

Техническая подготовка инженеров

Тема: «Защита индукционных электродвигателей напряжением 0,4 кВ»

Учебные вопросы:

1. Основная задача защиты индукционных электродвигателей
2. Рабочие токи индукционных электродвигателей и их влияние на защиту
3. Пусковые комбинации
4. Особенности защит

1. Основная задача защиты индукционных электродвигателей

Основная задача защиты индукционного электродвигателя напряжением 0,4 кВ состоит в том, чтобы предотвратить перегрев обмоток, не допустить разрушения и воспламенения изоляции. Другими словами, задача защиты состоит в сохранении эксплуатационных свойств и ресурса электрической изоляции двигателя. Задача решается своевременным срабатыванием устройств защиты с отключением электродвигателя от источника питания (сети) до того, как температура изоляции достигнет критического значения.

Критическое значение температуры у изоляции электродвигателей различное и определяется в соответствии с установленным температурным классом. В свою очередь температурный класс изоляции зависит от термостойкости изоляционных материалов, примененных в ее конструкции.

Токовая защита не должна срабатывать, если электродвигатель:

- Работает в продолжительном режиме работы S1 при номинальной мощности
- Работает в течение допустимого времени разгона, когда по двигателю проходит пусковой ток
- В разогретом состоянии в течение 2 минут работает с перегрузкой равной $1,5I_n$
- Эксплуатируется в кратковременных или повторно-кратковременных режимах работы S2-S8 (при работе электродвигателя в этих режимах, не требуется его защита от перегрузки (ПУЭ, 6 изд., п.5.3.57))

Основная задача решается комплексом защитных мер, который предусматривает оснащение электродвигателя защитой не только по току, но и по температуре обмоток (в соответствии с ИЕС 60034-11). Полная защита для современных электродвигателей мощностью от 3 кВт и более состоит из трех составных частей:

- Внешней токовой защиты от коротких замыканий
- Внешней токовой защиты от перегрузок и асимметрии токов
- Внутренней температурной защиты от перегрева обмоток

Дополнительно в комплекс могут включаться другие защиты, которые повышают безопасность работы двигателя.

2. Рабочие токи индукционных электродвигателей и их влияние на защиту

Индукционные электродвигатели напряжением 0,4 кВ, применяемые в установках инженерных систем эксплуатируемых зданий, представлены асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором трехфазного и однофазного исполнения. Особенностью данных электродвигателей (далее – двигателей) является то,

что характеризуются они тремя рабочими токами: номинальным, сверхпереходным и пусковым. Существующее «многообразие» рабочих токов следует принимать во внимание и учитывать при выборе и настройке устройств защиты пусковых цепей двигателей.

- **Номинальный ток двигателя**

Номинальный ток двигателя – это рабочий ток, потребляемый двигателем из сети в процессе своей работы с номинальной нагрузкой.

Номинальный ток I_n двигателя определяется его паспортными данными или вычисляется по следующим формулам:

- 3-фазный электродвигатель: $I_n = P_n \times 1000 / (\sqrt{3} \times U_n \times \eta \times \cos \varphi)$
- 1-фазный электродвигатель: $I_n = P_n \times 1000 / (U_n \times \eta \times \cos \varphi)$

где:

- I_n – номинальный ток двигателя, А
- P_n - номинальная мощность двигателя, кВт (берется значение указанной в паспорте мощности, развиваемой двигателем на своем валу - P_2)
- U_n – номинальное междуфазное (линейное) напряжение - для 3-фазных двигателей и номинальное напряжение между клеммами двигателя - для однофазных двигателей, В. Однофазный двигатель может быть подсоединен к электропитанию по 2-м схемам и, соответственно, иметь 2-а питающих напряжения: схема «фаза - нейтраль» - фазное напряжение, а схема «фаза - фаза» - линейное напряжение.
- η - КПД электродвигателя (по паспорту). $\eta < 1,0$ из-за потерь в двигателе.
- $\cos \varphi$ - коэффициент мощности электродвигателя (по паспорту – это максимальный коэффициент, соответствующий номинальной мощности нагрузки, при меньшей мощности нагрузки данный коэффициент становится ниже).

