимой выдержкой времени. Защита от перегрузки может действовать на разгрузку механизма по технологическим цепям или сигнал: – 1-я ступень и на отключение – 2-я ступень. Выдержка времени защиты от перегрузки при токе, равном пусковому току двигателя, выполняется большей времени его пуска. Как правило, при таком выполнении защиты двигателя имеется значительный тепловой запас – обычные двигатели по температуре выдерживают не менее двух пусков подряд. Это дает возможность выполнить действие такой защиты от перегрузки на разгрузку механизма.

Таким образом, согласно ПУЭ, на двигателях мощностью менее 5000 кВт можно иметь токовую отсечку, токовую защиту от замыканий на землю, защиту от перегрузки. Такие защиты можно выполнять на реле УЗА-АТ или РС81, а также на реле РС83 с дополнительной защитой потока обратной последовательности. Существуют специальные защиты от перегрузки с зависимой характеристикой, совпадающей с тепловой, которая определяет тепловое состояние двигателя и позволяет полнее использовать его перегрузочную способность. Параметры этой характеристики зависят от данных самого электродвигателя: системы охлаждения, допустимой температуры для изоляции двигателя, исходной температуры двигателя или помещения. Все эти данные учитывают специальные защиты двигателей (например: MiCOM P220). Поэтому, защиты от перегрузки такого типа имеют обычно 2 ступени: ступень с меньшей выдержкой времени действует на разгрузку, с большей – на отключение. В большинстве случаев применяемые у нас защиты имеют одну уставку с зависимой или независимой выдержкой времени. Согласно ПУЭ защита от перегрузки должна действовать на сигнал, разгрузку механизмы и, лишь в крайнем случае, на отключение. В такой ситуации не требуется значительная выдержка времени, требуется отстроиться только от времени самозапуска электродвигателя.

Режим асинхронного хода сопровождается перегрузкой двигателя, и на него реагируют защиты от перегрузки. Поэтому часто защита от перегрузки выполняет одновременно функцию защиты от асинхронного режима. Простые токовые защиты могут срабатывать и возвращаться при колебаниях тока. Поэтому защиты от перегрузки в асинхронном режиме должны накапливать выдержку времени. Такой принцип должен быть заложен в защиту от перегрузки. Так же как и ранее, можно использовать две ступени защиты от перегрузки: ступень с меньшей выдержкой времени действует на ресинхронизацию, с большей на отключение. Поскольку в этом случае невозможно различить режим перегрузки и асинхронный режим, нельзя обеспечить автоматическую ресинхронизацию. При наличии дежурного персонала на объекте, он может это выявить визуально при срабатывании 1-й сигнальной ступени. Специальные защиты от потери возбуждения имеются в устройствах возбуждения крупных двигателей. Эти устройства целесообразно использовать для автоматической ресинхронизации.

Для двигателей, работающих в блоке с понижающим трансформатором, может быть выполнена общая защита, если она удовлетворяет требованиям к защите как двигателя, так и трансформатора.

Для облегчения условий самозапуска, а также для предотвращения подачи несинхронного напряжения на возбужденные синхронные двигатели или заторможенные механизмы, двигатели должны быть обо-

рудованы защитой минимального напряжения. Эта защита может быть либо индивидуальной, либо групповой. В ряде случаев для ускорения подачи напряжения на шины, или предотвращения подачи напряжения на двигатели автоматикой внешней сети, синхронные двигатели могут быть дополнительно оборудованы защитой по понижению частоты, так как они способны длительно поддерживать напряжение в сети. Следовательно, при использовании такого реле для защиты двигателя нет необходимости в применении с этой целью специальных реле напряжения.

Кроме перечисленных обязательных для двигателей функций защиты, специальные защиты для двигателей имеют дополнительные функции, использование которых улучшает условия эксплуатации двигателя, тем самым снижая вероятность повреждения и продлевая срок его службы. К ним относятся:

- защита от обрыва фазы;
- ограничение количества пусков;
- запрет пуска по времени прошедшего от предыдущего пуска;
- защита минимального тока или мощности;
- защита от заклинивания или затормаживания ротора.

Специальные устройства защиты двигателей могут работать не только с током и напряжением, но и с датчиками температуры.

У двигателей большой мощности существуют также технологические защиты, которые могут действовать на отключение двигателей при: повышении температуры двигателя, его подшипников, прекращении смазки подшипников, циркуляции воздуха в системе охлаждения. Необходимость этих защит и предъявляемые к ним требования излагаются в заводской документации. Эти защиты подаются на дискретные входы устройства защиты.

## 9.2 НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### *Вращающий момент электродвигателей и момент сопротивления механизма*

Нормальный установившийся режим работы электродвигателя характеризуется равенством электромагнитного момента  $M_{\delta}$ , развиваемого электродвигателем, и механического момента сопротивления  $M_c$  механизма, приводимого в действие электродвигателем:

$$M_{\delta} = M_c \quad (9.1)$$

Если  $M_{\delta} < M_c$ , то электродвигатель будет тормозиться, а если  $M_{\delta} > M_c$ , то частота вращения электродвигателя будет увеличиваться. При неизменном напряжении питающей сети момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, зависит от частоты вращения  $n$  или, что то же самое, скольжения  $s$  (рис. 9.1). В нормальных условиях равенство  $M_{\delta} = M_c$  имеет место при  $s = 0,02-0,05$ . Максимальный момент электродвигателя  $M_{\delta \max}$  равен приблизительно двукратному номинальному моменту:

$$M_{\delta \max} / M_{\delta \text{ном}} = 2 \quad (9.2)$$

Частота вращения  $n_k$  и скольжение  $s_k$ , соответствующие максимальному моменту, называются критическими.

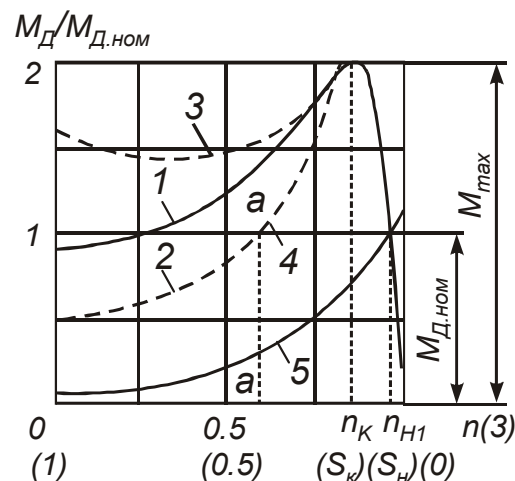


Рис. 9.1 Зависимость момента вращения асинхронных электродвигателей и моментов сопротивления механизмов от частоты вращения.

Пусковой момент  $M_{\delta \text{пуск}}$ , соответствующий частоте вращения  $n = 0$  или скольжению  $s = 1$ , в зависимости от конструкции электродвигателя имеет разные значения (кривые 1, 2, 3, рис. 9.1).

Характеристики моментов сопротивления механизмов, которые приводятся в действие электродвигателями, в зависимости от их частоты вращения, могут быть зависящими от частоты вращения (кривая 5) и не зависящими от нее (кривая 4, рис. 9.1). Момент сопротивления, не зависящий от частоты вращения, имеют, например, шаровые мельницы в системе пылеприготовления электростанции. Момент сопротивления, резко зависящий от частоты вращения, имеют все центробежные механизмы.

Ток, потребляемый статором электродвигателя из сети,  $I_\delta$  состоит из тока намагничивания  $I_{\text{нам}}$  статора и тока ротора, приведенного к обмотке статора  $I_{\text{рот}}$ :

$$I_\delta = I_{\text{нам}} + I_{\text{рот}} \quad (9.3)$$

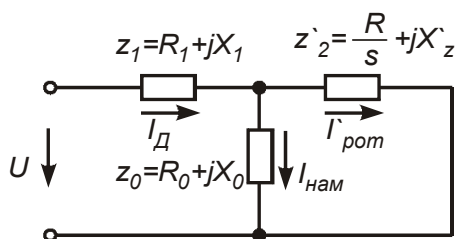


Рис. 9.2. Схема замещения асинхронного электродвигателя.

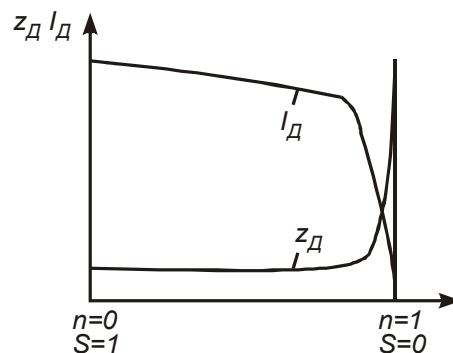


Рис. 9.3. Зависимость тока статора и сопротивления электродвигателя от скольжения.

Это следует из схемы замещения (рис. 9.2). Ток в роторе определяется наведенной в нем ЭДС, которая зависит от скольжения. Токи ротора и статора также меняются с изменением скольжения. Характер зависимости периодической составляющей  $I_\delta$  и сопротивления электродвигателя  $Z_\delta$  от скольжения представлен на рис. 9.3. При нормальной работе электродвигателя, когда скольжение составляет 2–5% (близко к нулю), сопротивление ротора очень велико,  $I_{\text{рот}}$  мал, мал и ток статора, так как ветвь намагничивания имеет большое сопротивление.