Внешняя токовая защита не должна реагировать на номинальный ток, потому что он безопасен для двигателя и его цепей, которые проектируются и конструируются для длительного пропускания номинального тока через себя. Номинальный ток – это «точка отчета» при выборе и построении защиты двигателя.

- **Сверхпереходный ток двигателя**

Сверхпереходный ток двигателя I_d'' – это ток сверхпереходной части процесса при прямом пуске, а именно: пиковое значение пускового тока в момент включения двигателя и подачи напряжения на его обмотки. Данный ток обычно не приводится в паспортных данных, но из технической литературы известно, что он превышает пусковой ток двигателя в 2...2,5 раза, а номинальный ток – до 20 раз. Типовое значение сверхпереходного тока для подавляющего большинства двигателей составляет: $I_d'' \leq 12I_n$.

Продолжительность действия тока крайне мала и обычно составляет 0,01 ... 0,015 секунд, но этого времени вполне достаточно для срабатывания максимальных токовых защит от коротких замыканий мгновенного действия, которые в цепях двигателей представлены:

- Электромагнитными и электронными расцепителями максимального тока воздушных автоматических выключателей
- Плавкими предохранителями

Эти устройства должны быть отстроены от сверхпереходного тока – пиков тока при включении. Иначе они могут ложно сработать в период пуска двигателя.

Отстройка выполняется выбором токов срабатывания расцепителей и плавления плавких вставок предохранителей превосходящих по значению пик тока при включении двигателя.

Например, для воздушных автоматических выключателей, предназначенных для защиты двигателей, постоянная заводская настройка электромагнитного расцепителя составляет обычно $I_m = (12 \dots 14)I_{н\text{ АВ}}$, где $I_{н\text{ АВ}}$ – номинальный ток автоматического выключателя.

Сверхпереходный (пиковый) ток можно практически убрать из рабочих токов двигателя, если прямой пуск заменить пуском через устройство плавного пуска (софт-стартер) или частотный преобразователь (см. рис.3).

- **Пусковой ток двигателя**

Пусковой ток двигателя I_d - это ток переходной части процесса запуска: ток в период разгона двигателя и увеличения числа его оборотов. В начальной фазе разгона он превышает номинальный ток двигателя на величину кратности пускового тока k_n . Кратность пускового тока приводится в паспортных данных двигателя для режима прямого пуска. Типовое значение составляет $k_n = 4 \dots 8$. Следовательно, значение пускового тока двигателя при прямом пуске составляет: $I_d = (4 \dots 8)I_n$. И это значение совершенно не зависит от момента нагрузки на валу двигателя. Т.е. пусковой ток двигателя одинаков как для двигателя, запускаемого на ХХ, так и для двигателя, запускаемого под нагрузкой.

Пусковой ток не опасен для двигателя, если продолжительность его действия составляет единицы и десятки секунд. Но пусковой ток прямого пуска может стать причиной существенного и продолжительного снижения напряжения у источника питания, электроприемников и на клеммах двигателя. Снижение напряжения может привести к тому, что двигатель не сможет развернуться, а контактор пусковой цепи самопроизвольно отключится. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании схем электроснабжения и определении точки присоединения двигателя к схеме.

Величина проблем от пуска двигателя зависит от мощности короткого замыкания сети в точке подключения двигателя, т.е. от уровня тока КЗ в данной точке. Чем больше ток КЗ, тем «прочнее» сеть и меньше отрицательное влияние на нее двигателя.