### Пуск электродвигателей

При пуске, т. е. при подаче напряжения на неподвижный электродвигатель, сопротивление его мало и ток ротора имеет максимальное значение. Соответственно, максимальное значение имеет и ток статора. Ток статора при пуске электродвигателя называется пусковым током. Начальный пусковой ток равен току трехфазного КЗ за сопротивлением, равным сопротивлению неподвижного электродвигателя. Пусковой ток состоит из переменной составляющей, затухающей по мере увеличения частоты вращения, и апериодической составляющей, затухающей в течение нескольких периодов. Из осциллограммы пуска двигателя, представленной на рис. 9.4, видно, что по мере разворота ток, потребляемый электродвигателем, меняется вначале мало, и только при приближении к синхронной частоте вращения он быстро падает. Объясняется это характером изменения сопротивления двигателя. Периодическая составляющая пускового тока электродвигателя  $I_{\delta \text{ пуск}}$  при неподвижном роторе в 4–8 раз превосходит  $I_{\text{ном}}$ . Пик тока с учетом апериодической составляющей достигает:

$$I_{\delta \text{ пуск}} = (1,6 \div 1,8) \cdot I_{\text{ном}} \quad (9.4)$$

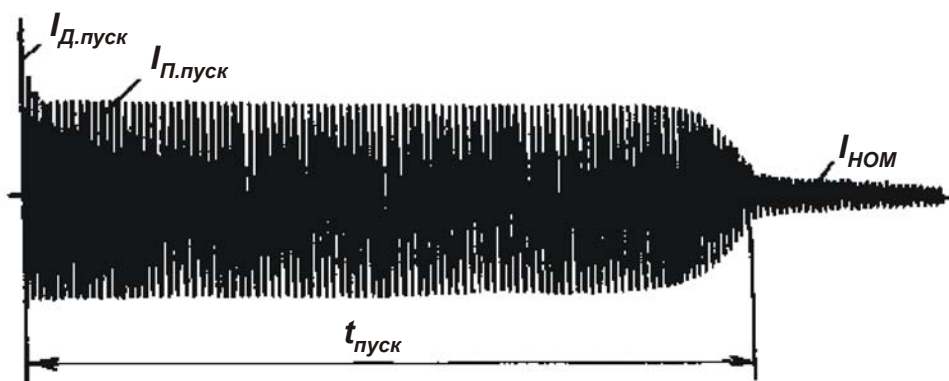


Рис. 9.4 Осциллограмма пускового тока асинхронного электродвигателя.

Продолжительность затухания периодической составляющей пускового тока до значения номинального тока зависит от параметров электродвигателя и условий пуска. При пуске с нагрузкой разворачивание электродвигателя до номинальной скорости происходит медленнее и продолжительность спада тока увеличивается. Это объясняется тем, что ускорение вращения ротора зависит от значения избыточного момента:

$$M_{\text{изб}} = M_\delta - M_c \quad (9.5)$$

Если  $M_\delta$  превосходит  $M_c$  во все время пуска, то электродвигатель пускается быстро и легко. Как видно из рис. 9.1, электродвигатели, приводящие механизмы с зависимым от частоты вращения моментом сопротивления, пускаются легче, чем электродвигатели, приводящие механизмы с независимым от частоты вращения моментом сопротивления. В последнем случае при недостаточном значении пускового момента электродвигатели могут вообще не развернуться (кривые 2 и 4, рис. 9.1), так как, начиная со скольжения, соответствующего точке *a*,  $M_c$  превосходит  $M_\delta$ .

Электродвигатели с глубоким пазом и двойной обмоткой ротора имеют наиболее благоприятный пусковой момент (кривая 3, рис. 9.1). Длительность пуска электродвигателей  $t_{\text{пуск}}$ , как правило, не превосходит 10–15 с, и только у электродвигателей с тяжелыми условиями пуска это значение может быть значительно больше.

**При возникновении КЗ в питающей сети** вблизи зажимов электродвигателя, последний за счет внутренней ЭДС, поддерживаемой энергией магнитного поля, посылает к месту КЗ быстро затухающий ток. Броски тока КЗ могут достигать значений пусковых токов.

Зависимость момента электродвигателей от напряжения выражается формулой:

$$M_{\partial} = kU^2 \quad (9.6)$$

При КЗ в сети напряжение на зажимах электродвигателей снижается. В результате этого, моменты электродвигателей уменьшаются, и они начинают тормозиться, увеличивая скольжение (кривые 1, 1', 1'', рис. 9.5) до тех пор, пока вновь не восстановится равенство  $M_{\partial} = M_c$ . Если при этом окажется, что  $M_{\partial \text{max}} = M_c$  (кривая 1'', точка *a* на рис. 9.5), то электродвигатель будет находиться на пределе устойчивой работы и иметь скольжение, равное критическому. При дальнейшем снижении напряжения электродвигатель будет тормозиться вплоть до полной остановки. После отключения КЗ напряжение питания восстанавливается, и дальнейшее поведение электродвигателя будет зависеть от скольжения, имевшего место в момент восстановления напряжения, и соответствующих ему значений  $M_{\partial}$  и  $M_c$ .

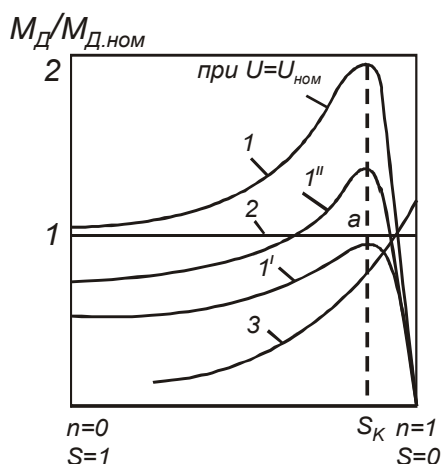


Рис. 9.5 Зависимость момента вращения асинхронных электродвигателей от скольжения  $s$  при различных значениях напряжения.

При  $M_{\partial} > M_c$  электродвигатель развернется до нормальной частоты вращения, а при  $M_{\partial} < M_c$  будет продолжать тормозиться до полного останова. В этом случае электродвигатель необходимо отключить, так как он будет потреблять пусковой ток, не имея возможности развернуться.

**Самозапуск электродвигателей** тяжелее обычного пуска. Объясняется это тем, что при самозапуске электродвигатели пускаются нагруженными, а электродвигатели с фазным ротором – без пускового реостата в цепи ротора, что уменьшает пусковой момент и увеличивает пусковой ток и, наконец, пускается большое количество электродвигателей одновременно, что вызывает падение напряжения в питающей сети от суммарного пускового тока. Однако самозапуск электродвигателей проходит сравнительно легко. Так самозапуск электродвигателей собственных нужд электростанций возможен даже в тех случаях, когда в первый момент после восстановления напряжения значение его составляет  $0,55U_{\text{ном}}$ . При этом общее время самозапуска не превышает 30–35 с, что допустимо по их нагреву.

В случае обрыва одной из фаз обмотки статора электродвигатель продолжает работать. Частота вращения ротора при этом несколько уменьшается, а обмотки двух, оставшихся в работе фаз перегружаются током в 1,5–2 раза большим номинального. Защита от работы на двух фазах применялась ранее лишь на электродвигателях напряжением до 500 В, защищенных предохранителями, если двухфазный режим работы может повлечь за собой повреждение электродвигателя. В настоящее время в связи с высокой стоимостью двигателей высокого напряжения и высокой вероятностью неполнофазных режимов в питающей сети считается целесообразным, не вводя специальную защиту от режима работы двумя фазами, отключать двигатели защитой от перегрузки, которая имеет подходящие для этой цели уставку  $(1,1 \div 1,3)I_{\text{ном}}$ . Токовые органы защиты от перегрузки в этом случае должны включаться не менее чем в 2 фазы трансформаторов тока двигателей.

### 9.3 ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ

Защита от КЗ между фазами является основной РЗ электродвигателей, и установка ее обязательна во всех случаях. В качестве РЗ электродвигателей мощностью до 5000 кВт от КЗ, согласно ПУЭ, применяется МТЗ (токовая отсечка). Наиболее просто токовая отсечка выполняется с реле прямого действия,

встроенными в привод выключателя. Для работы при всех видах междупазных КЗ отсечка должна выполняться в двух фазах.

Токовая отсечка должна быть отстроена от пускового тока двигателя. В момент включения двигателя появляется бросок тока намагничивания, в  $1,6 \div 1,8$  раза превышающий по амплитуде установившийся пусковой ток двигателя. Это бросок учитывается повышенным коэффициентом надежности при отстройке от пускового тока двигателя.

$$I_{C3} = k_n \cdot I_{n\max} \quad (9.7)$$

где

$I_{C3}$  – первичный ток срабатывания отсечки;

$k_n$  – коэффициент надежности, с учетом отстройки от броска тока намагничивания равен 1,8 - для отсечек с временем срабатывания 0,05 с и более, или 2 - при времени срабатывания меньшем 0,05 с;

$I_{n\max}$  – пусковой ток двигателя в максимальном режиме.

Кратность пускового тока двигателя может быть взята из паспорта двигателя. А пусковой ток равен:

$$I_{n\max} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном}} \quad (9.8)$$

После выбора уставки должна быть проверена чувствительность отсечки по току:

$$k_u = I_{K3\min}^{(2)} / I_{C3} \quad (9.9)$$

где

$k_u$  – коэффициент чувствительности, он должен быть не менее 2;

$I_{K3\min}^{(2)}$  – ток двухфазного короткого замыкания в минимальном режиме.

Если ток срабатывания отсечки отстроен от пускового тока электродвигателя, то она надежно отстроена и от тока, который электродвигатель посылает в сеть при внешнем КЗ.

Токовую РЗ электродвигателей мощностью до 2000 кВт ранее выполняли на простой и дешевой однорелейной схеме, включая реле на разность токов двух фаз. Недостатком этой схемы является более низкая чувствительность по сравнению с двухрелейной отсечкой, к двухфазным КЗ между одной из фаз, на которых установлен ТТ, и фазой без ТТ. Ток срабатывания реле отсечки, выполненной по однорелейной схеме, в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем в двухрелейной схеме: при выборе уставки учитывался коэффициент схемы при симметричном пусковом режиме равный  $k_{ex} = \sqrt{3}$ .

$$I_{C3} = \sqrt{3} \cdot k_n \cdot I_{n\max} \quad (9.10)$$

Соответственно ниже в  $\sqrt{3}$  раз получалась и чувствительность защиты.

На электродвигателях мощностью 2000-5000 кВт токовую отсечку необходимо выполнять двухрелейной. Двухрелейную схему отсечки требуется также применять на электродвигателях мощностью до 2000 кВт, если коэффициент чувствительности однорелейной схемы при двухфазном КЗ на выводах электродвигателя окажется менее двух ( $k_u < 2$ ). При использовании реле УЗА-АТ или РС81 отсечка выполняется 2-элементной, независимо от мощности двигателя.

На электродвигателях мощностью 5000 кВт и более должна дополнительно устанавливаться продольная дифференциальная РЗ, обеспечивающая более высокую чувствительность к КЗ на выводах и в обмотках ( $I_{C3} \leq I_{\text{ном}}$ ). Если токовая отсечка не обладает необходимой чувствительностью, то дифзащита может выполняться и на двигателях меньшей мощности, при условии наличия на двигателе выводов фаз со стороны нейтрали.

Для этого применяются специальные дифференциальные реле, включаемые на комплекты трансформаторов тока, соединенные в неполную звезду на сторонах выводов и нейтрали двигателей. Защита выполняется двухфазной. Могут использоваться реле РНТ-565, ДЗТ-11, или РСТ-15 ЧЭАЗ, РС83-ДТ2. Описание дифференциальных реле приводилось в гл. 8.

Поскольку РЗ в двухфазном исполнении не реагирует на двойное замыкание на землю, одно из которых возникает в обмотке электродвигателя на фазе В, в которой отсутствует ТТ, дополнительно устанавливается специальная РЗ от двойных замыканий на землю, которая выполняется токовым реле, подключенным к ТТНП. Эта функция может выполняться защитой от замыкания на землю, если она не имеет выдержки времени.

#### 9.4 ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Перегрузка электродвигателей возникает при затянувшемся пуске и самозапуске, из-за перегрузки приводимых механизмов. Перегрузка может возникнуть также при пониженном напряжении на выводах двигателя. Для электродвигателя опасны только устойчивые перегрузки. Сверхтоки, обусловленные пуском или самозапуском электродвигателя, кратковременны и самоликвидируются при достижении нормальной частоты вращения.

Значительное увеличение тока электродвигателя получается также при обрыве фазы, что встречается, например, у электродвигателей, защищаемых предохранителями, при перегорании одного из них. При номинальной нагрузке в зависимости от параметров электродвигателя увеличение тока статора

при обрыве фазы будет составлять примерно  $(1,6 \div 2,5) I_{ном}$ . Эта перегрузка носит устойчивый характер. Также устойчивый характер носят сверхтоки, обусловленные механическими повреждениями электродвигателя или вращаемого им механизма и перегрузкой механизма. Основной опасностью сверхтоков является сопровождающее их повышение температуры отдельных частей, и в первую очередь, обмоток. Повышение температуры ускоряет износ изоляции обмоток и снижает срок службы двигателя. Перегрузочная способность электродвигателя определяется характеристикой зависимости между сверхтоком и допусаемым временем его прохождения:

$$t = T \frac{a - 1}{k - 1} \quad (9.11)$$

где

$t$  — допустимая длительность перегрузки, с;

$T$  — постоянная времени нагрева, с;

$a$  — коэффициент, зависящий от типа изоляции электродвигателя, а также периодичности и характера сверхтоков (для асинхронных электродвигателей в среднем  $a = 1,3$ );

$k$  — кратность сверхтока, т. е. отношение тока электродвигателя  $I_{\delta}$  к  $I_{ном}$ .

$$k = I_{\delta} / I_{ном} \quad (9.12)$$

Вид перегрузочной характеристики при постоянной времени нагрева  $T = 300$  с представлен на рис. 9.6.

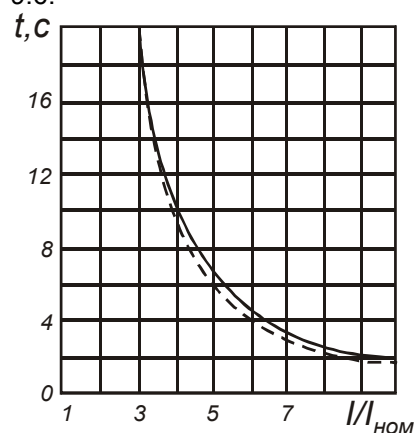


Рис. 9.6. Характеристика зависимости допустимой длительности перегрузки от кратности тока перегрузки

При решении вопроса об установке РЗ от перегрузки и характере ее действия руководствуются условиями работы электродвигателя, имея в виду возможность устойчивой перегрузки его приводного механизма:

а) на электродвигателях механизмов, не подверженных технологическим перегрузкам (например, электродвигателях циркуляционных, питательных насосов и т. п.) и не имеющих тяжелых условий пуска или самозапуска, РЗ от перегрузки может не устанавливаться; однако, ее установка целесообразна на двигателях объектов, не имеющих постоянного обслуживающего персонала, учитывая опасность перегрузки двигателя при пониженном напряжении питания или неполнофазном режиме;

б) на электродвигателях, подверженных технологическим перегрузкам (например, электродвигателях мельниц, дробилок, багерных насосов и т. п.), а также на электродвигателях, самозапуск которых не обеспечивается, РЗ от перегрузки должна устанавливаться;

в) защита от перегрузки выполняется с действием на отключение в случае, если не обеспечивается самозапуск электродвигателей или с механизма не может быть снята технологическая перегрузка без останова электродвигателя;

г) защита от перегрузки электродвигателя выполняется с действием на разгрузку механизма или сигнал, если технологическая перегрузка может быть снята с механизма автоматически или вручную персоналом без останова механизма, и электродвигатели находятся под наблюдением персонала;

д) на электродвигателях механизмов, могущих иметь как перегрузку, устраняемую при работе механизма, так и перегрузку, устранение которой невозможно без останова механизма, целесообразно предусматривать действие РЗ от сверхтоков с меньшей выдержкой времени на отключение электродвигателя; в тех случаях, когда ответственные электродвигатели собственных нужд электростанций находятся под постоянным наблюдением дежурного персонала, защиту их от перегрузки можно выполнить с действием на сигнал.

**Защиту электродвигателей, подверженных технологической перегрузке**, желательно иметь такой, чтобы она, с одной стороны, защищала от недопустимых перегрузок, а с другой – давала возможность наиболее полно использовать перегрузочную характеристику электродвигателя с учетом предшествовавшей нагрузки и температуры окружающей среды. Наилучшей характеристикой РЗ от сверхтоков являлась бы такая, которая проходила несколько ниже перегрузочной характеристики (пунктирная кривая на рис. 9.6).



### **Защита с тепловым реле**

Лучше других могут обеспечить характеристику, приближающуюся к перегрузочной характеристике электродвигателя, тепловые реле, которые реагируют на количество тепла  $Q$ , выделенного в сопротивлении его нагревательного элемента. Тепловые реле выполняются на принципе использования различия в коэффициенте линейного расширения различных металлов под влиянием нагревания. Основой такого теплового реле является биметаллическая пластина состоящая из спаянных по всей поверхности металлов  $a$  и  $b$  с сильно различающимися коэффициентами линейного расширения. При нагревании пластина прогибается в сторону металла с меньшим коэффициентом расширения и замыкает контакты реле.

Нагревание пластины осуществляется нагревательным элементом при прохождении по нему тока.

Тепловые реле сложны в обслуживании и наладке, имеют различные характеристики отдельных экземпляров реле, часто не соответствуют тепловым характеристикам электродвигателей и имеют зависимость от температуры окружающей среды, что приводит к нарушению соответствия тепловых характеристик реле и электродвигателя. Поэтому, тепловые реле применяются в редких случаях, обычно в автоматах 0,4 кВ.

### **Защита от перегрузки с токовыми реле**

Для защиты электродвигателей от перегрузки обычно применяются МТЗ с использованием реле с ограниченно зависимыми характеристиками типа РТ-80, или МТЗ с независимыми токовыми реле и реле времени.

Преимуществами МТЗ по сравнению с тепловыми являются более простая их эксплуатация и более легкий подбор и регулировка характеристик РЗ. Однако, МТЗ не позволяют использовать перегрузочные возможности электродвигателей из-за недостаточного времени действия их при малых кратностях тока.

Максимальная токовая РЗ с независимой выдержкой времени в однорелейном исполнении обычно применяется на всех асинхронных электродвигателях собственных нужд тепловых и атомных электростанций, а на промышленных предприятиях - для всех синхронных (когда она совмещена с РЗ от асинхронного режима) и асинхронных электродвигателей, являющихся приводами ответственных механизмов, а также для неотчетственных асинхронных электродвигателей с временем пуска более 12–13 с.

РЗ от перегрузки с зависимой выдержкой времени лучше согласовываются с тепловой характеристикой двигателя, однако и они недостаточно используют перегрузочную способность двигателей в области малых токов.

Защита от перегрузки с независимой или зависимой характеристикой выдержки времени может быть выполнена на устройствах УЗА-АТ, РС81, РС83-А2. По выше приведенным причинам, с целью обеспечения работы защиты от перегрузки в неполнофазных режимах – для защиты от перегрузки целесообразно использовать двухэлементную максимальную защиту, возложив функцию защиты от коротких замыканий на токовую отсечку. В состав некоторых модификаций УЗ-АТ входит однофазная защита от перегрузки, которую можно использовать в случае, если МТЗ занята для других целей. Учитывая малую выдержку времени однофазной защиты от перегрузки (7–10 с), такую защиту целесообразно использовать только на сигнал. Ток срабатывания защиты от перегрузки устанавливается из условия отстройки от  $I_{ном}$  электродвигателя:

$$I_{CЗ} = \frac{k_{отс}}{k_{\epsilon}} \cdot I_{ном} \quad (9.13)$$

Время действия МТЗ от перегрузки  $t_{ЗП}$  должно быть таким, чтобы оно было больше времени пуска электродвигателя  $t_{пуск}$ , а у электродвигателей, участвующих в самозапуске, больше времени самозапуска.