Пусковой ток невозможно полностью убрать из рабочих токов двигателя, но его значение можно снизить, если прямой пуск заменить другими способами пуска, например:

- пуском с помощью переключения его обмоток со «звезды» на «треугольник» (пусковой ток уменьшается в 3 раза по сравнению с пусковым током прямого пуска)
- пуском через устройство плавного пуска (софт-стартер) или частотный преобразователь (пусковой ток уменьшается в 2-3 раза по сравнению с пусковым током прямого пуска).

Но при этом следует иметь в виду, что указанные способы пуска ведут к начальному снижению напряжения на обмотках двигателя, а снижение напряжения на обмотках двигателя снижает пусковой вращающий момент, и нагруженный двигатель может просто не развернуться. Так, например, пусковой момент двигателя при

использовании схем переключения его обмоток «звезда-треугольник» уменьшается в 3 раза!

Продолжительность пускового тока величина не постоянная и зависит от условий пуска двигателя. По условиям пуска (времени разгона до номинальной частоты вращения) двигателя, входящие в состав привода различных агрегатов, подразделяются на следующие категории:

- С легким пуском (время разгона до 5 с)
- Нормальным пуском (время разгона до 10 с)
- Тяжелым пуском (время разгона до 20 с)
- Сверхтяжелым пуском (время разгона до 30 с)

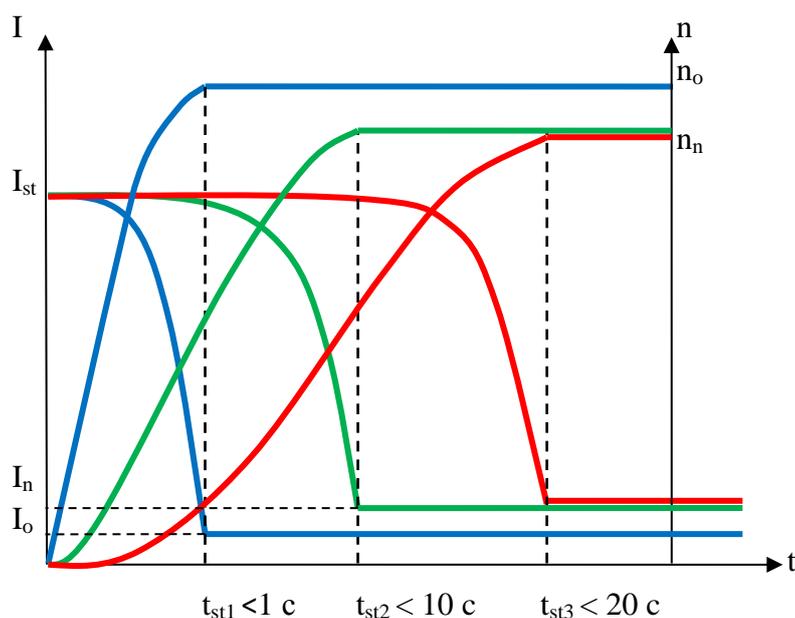


Рис.1. Изменение времени разгона и пускового тока двигателя в зависимости от момента нагрузки на валу:

Разгон без нагрузки	—
Нормальный разгон	—
Тяжелый разгон	—
Начальный пусковой ток	- I_{st}
Номинальный ток	- I_n
Ток холостого хода	- I_o
Частота вращения на ХХ	- n_o
Номинальная частота вращения	- n_n
Время разгона	- t_{st}

Например, двигатели привода большинства насосов или вентиляторов разгоняются за время от 0,1 до 2 секунды, т.е. относятся к категории «с легким пуском».

В течение разгонного периода по цепям пуска и обмоткам двигателя протекает большой пусковой ток, превышающий номинальный и вызывающий их ускоренный нагрев до высоких температур. Любые токозависимые инерционные устройства защиты, называемые устройствами тепловой защиты, реагируют на пусковой ток. Эти устройства

«запускаются» пусковым током, принимая его за ток перегрузки, и могут ложно сработать, прервав нормальный пуск двигателя.