Время пуска асинхронных электродвигателей обычно составляет 10–15 с. Поэтому характеристика реле с зависимой характеристикой типа УЗА-АТ должна иметь при пусковом токе время, не менее 12–15 с. Выбирается характеристика 3 – крутая. На РЗ от перегрузки с независимой характеристикой выдержка времени принимается 12–20 с.

### **Защита от перегрузки с тепловой характеристикой выдержки времени микропроцессорных защит на специализированном реле MiCOM P220**

Специализированная защита двигателей типа MiCOM P220 создает тепловую модель двигателя из составляющих прямой и обратной последовательности тока, потребляемого двигателем таким образом, чтобы учесть тепловое воздействие в статоре и роторе. Составляющая обратной последовательности токов, потребляемых в статоре, генерирует в роторе токи значительной амплитуды, которые создают существенное повышение температуры в обмотке ротора. Результатом сложения, проведенного MiCOM P220 является эквивалентный тепловой ток  $I_{экв}$ , отображающий повышение температуры, вызванное током двигателя. Ток  $I_{экв}$  вычисляется в соответствии с зависимостью:

$$I_{экв} = \sqrt{(I_{пр}^2 + K_{\epsilon} I_{обр}^2)} \quad (9.14)$$

Начиная с этого эквивалентного теплового тока, тепловой уровень двигателя  $\Theta$  вычисляется каждые 100 мс защитой MiCOM P220 по следующему выражению:

$$\Theta_{I+1} = \left( \frac{I_{\text{экв}}}{I_{\Theta >}} \right)^2 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{0,1}{T}\right) \right] + \Theta_I \cdot \exp\left(-\frac{0,1}{T}\right) \quad (9.15)$$

где:

$K_s$  – коэффициент усиления влияния тока обратной последовательности;  
 $I_{\Theta >}$  – уставка тока тепловой перегрузки;  
 $\Theta_I$  – значение теплового уровня, подсчитанное предварительно (на 100 мс раньше);  
 $T$  – постоянная времени двигателя. В зависимости от режима работы двигателя защита использует одну из трех следующих постоянных времени:

- тепловая постоянная времени  $T_{e1}$ , которая применяется, когда эквивалентный тепловой ток  $I_{\text{экв}}$  находится между 0 и  $2 I_{\Theta >}$ , т. е. когда двигатель работает (режим нагрузки или перегрузки);
- начальная постоянная времени  $T_{e2}$ , которая применяется, когда эквивалентный тепловой ток  $I_{\text{экв}}$  больше чем  $2 I_{\Theta >}$ , т. е. когда двигатель запускается или при заклинивании ротора;
- постоянная времени охлаждения  $T_{ox}$ , которая применяется, когда двигатель выключен (дискретный вход L1 в нулевом логическом положении – зажимы 22–24). В этом случае двигатель больше не потребляет ток, и значение теплового уровня поэтому снижается во времени по выражению:

$$\Theta_{I+1} = \Theta \cdot \exp\left(-\frac{0,1}{T_{ox}}\right) \quad (9.16)$$

Сигнал тепловой перегрузки “ТЕПЛ.ПЕРЕГР” генерируется, когда значение теплового уровня  $\Theta$  достигнет 100%. Может быть выполнено действие защиты от перегрузки на отключение.

#### **Выбор уставок функции перегрузки:**

$K_s$  – коэффициент тока обратной последовательности. Учитывает повышенное воздействие тока обратной последовательности по сравнению с прямой на нагрев двигателя. При отсутствии необходимых данных принимается равным 4 – для отечественных двигателей и 6 – для зарубежных.

$I_{\Theta >}$  – уставка тока тепловой перегрузки – вторичный ток срабатывания защиты.

$$I_{\Theta >} \geq 1,1 I_{н.дв.} / K_{mm} \quad (9.17)$$

Ток срабатывания пускового органа тепловой перегрузки принимается равным  $1,2 I_{ном}$  двигателя.

$T_{e1}$  – постоянная времени нагрева токами в диапазоне 1–2  $I_{н.дв.}$ , нормальный процесс перегрузки, когда целесообразно учитывать теплоотдачу двигателя в окружающую среду. При отсутствии данных об этой постоянной времени принимается равной 10 мин.

$T_{e2}$  – постоянная времени нагрева токами величиной более 2, пуск, заклинивание ротора, когда теплоотдачу двигателя в окружающую среду учитывать нецелесообразно. При отсутствии данных об этой постоянной времени принимается равной 0,8  $T_{e1}$ .

$T_{ox}$  – постоянная времени охлаждения двигателя после его отключения, можно принять равной 4  $T_{e1}$ . При этом учитывается, что в остановленном двигателе отсутствует искусственное охлаждение (остановлен вентилятор).

Таким образом, можно выбрать эти уставки, зная только номинальный ток двигателя. Эти данные для многих двигателей дают существенный запас, но могут не обеспечить технологический процесс с частыми пусками или тяжелыми условиями пуска. Поэтому, при необходимости заглубить защиту, нужно произвести тепловые испытания или тепловые расчеты двигателей.

Коррекция допустимого тока двигателя при изменении температуры окружающей среды. Если наружная температура превышает 40 градусов, то уставка по допустимому току двигателя  $I_{\Theta}$  уменьшается

пропорционально превышению окружающей температуры по коэффициенту  $K$ :  $K = 1 - \frac{T_{окр} - 40}{100}$ .

Функция вводится при ее наличии в реле и подключении к зажимам реле датчика температуры.

## **9.5 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТАВКИ РЕЛЕ MiCOM P220, СВЯЗАННЫЕ С ТЕПЛОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ ДВИГАТЕЛЯ**

### **Запрет отключения от тепловой перегрузки при пуске двигателя**

Функция обеспечивает завершение процесса пуска в случае достижения тепловой характеристикой  $\Theta$  величины, равной 1 в процессе пуска. Функция работает, если перед пуском двигателя величина  $\Theta$  была менее 0,9. При этом двигатель остается защищенным защитой от затяжного пуска. Функция автоматически выводится по истечении выдержки времени пуска  $t_{пуск}$ . Уставки: **Да** или **Нет**.

### **Сигнализация тепловой перегрузки**

Вводится при действии защиты от перегрузки на отключение:  $\Theta_{сигн.} = 0,95$ .

### **Запрет пуска**

Повторный пуск запрещается, если тепловой уровень  $\Theta$  имеет такую величину, что при повторном пуске двигатель перегреется. Пуск двигателя может быть обеспечен, если начальный уровень  $\Theta$  не превышает 0,9.

$\Theta_{запрета пуска} = 0,9$ .



### **Затяжной пуск**

Время нормального пуска двигателей обычно может достигать 10–15 с, а для тяжелых условий пуска может достигать 25 с. Это время определяется, главным образом, механизмом, который приводится в действие двигателем. Так, на электростанции к двигателям с тяжелыми условиями пуска относятся двигатели дымососов, дутьевых вентиляторов, мельниц. Факт пуска определяется по получению сигнала о включении выключателя на вход  $L1$  реле (**52A**) или включению выключателя и появлению пускового тока (**52 A + I**). При прямом пуске двигателя применяется способ (**52 A + I**). Способ устанавливается в подменю конфигурация.

Уставка по току пуска, по условию отстройки от реально возможной перегрузки двигателей:

$$I = 2I_{\Theta} \quad (9.18)$$

Уставка по времени пуска должна отстраиваться от возможного времени пуска электродвигателя при неблагоприятных условиях:

$$TI_{\text{пуск}} = 1,2T_{\text{пуск}} \quad (9.19)$$

При отсутствии данных исходя из допускаемого времени пуска в обычных условиях 15 с принимается  $TI_{\text{пуск}} = 18$  с.

### **Заклинивание ротора**

Заклинивание ротора двигателя может произойти при пуске двигателя или в процессе его работы. Для этих условий можно выполнить разные уставки.

Заклинивание двигателя при пуске двигателя фиксируется по факту включения выключателя, и отсутствию на входе  $L2$  после истечения выдержки времени  $t_{\text{зак}}$  сигнала от двигателя о его вращении.

Уставка по току пуска, по условию отстройки от реально возможной перегрузки двигателей:  $I_{\text{зак}} = 2I_{\Theta}$ .

Уставка по времени пуска должна отстраиваться от времени, после которого датчик скорости двигателя надежно зафиксирует его разворот.

$$TI_{\text{зак}} = 5 \text{ с}$$

При отсутствии на двигателе датчика вращения, эта функция не может быть реализована. И ее роль с большей выдержкой времени выполняет функция: “затяжной пуск”.

Функция заклинивание ротора при работающем двигателе вводится автоматически при его успешном развороте после истечения выдержки времени  $TI_{\text{пуск}}$ . Работает при условии отсутствия сигнала: “разрешение самозапуска”. Уставки по току и времени выполнены ранее. При наличии сигнала “разрешение самозапуска” эта функция блокируется на время  $TI_{\text{пуск}}$ .

**Несимметрия.** Защита двигателя от перегрузки токами обратной последовательности. Защищает двигатель от подачи напряжения с обратным чередованием фаз, от обрыва, от работы при длительной несимметрии напряжений.

При подаче на двигатель напряжения с обратным чередованием фаз двигатель начинает вращаться в обратную сторону, приводимый в действие механизм может быть заклинен или вращаться с моментом сопротивления, отличающимся от момента прямого вращения. Таким образом, величина тока обратной последовательности двигателя может колебаться в широких пределах. При обрыве фазы двигатель уменьшает вращающий момент в 2 раза и для компенсации у него в 1,5÷2 раза увеличивается ток.

При несимметрии питающих напряжений ток обратной последовательности может иметь различную величину до самых малых значений. Появление тока обратной последовательности более всего влияет на нагрев ротора двигателя, где он наводит токи двойной частоты. Таким образом, целесообразно иметь защиту по  $I_2$ , которая отключала бы двигатель для предотвращения его перегрева.

Защита имеет 2 ступени:

Ступень  $I_{\text{обр}} >$  с независимой выдержкой времени. Ток срабатывания принимается равным  $(0,2 \div 0,25) I_{\text{ном}}$  двигателя. Выдержка времени должна обеспечить отключение несимметричных коротких замыканий в прилегающей сети, для чего она должна быть на ступень больше чем защита питающего трансформатора.

$$tI_{\text{обр}} \geq t_{\text{МТЗ}} + Dt \quad (9.20)$$

Ступень  $I_{\text{обр}} \gg$  с зависимой характеристикой выдержки времени может быть использована для повышения чувствительности защиты, если известны реальные тепловые характеристики двигателя по току обратной последовательности.

### **Элементы тепловой автоматики двигателя**

#### **Потеря нагрузки.**

Функция позволяет обнаружить расцепление двигателя с приводимым им в движение механизмом вследствие обрыва муфты, ленты транспортера, выпуск воды из насоса и т.д. по уменьшению рабочего тока двигателя.

Уставка минимального тока:

$$I \leq (1,2 \div 1,5) I_{\text{xx}} \quad (9.21)$$

где

$I_{xx}$  – ток холостого хода двигателя (механизма) – определяется при испытаниях.

Выдержка времени минимального тока двигателя  $tI <$  определяется исходя из технологических особенностей механизма – возможных кратковременных сбросов нагрузки, при отсутствии таких соображений принимается равным:

$$tI \leq 5 \text{ с}$$

Выдержка времени запрета автоматики минимального тока двигателя  $t_{запр.}$  задерживает ввод автоматики при пуске двигателя, если нагрузка подключается к двигателю после его разворота, или определяется исходя из технологии подачи нагрузки на двигатель, если нагрузка подключена к двигателю постоянно. Уставка должна быть равна времени разворота двигателя плюс необходимый запас:

$$t_{запр.} = 1,2T_{пуска} \quad (9.22)$$

#### **Количество пусков двигателя**

При отсутствии конкретных данных по двигателю можно руководствоваться следующими общими соображениями:

– Согласно ПТЭ, двигатели обязаны обеспечивать 2 пуска из холодного состояния и 1 из горячего состояния.

– Постоянная времени охлаждения двигателя равна 40 мин.

– Можно выполнить следующие уставки в автоматике подсчета пусков:

Уставка по времени, в течение которого считаются пуски:  $T_{отсчета} = 30$  мин.

Количество горячих пусков – 1.

Количество холодных пусков – 2.

Уставка по времени, в течение которого повторный пуск запрещен  $T_{запрета} = 5$  мин.

– Минимальное время между пусками не использовать.

#### **Время разрешения самозапуска.**

Согласно СДМ, самозапуск двигателей на электростанциях должен обеспечиваться, при времени перерыва питания 2,5 с. По этим данным производится расчетная проверка обеспечения самозапуска при перерыве питания двигателей на электростанциях.

Таким образом, для электростанций можно принять  $T_{самозап} = 2,5$  с.

Для других условий следует определить время, на которое возможен перерыв питания, например время действия АВР, произвести расчетную проверку самозапуска, и если он обеспечивается при таком перерыве питания, установить указанное время на устройстве. Если самозапуск обеспечивается при любом перерыве питания, или он запрещается, функция «разрешение самозапуска» не вводится.

### **9.6 ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

В соответствии с ПУЭ, РЗ от замыканий на землю в обмотке статора с действием на отключение устанавливается на электродвигателях мощностью 2000 кВт и более при токах замыкания на землю более 5 А, а на электродвигателях меньшей мощности – при токах замыкания на землю более 10 А. В эксплуатации, однако, при токах замыкания на землю более 5 А, РЗ от замыканий на землю часто устанавливают на электродвигателях любой мощности, что способствует ограничению их повреждений при замыканиях на землю.

Защита от замыканий на землю реагирует на емкостный ток сети и выполняется с помощью одного токового реле, которое подключается к ТТ нулевой последовательности (ТТНП), установленному на кабеле, питающем двигатель. Применяются ТТНП типов ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ и др. Описание схемы установки защиты приводилось в главе 6.

В случае, когда питание электродвигателя осуществляется по нескольким параллельным кабелям (двум-четырем), вторичные обмотки ТТНП, надетые на каждый из них, соединяются последовательно или параллельно.

На электродвигателях большой мощности, для питания которых прокладывается больше четырех кабелей, РЗ от замыканий на землю выполняется с одним общим ТТНП типа ТНПШ с подмагничиванием, аналогично защите генераторов.

Ток срабатывания РЗ выбирается на основании тех же соображений, что и для аналогичной РЗ кабельных линий, реагирующих на емкостный ток (50 Гц) (см. гл. 6):

$$I_{с.з.} = k_{омс} \cdot k_{\delta} \cdot I_c \quad (9.23)$$

где

$I_c$  – собственный емкостный ток электродвигателя;

$k_{омс}$  – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,2-1,3;

$k_{\delta}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока электродвигателя при внешних перемежающихся замыканиях на землю. Для РЗ, действующей без выдержки времени, значение этого коэффициента принимается равным 3-4. Для повышения чувствительности РЗ допускается принимать уменьшенное значение  $k_{\delta} = 1,5 \div 2$ . Защита при этом выполняется с выдержкой времени 1-2 с.

Поскольку мощность ТТНП (типов ТЗ, ТЗР и др.) невелика, для обеспечения максимальной чувствительности РЗ от замыканий на землю к каждому типу ТТНП необходимо подбирать токовое реле на

определенный ток срабатывания, имеющее соответствующее сопротивление обмотки (реле РТЗ-51, РТЗ-50, РТ-40/0,2 производства ЧЭАЗ). В составе защит УЗА, РС-80, имеется специальный промежуточный трансформатор для подключения ТТНП для защиты от замыканий на землю. В целях уменьшения перенапряжений при замыканиях на землю в сети собственных нужд (СН) энергоблоков ТЭС и АЭС большой мощности, а также повышения чувствительности и селективности действия РЗ электродвигателей 6 кВ и трансформаторов СН 6,3/0,1 кВ, эти сети могут работать с нейтралью, заземленной через резистор. Для этого на каждой секции блочных СН 6,3 кВ устанавливается дополнительный заземляющий трансформатор (ДТ), например типа ТСЗК-63, со схемой соединения обмоток звезда с заземленной нейтралью - треугольник. В нейтраль ДТ включаются параллельно два высоковольтных заземляющих резистора, по 200 Ом каждый, изготовленные из специального электротехнического бетона (бетела) (рис. 9.7, б). При этом, в случае однофазного замыкания на землю в двигателе по его цепи будет протекать активный ток  $3I_0 = 35-40$  А (достаточный для надежного действия защиты и допустимый по условию ограничения повреждения в двигателе от тока замыкания на землю). Одновременно по цепям неповрежденных элементов, присоединенных к тем же шинам, будут протекать только емкостные токи нулевой последовательности, от которых защиты рассматриваемых присоединений могут быть легко отстроены. Наличие заземляющих резисторов резко снижает вероятность перехода однофазных замыканий на землю в двухфазные и двойные КЗ, так как перенапряжения на неповрежденных фазах не будут превышать при этом значения:

$$U_{пер} = 1,8U_{ном} \quad (9.24)$$

Защита электродвигателя от замыканий на землю, как и ранее, выполняется с помощью токового реле, подключенного к ТТНП и действующего на отключение электродвигателя без выдержки времени. При отказе защиты от замыканий на землю или выключателя на поврежденном присоединении, или при замыкании  $K_3^{(1)}$  на шинах секции имеется опасность повреждения заземляющих сопротивлений  $R$  в нейтрали дополнительного трансформатора ДТ (рис. 9.7, б). Для исключения этого на ДТ предусматривается защита нулевой последовательности (КА, КТ), действующая с выдержкой времени 0,6 с на отключение трансформатора (линии), питающего секцию 6 кВ.

Запрет АВР при этом не производится.

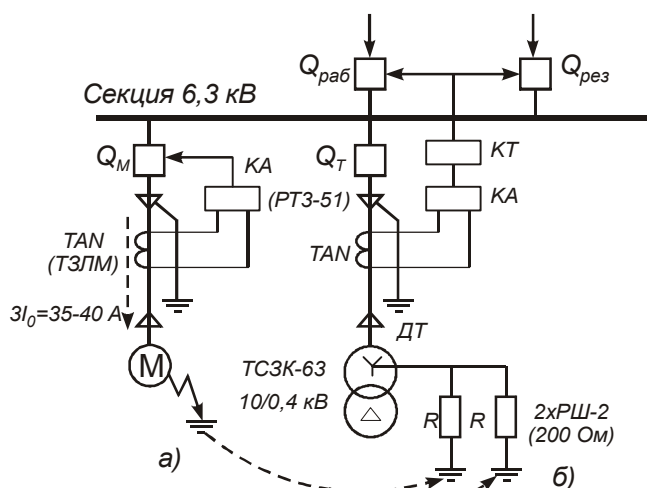


Рис. 9.7 Структурная схема защиты от замыканий на землю в сети собственных нужд 6,3 кВ

а – защита двигателя от замыканий на землю;

б – схема подключения дополнительного трансформатора с заземляющими резисторами

Для электродвигателей механизмов карьеров, рудников, торфоразработок и других предприятий, где требуется по условиям безопасности незамедлительное отключение замыкания на землю даже при очень малых значениях тока в месте повреждения (0,2-0,5 А) рекомендуется применять более чувствительную направленную РЗ от замыканий на землю типа ЗЗП-1 производства ЧЭАЗ. Полностью соответствует этим требованиям и устройство защиты ЗЗН1. Эта защита не требует отстройки от собственного емкостного тока двигателя и, поэтому, может быть выполнена более чувствительной.