Устройства тепловой защиты от токов перегрузки представлены:

- Тепловыми (биметаллическими и электронными) расцепителями тока воздушных автоматических выключателей
- Тепловыми (биметаллическими и электронными) реле
- Плавкими предохранителями

Устройства тепловой защиты, включенные в пусковую цепь, должно быть отстроены от пускового тока I_d двигателя. Эта задача решается введением гарантированных временных задержек в работу устройства в зоне действия пусковых токов, что дает двигателю время необходимое для завершения разгона.

Так, например, в зависимости от условий пуска выбирается нужный класс инерционности тепловой защиты: теплового расцепителя или теплового реле (Класс/Class), который соответствует определенному времени срабатывания при токе $I_r = bI_n$, где I_n – номинальный ток электродвигателя, I_r – ток срабатывания расцепителя (реле), t_a – время срабатывания расцепителя (реле).

Примечание. Шестикратный от номинального ток срабатывания защиты воспроизводит пусковой ток большинства двигателей, который не превышающий bI_n .

Классы тепловой защиты установлены следующими:

- Class 10: $4 < t_a < 10$ с – для легкого и нормального пуска
- Class 20: $6 < t_a < 20$ с – для тяжелого пуска
- Class 30: $9 < t_a < 30$ с – для сверхтяжелого пуска

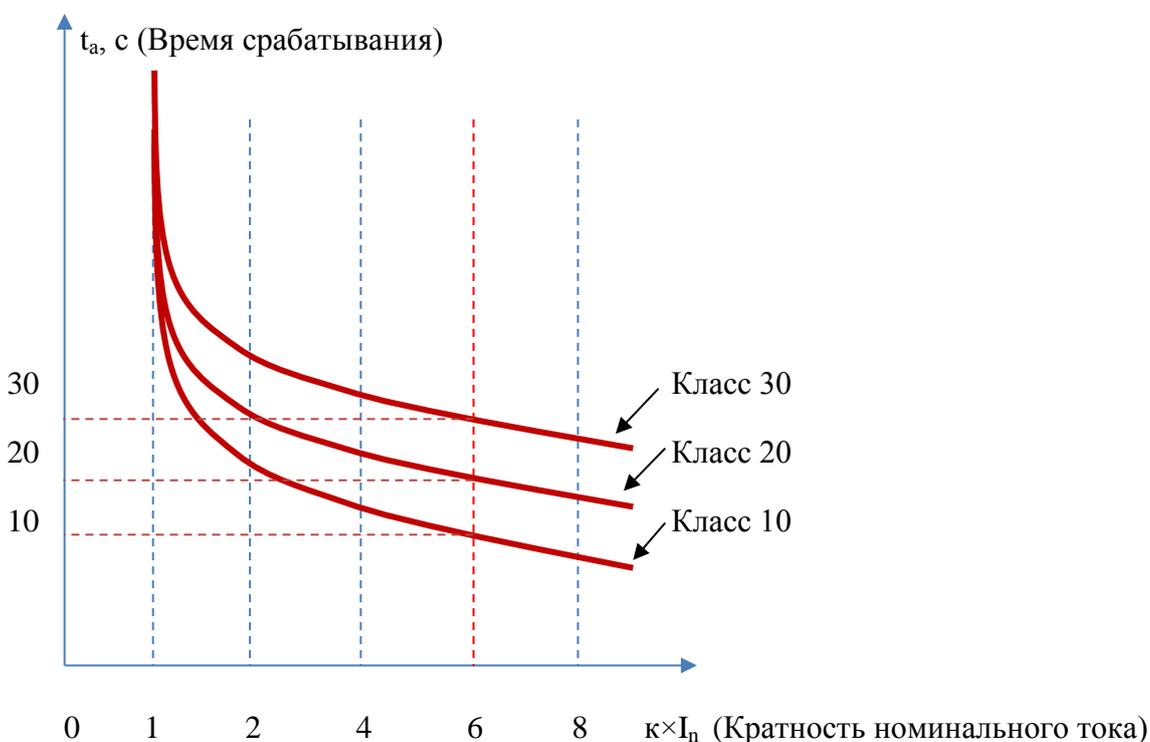


Рис.2. Характеристики «время срабатывания – ток срабатывания» тепловых реле защиты электродвигателя от токов перегрузки в зависимости от классов

Выбор правильного класса тепловой защиты гарантирует, что пусковой ток не приведет к преждевременному отключению запускаемого двигателя.