Для выполнения РЗ от двойных замыканий на землю на электродвигателях, оснащенных продольной дифференциальной РЗ в двухфазном исполнении или, в случае, если основная ступень ЗЗ выполнена с выдержкой времени, к вторичной обмотке ТТНП подключается действующее на отключение без выдержки времени второе токовое реле, имеющее  $I_{сз} = 100-200$  А. РС83-А2 имеет для этой цели специальную двухступенчатую защиту от ЗНЗ. В качестве второго реле может быть применено реле РС-40М1.

## 9.7. ЗАЩИТА МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Защита минимального напряжения устанавливается на электродвигателях, которые необходимо отключать при понижении напряжения для обеспечения самозапуска ответственных электродвигателей, а также электродвигателей, самозапуск которых при восстановлении напряжения недопустим по условиям техники безопасности или особенностям технологического процесса.

На электростанциях к ответственным относятся такие электродвигатели, отключение которых вызывает снижение нагрузки или останов электростанции: двигатели питательных, конденсатных и циркуляционных насосов, дутьевых вентиляторов и питателей пыли. Неответственными считаются электродвигатели, отключение которых не отражается на нагрузке электростанции: мельниц при наличии промежуточных бункеров, багерных насосов и т.п.

Если мощность всех ответственных электродвигателей превышает допустимую мощность по условию самозапуска, то при понижении напряжения необходимо отключать и некоторые ответственные электродвигатели. По истечении времени, достаточного для разветвления неотключаемых электродвигателей, отключенные ответственные электродвигатели можно включать обратно при помощи АПВ.

– Отключение электродвигателей при исчезновении напряжения обеспечивается установкой одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение. Существенным недостатком такой РЗ минимального напряжения является возможность ее неправильной работы в случае обрыва цепей напряжения. Поэтому РЗ с одним реле напряжения применима лишь для неответственных электродвигателей. Обычно применяется ЗМН с контролем снижения напряжения одновременно в трех фазах (схема «И»). В устройствах УЗА-АН РС82 применяется именно такая логика выполнения ЗМН 2 ( $U < <$ ). Такая логика не годится, если ЗМН используется в качестве блокировки по напряжению максимальной защиты (требуется реагирование блокировки на замыкание между двумя любыми фазами, поэтому, в состав УЗА=АН входит ступень ( $U <$ ) работающая по схеме «ИЛИ». Более сложное микропроцессорное устройство защиты РС83-В2 имеет переключение логики: схема «И» для ЗМН и схема «ИЛИ» для блокировки по напряжению. Если применить для защиты двигателя устройство РС83-АВ1 в состав которого входит защита минимального напряжения, то можно оказаться от применения групповой защиты, выполнив на электродвигателе индивидуальную защиту минимального напряжения.

Напряжение срабатывания реле  $KV1$  принимается порядка  $70\% U_{ном}$ . Выдержки времени на отключение: 0,5-1,5 с – для неответственных электродвигателей, 10–15 с – для ответственных. На блочных электростанциях обычно применяется групповая защита минимального напряжения с уставками:

– 1 ступень – обеспечение самозапуска остающихся электродвигателей. Она действует на часть двигателей (малоответственных). Уставка выбирается по условиям обеспечения возврата при восстановлении напряжения после отключения коротких замыканий защитой, а так же предотвращение отключения двигателя при коротких замыканиях.

$$U \leq 0,7 U_n \quad (9.25)$$

Выдержка времени первой ступени отстраивается от времени действия защит отходящих линий (двигателей) и обычно равна по времени защите питающего ввода:

$$t_1 = t_{мтз.в} \quad (9.26)$$

Для устойчивой работы двигателей необходимо, чтобы все защиты отходящих линий имели токовую отсечку без выдержки времени. Если это условие не обеспечивается, двигатели могут затормозиться, и последует самозапуск всех двигателей, который может оказаться неуспешным, поэтому как правило уставка МТЗ рабочего и резервного ввода а значит и ЗМН равна 0.3 с.

2 ступень используется для отключения остальных двигателей, если напряжение недостаточно для запуска двигателей, или по технологическим условиям самозапуск уже не целесообразен.

Уставка по напряжению равна напряжению, при котором двигатель уже не может развернуться:

$$U \leq (0,5 \div 0,6) U_n \quad (9.27)$$

Выдержка времени второй ступени определяется технологическими условиями работы механизмов агрегата и обычно равна по времени:

$$t_2 = 3 \div 9 \text{ с}$$

## 9.8. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1000 В.

Защиту электродвигателей напряжением 500, 380 и 220 В осуществляют, исходя из тех же требований, что и к электродвигателям более высоких напряжений. Для этих электродвигателей применяются мгновенная РЗ от междупазных КЗ, РЗ от перегрузки, РЗ минимального напряжения. Защита от КЗ может осуществляться с помощью плавких предохранителей, при этом в качестве коммутационного аппарата используется трехфазный магнитный пускатель (контактор) подтянутый, пока на его катушку подано напряжение.

Магнитными пускателями называются трехфазные коммутационные аппараты низкого напряжения (контакторы), предназначенные для дистанционного управления трехфазными электродвигателями и рассчитанные на разрыв нормального рабочего тока двигателя и тока его перегрузки, но не тока КЗ. Отключение токов КЗ при применении магнитного пускателя возлагается на включаемые последовательно с ним предохранители. Схема включения с помощью пускателя и защиты предохранителями показана на рис 9.8. Магнитные пускатели (рис. 9.8) в большинстве случаев не имеют защелки и во включенном поло-

жении удерживаются действием электромагнита YA, обмотка которого подключена на напряжение питания. Включение магнитного пускателя осуществляется нажатием кнопки SB1. При этом замыкается цепь обмотки удерживающего электромагнита, якорь которого притягивается и замыкает механически связанные с ним силовые контакты. Кнопка SB1 имеет самовозврат, поэтому после ее размыкания цепь обмотки электромагнита остается замкнутой через вспомогательный контакт SQ, шунтирующий кнопку SB1. Для отключения пускателя вручную служит кнопка SB2, при нажатии которой разрывается цепь удерживания электромагнита, и якорь его, отпадая, размыкает силовые контакты YA1. При понижении напряжения питающей сети электромагнит отпадает, и электродвигатель отключается, чем осуществляется защита минимального напряжения. После восстановления напряжения магнитный пускатель сам включиться не может - включение его должно вновь осуществляться вручную. Защита электродвигателя от перегрузки выполняется тепловыми реле KA1 и KA2. Тепловые реле настраиваются таким образом, чтобы они не срабатывали от токов, проходящих при пуске и самозапуске электродвигателя.

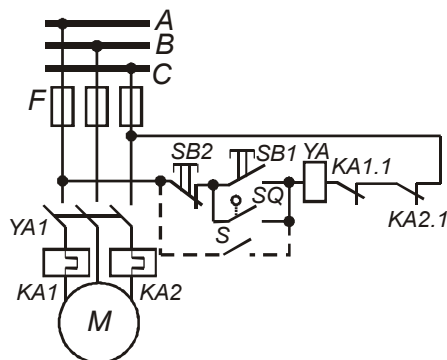


Рис. 9.8 Схема защиты электродвигателя напряжением до 500 В с магнитным пускателем.

Схема включения цепей магнитного пускателя, приведенная на рис. 9.8, применяется для защиты неответственных электродвигателей, подверженных технологической перегрузке. В случае, если электродвигатель не подвержен перегрузкам, из схемы исключаются контакты тепловых реле. На ответственных электродвигателях, которые не должны отключаться при снижении напряжения, вместо кнопок управления SB1 и SB2 устанавливается однополюсный рубильник (выключатель), которым производится включение и отключение электродвигателя. После восстановления напряжения магнитный пускатель вновь включается, так как рубильник S остается замкнутым.

На электродвигателях мощностью 40-50 кВт применяются автоматические воздушные выключатели типов АВМ, АЗ100, АП50-ЗМТ, АЗ700 или их импортные аналоги. Автоматы имеют катушки включения и отключения, а также встроенные реле прямого или косвенного действия. Они остаются включенными при снятии напряжения питания. В последних вариантах автоматов для двигателей большой мощности используются выносные аналоговые или микропроцессорные устройства защиты, действующие на электромагнит отключения.

Защита от междуфазных КЗ осуществляется в простейшем случае электромагнитными расцепителями мгновенного срабатывания – отсечкой автоматического выключателя, которая резервируется расцепителем с зависимой характеристикой выдержки времени. В случаях, когда встроенные в автоматический выключатель расцепители не обеспечивают надежной защиты электродвигателя, применяется выносная защита в виде токовой отсечки с реле тока, подключенным к ТТ двух фаз, действующая без выдержки времени на независимый расцепитель. При выполнении защиты электродвигателей от КЗ необходимо учитывать, что сети напряжением до 500 В работают с заземленной нейтралью и, следовательно, в этих цепях возможны все виды КЗ, в том числе и однофазные. Поэтому предохранители устанавливаются во всех фазах, а расцепители и токовые реле, с помощью которых осуществляется РЗ от КЗ, также должны реагировать на токи, проходящие во всех фазах и нулевом проводе.

Поскольку токи однофазного КЗ на землю в сети 380 В обычно меньше токов трехфазного КЗ, не всегда удается обеспечить необходимую чувствительность электромагнитных расцепителей автоматических выключателей к однофазным КЗ. При этом для РЗ от однофазных КЗ используется чувствительное токовое реле, например типа РТ-40/0,2, присоединенное к ТТНП, надеваемому на силовую кабель, питающий электродвигатель. Так, выносную РЗ от однофазных КЗ на землю рекомендуется устанавливать на электродвигателях, питающихся от трансформаторов собственных нужд со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_0$ , у которых уставка отсечки автоматического выключателя 4000 А и более. Такая же РЗ рекомендуется для электродвигателей с уставкой токовой отсечки автоматического выключателя 2000 А и более, питающихся от трансформаторов собственных нужд со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$ , у которых токи однофазных КЗ на землю значительно меньше, чем у трансформаторов со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_0$ . Вследствие значительного загробления отсечки автоматического выключателя по условию отстройки от пускового тока электродвигателя, часто не удается обеспечить необходимую чувствительность защиты от перегрузки с помощью расцепителей, имеющих зависимую характеристику. В этом случае РЗ от перегрузки выполняется с помощью выносных реле тока и времени.

В отдельных случаях на электродвигателях устанавливается специальная РЗ от работы на двух фазах, действующая на отключение электродвигателя. Применение такой РЗ допускается на электродвигателях, защищенных от КЗ плавкими предохранителями и не имеющих действующей на отключение РЗ от

перегрузки. Защита от режима работы двумя фазами осуществляется с помощью реле ЕЛ 11-13 производства СКБ «Ритм». Эта защита работает по факту появления напряжения обратной последовательности. Реле подключается после питающего пускателя (автомата).

### Специальные выносные защиты двигателей 0,4 кВ

Их имеется значительное количество вариантов. В качестве примера рассмотрим реле РДЦ-01М



РДЦ-01м с цифровой настройкой и индикацией контролируемых параметров предназначено для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей 0,4 кВ (127/220 В, в том числе глубинных насосов) от последствий:

- перегрузок;
- асимметрии питающей сети;
- работы с недогрузкой;
- превышения питающего напряжения;
- понижения питающего напряжения;
- неправильного чередования фаз,

– Одновременно, кроме защитных функций, реле имеет возможность индикации следующих параметров:

- потребляемого тока по каждой фазе (IA, IB, IC);
- напряжения в сети по каждой фазе (UA, UB, UC);
- частоты сети;
- моторесурса;
- а также аномалии в сети и причин наступивших аварийных состояний

Порог срабатывания перегрузки по току в диапазоне (1,1...2,0)·I<sub>НОМ</sub> – вводится уставкой.

Время срабатывания при перегрузке по току зависит от времени запуска двигателя и величины перегрузки по току.

Устройство может подключаться в цепи двигателя через трансформаторы тока (рис. 9.9) или непосредственно при токе до 5А (рис. 9.10).

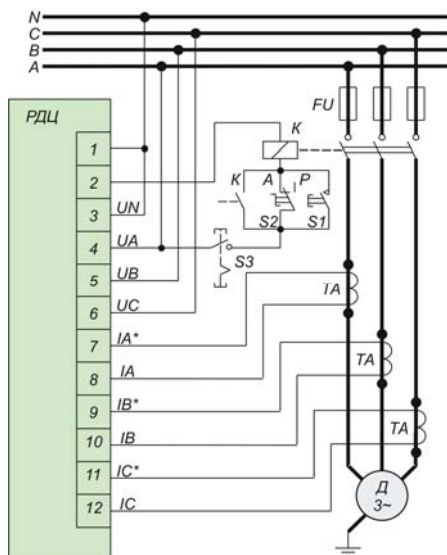


Рис. 9.9. Схема включения через внешние измерительные трансформаторы (до 500 А)

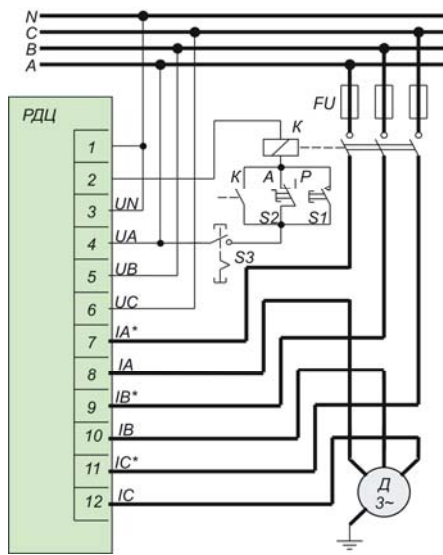


Рис. 9.10. Схема прямого включения (при номинальных токах не более 5 А)

FU – защитные предохранители; К – электромагнитный пускатель;  
S1 – вкл. двигателя; S2 – переключатель автоматическая/ручная работа (А/Р);  
S3 – выкл. двигателя; ТА – внешние измерительные трансформаторы.

## 9.7 ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### *Некоторые особенности синхронных электродвигателей*

При рассмотрении РЗ синхронных электродвигателей необходимо учитывать их особенности:

Пуск большинства синхронных электродвигателей производится при отсутствии возбуждения прямым включением в сеть. Для этой цели на роторе синхронного электродвигателя предусматривается дополнительная короткозамкнутая обмотка, выполняющая во время пуска ту же роль, что и в короткозамкнутом роторе асинхронного электродвигателя. Когда скольжение электродвигателя приближается к нулю, включается возбуждение, и электродвигатель втягивается в синхронизм под влиянием появляющегося при этом синхронного момента.

Во время пуска синхронный электродвигатель потребляет из сети повышенный ток, который по мере уменьшения скольжения затухает, так же как и у асинхронного электродвигателя.

Для уменьшения понижения напряжения и пусковых токов мощные синхронные электродвигатели пускаются через реактор, который затем шунтируется. Защиты синхронных электродвигателей, как и РЗ асинхронных электродвигателей, должны быть отстроены от токов, возникающих при их пуске или самозапуске, имеющем место при восстановлении напряжения в сети.

Момент синхронного электродвигателя зависит от напряжения сети  $U_\delta$ , ЭДС электродвигателя  $E_d$  и угла сдвига  $\delta$  между  $U_\delta$  и  $E_d$ . Без учета потерь в статоре и роторе

$$M_\delta = U_\delta \cdot E_d \sin \delta / X_d \quad (9.28)$$

где

$X_d$  – синхронное сопротивление двигателя.

При постоянных значениях  $U_\delta$  и  $E_d$  каждой нагрузке электродвигателя соответствует определенное значение угла  $\delta$ . В случае понижения напряжения в сети, как следует из выражения (9.14), момент  $M_\delta$  уменьшается. Если при этом он окажется меньше момента сопротивления  $M_c$  механизма, то устойчивая работа синхронного электродвигателя нарушается, возникают качания и электродвигатель выходит из синхронизма. Нарушение устойчивости возможно также при перегрузке электродвигателя (увеличение  $\delta$ ) или снижении возбуждения (уменьшение  $E_d$ ).

Эффективным средством повышения устойчивости электродвигателя является форсировка возбуждения, увеличивающая его ЭДС. Опыт показывает, что при глубоких понижениях напряжения (до нуля) синхронные электродвигатели, работающие с номинальной нагрузкой, выходят из синхронизма, если перерыв питания превосходит 0,5 с.

При нарушении синхронизма частота вращения электродвигателя уменьшается, и он переходит в асинхронный режим. При этом в пусковой обмотке и цепи ротора появляются токи, создающие дополнительный асинхронный момент, под влиянием которого синхронный электродвигатель может остаться в работе с некоторым скольжением.

Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке электродвигателя при асинхронном режиме, вызывают повышенный нагрев их, поэтому длительная работа синхронных электродвигателей в асинхронном режиме с нагрузкой более 0,4-0,5 номинальной недопустима.

В связи с этим, появляется необходимость в специальной РЗ от асинхронного режима, которая должна реализовать мероприятия, обеспечивающие ресинхронизацию электродвигателя, или отключить его. Ресинхронизация состоит в том, что с электродвигателя снимается возбуждение (при этом его асинхронный момент повышается и скольжение уменьшается), через некоторое время включается возбуждение, и электродвигатель вновь втягивается в синхронизм. Признаком нарушения синхронизма электродвигателя является появление колебаний тока в статоре и переменного тока в роторе.

Исследования и опыт эксплуатации показывают, что после отключения КЗ или включения резервного источника питания многие синхронные электродвигатели могут самозапущаться, т. е. вновь (сами) втягиваться в синхронизм. Самозапуск синхронных электродвигателей возможен, если после восстановления напряжения под влиянием возросшего асинхронного момента скольжение электродвигателя настолько уменьшится, что он сможет снова втянуться в синхронизм.

### **Защиты, применяемые на синхронных электродвигателях**

На синхронных электродвигателях устанавливаются следующие РЗ: от междуфазных повреждений в статоре; от замыканий обмотки статора на землю; от перегрузки; от асинхронного хода; от понижения напряжения в сети.

Защита от междуфазных повреждений выполняется мгновенной в виде токовой отсечки или продольной дифференциальной защиты по такой же схеме, как у асинхронных электродвигателей. Отличие заключается в том, что РЗ синхронного электродвигателя одновременно с выключателем отключает АГП. При применении тиристорного возбуждения и отсутствии АГП защита действует на инвертирование возбудителя. Ток срабатывания отсечки отстраивается от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателя. Крупные электродвигатели оборудуются продольной дифференциальной РЗ в двухфазном исполнении. Защита от замыканий обмотки статора на землю применяется при токах замыкания на землю более 5 -10 А. Защита от перегрузки обычно выполняется совмещенной с РЗ от асинхронного хода (см. рис.9.11).



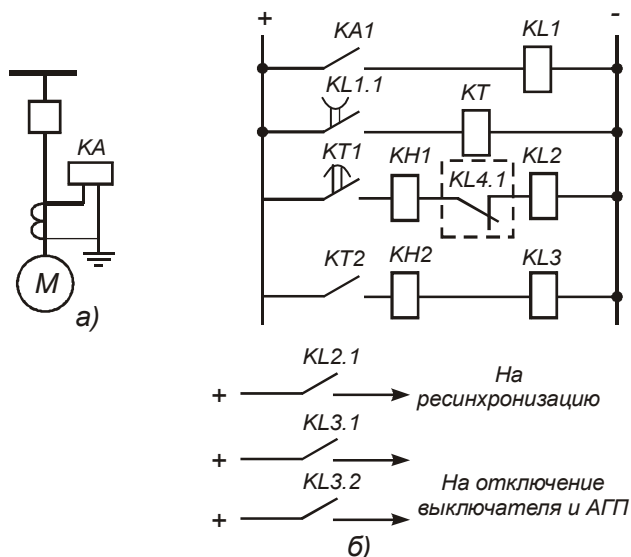


Рис.9.11 Схема защиты синхронного электродвигателя от асинхронного режима: на электромеханических реле.