Пример правильной координации токовременных характеристик двигателя, автоматического выключателя защиты двигателя и силового питающего кабеля приведен на рис.3.

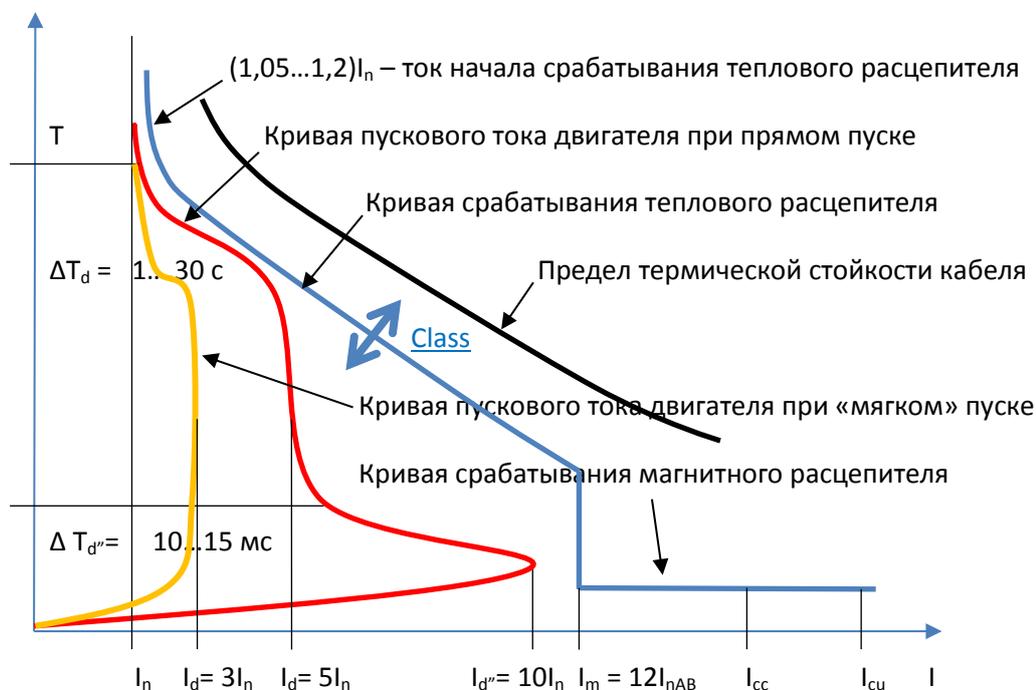


Рис.3. Время-токовые характеристики асинхронного электродвигателя при прямом и «мягком» пуске и их согласование с термоманнитной защитой, выполненной на автоматическом выключателе защиты двигателя

2. Пусковые комбинации

Цепи пуска и защиты двигателей состоят из электрических аппаратов, которые образуют, так называемые, пусковые комбинации. Пусковых комбинаций, применяемых при эксплуатации двигателей, существует множество. Включением и отключением двигателя управляет контактор – силовое реле.

Пусковые комбинации защищают двигатель от следующих проблем:

- перегрузки в продолжительном режиме работы
- коротких замыканий
- однофазного режима работы и асимметрии тока
- недопустимых отклонений напряжения и частоты
- заклинивания ротора
- повышения температуры окружающей среды
- нарушений в работе системы охлаждения
- недопустимой частоты коммутаций

Примечание: защита от повышения температуры окружающей среды, нарушений в работе системы охлаждения, недопустимой частоты коммутаций двигателя

осуществляется исключительно термисторной защитой, реагирующей на температуру обмотки статора.