а – цепи тока;

б – цепи постоянного оперативного тока

В качестве пускового органа в схеме РЗ от асинхронного режима и перегрузки используется токовое реле КА типа РТ-40. Это реле воздействует при срабатывании на промежуточное реле КЛ1, контакты которого КЛ1.1 в цепи реле времени КТ замыкаются мгновенно, а размыкаются с замедлением. При асинхронном режиме реле времени КТ не успевает возвратиться за время  $\Delta t$  спада тока между циклами качаний (рис. 9.12) и постепенно, за несколько периодов качаний набирает время и срабатывает на отключение. Для надежной работы РЗ время возврата  $t_{B03}$  якоря промежуточного реле КЛ1 должно быть больше времени  $\Delta t$  (рис. 9.12), в течение которого ток качаний недостаточен для действия реле, т. е.  $t_{B03} > \Delta t$ . Выдержка времени РЗ выбирается большей времени затухания пусковых токов электродвигателя. Устройство защиты двигателя. Реле времени КТ имеет две выдержки времени. По истечении первой выдержки времени замыкается контакт КТ1, после чего промежуточное реле КЛ2 подает команды на осуществление ресинхронизации.

В случае, если ресинхронизация не происходит и качания тока продолжают, замыкаются контакты реле времени КТ2, после чего промежуточное реле КЛ3, замкнув свои контакты, подает команды на отключение выключателя и АГП.

Для предотвращения срабатывания РЗ при форсировке возбуждения, когда увеличивается ток статора, цепь обмотки реле времени размыкается контактом КЛ4.1. На синхронных двигателях большой мощности в качестве защиты от асинхронного режима возможно применение реле сопротивления, как на генераторах. Защита минимального напряжения выполняется так же, как на асинхронных электродвигателях.

Уставка по току такой комбинированной защиты выбирается так же как обычная защита от перегрузки: ток срабатывания по формуле (9.28), выдержка времени отстраивается от времени пуска двигателя с учетом времени возврата реле КЛ1.

$$t_{с.з.} = t_{сам} + t_{B03KL1} + t \quad (9.29)$$

Учитывая возможность затягивания процесса разворота, время запаса ( $t_3$ ) принимается равным 2-3 с. Время возврата реле КЛ1 должно перекрывать время возврата токового реле в период асинхронного режима:  $t_{B03KL1} > \Delta t$

Можно принять  $t_{B03KL1}$  равным 0,5-0,7с.

В большинстве устройств специально для электродвигателей, в качестве защиты от перегрузки используется МТЗ. Она имеет необходимую задержку на возврат для выполнения функции защиты от асинхронного режима.

В устройстве MiCOM P241 имеется защита, предназначенная для выявления асинхронного режима, действующая по величине  $\cos \phi$ . Эта защита способна четко выявить отключение возбуждения и переход двигателя в асинхронный режим без возбуждения. При асинхронном режиме с возбуждением эта защита может не действовать из-за колебаний мощности и периодического возврата измерительного органа. Для того чтобы она действовала и в этом режиме требуется уменьшить выдержку времени защиты таким образом, чтобы при асинхронном режиме она успевала срабатывать в зоне пониженного  $\cos \phi$ . Пока отсутствуют результаты испытаний такой защиты на реальных двигателях. Поэтому, при внедрении такой защиты, необходимо провести испытания и уточнить уставки. Для начала можно принять уставки равными:  $\cos \phi = 0,7$ ;  $t = 0,5$  с.

#### Выбор защиты минимального напряжения для отделения синхронных двигателей

Как правило, синхронный двигатель, не допускает подачи несинхронного напряжения в случае, если возбуждение его включено. Поэтому при исчезновении напряжения или его посадке, синхронные дви-

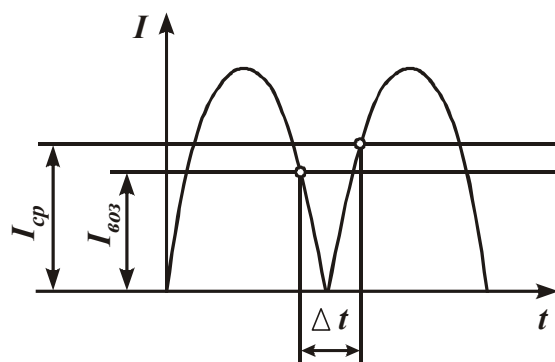


Рис.9.12 Изменение тока статора синхронного электродвигателя при асинхронном режиме.

гатели должны отключаться от сети, а после восстановления напряжения могут включаться вновь, если их включение необходимо, и они имеют схему автоматического пуска. Возможен также их перевод в асинхронный режим отключением возбуждения, и подачей возбуждения после появления напряжения. С целью предотвращения подачи напряжения на возбужденные синхронные двигатели, автоматика, которая подает напряжение на шины, должна выполняться с контролем отсутствия напряжения. Недопустимо, например, выполнение АВР только по признаку отключения питающего ввода. Защита минимального напряжения для синхронного двигателя выбирается как 1-я ступень минимального напряжения для асинхронных двигателей.

$$U \leq 0,7 \cdot U_{ном} \quad (9.30)$$

$$t = 0,5 \text{ с}$$

*Примечание.* Для обеспечения устойчивой работы двигателя и связанного с ним механизма, необходимо не допускать подключения к секции шин, откуда питаются синхронные двигатели, посторонней нагрузки. Если это невозможно, то посторонние фидера должны иметь отсечку без выдержки времени. В ряде случаев применяется специальная отсечка по напряжению, с уставкой, равной уставке защиты минимального напряжения, без выдержки времени. Уставка по напряжению отсечки и защиты минимального напряжения в этом случае обычно принимается равной  $0,6 U_{ном}$ .

#### **Отключение синхронных двигателей при понижении частоты**

Для ускорения подачи напряжения, работой АВР или АПВ целесообразно отключать двигатели также автоматикой понижения частоты. После отключения питающего напряжения двигатель быстро тормозится, и частота напряжения, которое синхронный двигатель генерирует на шины, быстро падает. При быстром его отключении, сразу исчезает напряжение подпитки и пускается схема АВР (АПВ).

При выборе уставки по частоте, следует иметь в виду другую автоматику, которая установлена в питающей системе – автоматическая частотная разгрузка (АЧР). Поэтому, уставка отключения СД по частоте должна быть отстроена от самой низкой уставки быстродействующей АЧР, которая в настоящее время равна 46,5Гц и 0.5с. Если двигатель сам подключен к какой то очереди АЧР, в качестве уставки можно принять уставку этой очереди. Если нет, можно принять уставку по частоте равной: 46 Гц и 0,5с.

### **9.10. ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НЕКОТОРЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ**

#### **Фирма GE.**

**MIG** - содержит токовую отсечку, максимальную защиту, защиту от замыканий на землю с выдержкой и без выдержки времени, защиту от перегрузки, от несимметрии по фазам, защиту от длительного пуска и застревания ротора.

**M60** - содержит дифзащиту, токовую отсечку, защиту от замыканий на землю с выдержкой и без выдержки времени, защиту от перегрузки, по току обратной последовательности, защиту от повышения и понижения напряжения. повышения напряжения обратной последовательности.

#### **Фирма ABB**

**REM 543** может включать в себя 3 ступени токовой защиты, 2 ступени токовой защиты с блокировкой по напряжению, 3 ступени направленной или ненаправленной токовой защиты от замыканий на землю, дифференциальную защиту, защиту от перегрузки и несимметричного режима, 2 ступенчатую защиту от повышения и понижения напряжения, 2 ступенчатую защиту от повышения напряжения обратной последовательности, защиту пусковых режимов двигателя, защиту от реверса фаз. Перечень функций, входящих в конкретное устройство выбирается в каждом случае, т.к. вместить их все одновременно невозможно по загрузке процессора.

**SPAC 802** содержит токовую отсечку, максимальную защиту, защиту от замыканий на землю с выдержкой времени, защиту от перегрузки, от несимметрии по фазам, сброса нагрузки, защиту пусковых режимов двигателя, защиту от реверса фаз. Имеется модификация SPAC 802-104 для защиты двухскоростного двигателя.

## **Фирма SIEMENS**

**7SJ551** - содержит токовую отсечку, максимальную защиту, защиту от замыканий на землю с выдержкой и без выдержки времени, защиту от перегрузки, от сброса нагрузки, по току обратной последовательности, защиту пусковых режимов двигателя, защиту от повышения и понижения напряжения.

**7SJ60** - содержит токовую отсечку, максимальную защиту, защиту от замыканий на землю с выдержкой и без выдержки времени, защиту от перегрузки, от сброса нагрузки, по току обратной последовательности, защиту пусковых режимов двигателя.

**7UT512 / 513** - содержит дифзащиту, токовую отсечку, защиту от замыканий на землю с выдержкой и без выдержки времени, защиту от перегрузки, 7UT513 имеет также чувствительную защиту от замыканий на землю на принципе сравнения токов нулевой последовательности.

## **Фирма SEL**

**SEL 501** - содержит токовую защиту, защиту от замыканий на землю, защиту от перегрузки симметричным током и током обратной последовательности, защиту обратной последовательности.

**SEL 387A** - содержит дифзащиту, токовую защиту, защиту от замыканий на землю, защиту по току обратной последовательности.