Наиболее применимые схемы пусковых комбинаций для двигателей малой и средней мощности приведены на рис.4÷6.

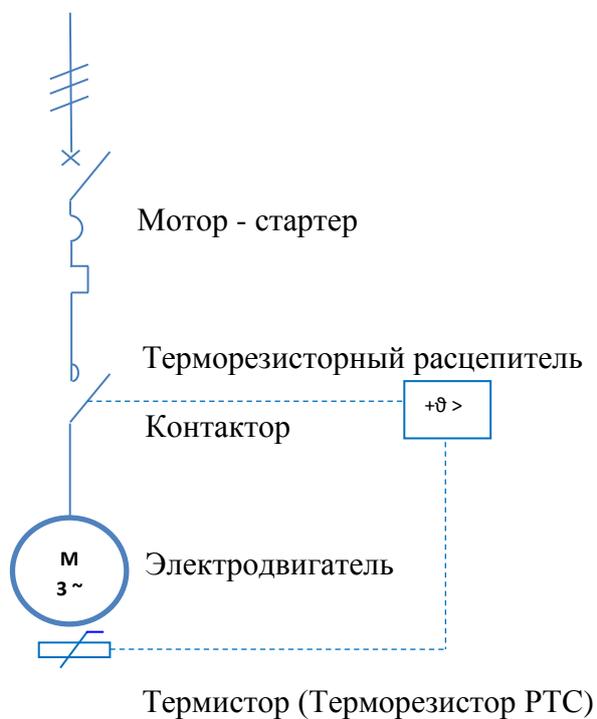


Рис.4. Комбинация «мотор стартер – контактор – термисторная защита»:

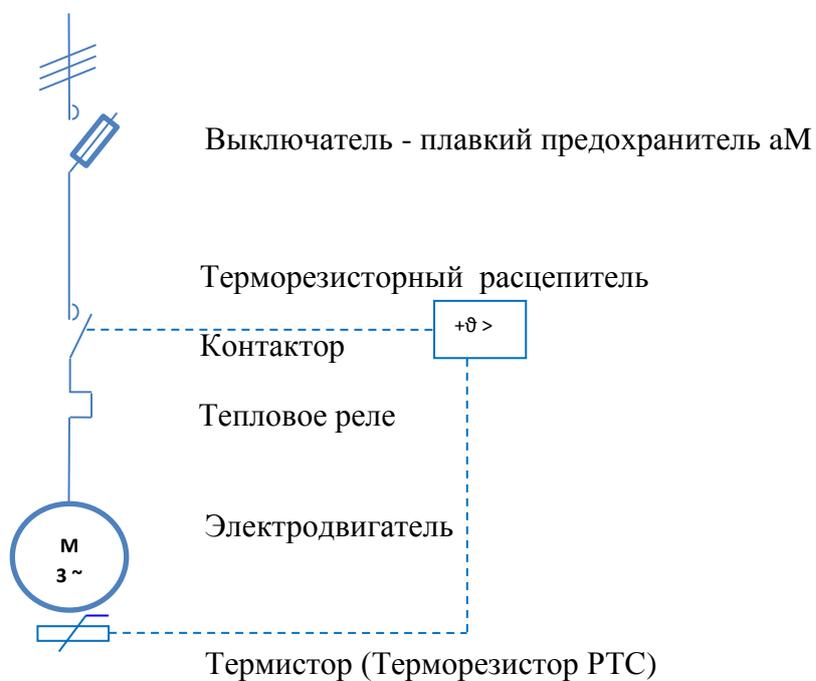


Рис.5. Комбинация «выключатель предохранитель – контактор – тепловое реле – термисторная защита»



Рис.6. Комбинация «выключатель предохранитель aM – контактор – софт стартер с тепловым реле – термисторная защита»:

4. Особенности защит

4.1. Защита цепей двигателей от токов короткого замыкания в результате повреждения изоляции

Защита от токов короткого замыкания (КЗ) всех видов: однофазных на корпус, двухфазных и трехфазных, выполняется с использованием следующих аппаратов защиты:

- Воздушных автоматических выключателей для защиты двигателей: ручных мотор - стартеров (от англ. Manual Motor Starter)
- Предохранителей защиты двигателей типа aM

Номинальные токи плавких вставок предохранителей и расцепителей автоматических выключателей должны выбираться таким образом, чтобы обеспечивалось надежное отключение токов КЗ и предотвращалось внезапное отключение аппаратов защиты в период пуска двигателей.

Т.е. сверхпереходные и пусковые токи двигателя не должны приводить к ложному срабатыванию аппаратов защиты. Вместе с тем, аппараты защиты должны гарантированно отключать любые токи повреждения изоляции. На практике это достигается благодаря тому, что токи повреждения в правильно спроектированных пусковых цепях двигателей всегда превосходят значения сверхпереходного и пускового токов, т.е. превышают значение $20I_n$ (см. рис.3).

Специальные предохранители, предназначенные для защиты двигателей от токов КЗ, имеют обозначение аМ (зеленого цвета). Предохранители данного типа, установленные в цепях прямого пуска двигателей, не срабатывают от сверхпереходных и пусковых токов двигателей с легкими и нормальными условиями пуска. Вместе с тем, они не защищают цепи двигателей от перегрузки, т.к. обладают большой тепловой инерцией и недопустимо большим временем срабатывания в диапазоне токов перегрузки. Из-за этих особенностей данные предохранители используются лишь как сопутствующая защита от токов КЗ для основной защиты двигателя от токов перегрузки, построенной на тепловых устройствах.

Расшифровка обозначения предохранителя типа аМ:

- «а» – предохранитель с отключающей способностью в части диапазона токов отключения (предохранитель нечувствителен к токам перегрузки и защищает только от токов КЗ)
- «М» - защита цепей двигателей (от англ. Motor)

Данный тип предохранителя относится к классу небыстродействующих предохранителей, и поэтому служит для защиты электрических цепей с относительно большой постоянной времени нагрева проводников и изоляции, к которым относятся двигатели (трансформаторы, кабели и провода).

Применение данного типа предохранителя для защиты цепей двигателя не требует повышения номинального тока плавкой вставки предохранителя $I_{вст}$ для отстройки от сверхпереходных и пусковых токов. Условие применения предохранителя: $I_{вст} \geq I_n$.

Кроме предохранителей типа аМ для защиты цепей двигателя от токов КЗ иногда применяются и предохранители общего применения типа gG и gL, которые также относятся к классу небыстродействующих и служат для защиты электрооборудования, проводов и кабелей не только от токов короткого замыкания, но и от токов перегрузки. Предохранители этого типа имеют обратную зависимость времени - токовую характеристику, которая описывается приблизительно следующими параметрами:

- при токе $10I_{вст}$ срабатывают практически мгновенно и размыкают цепь за время не более 0,01 с
- при токе $7I_{вст}$ срабатывают и размыкают цепь за время 0,05 – 0,5 с
- при токе $4I_{вст}$ срабатывают и размыкают цепь за время 1 – 5 с
- при токе $3I_{вст}$ срабатывают и размыкают цепь за время 10 – 40 с
- при токе $2I_{вст}$ срабатывают и размыкают цепь за время 1 – 5 мин
- при токе $1,6I_{вст}$ срабатывают и размыкают цепь за время не более 60 мин

Из приведенных данных следует, что при токах равным пусковым предохранители срабатывают очень быстро и двигатель даже с легким пуском может не успеть развернуться. Следовательно, предохранители типа gG и gL иногда необходимо отстраивать от пусковых токов, чтобы исключить ложное прерывание пуска двигателя, завышая при этом номинальный ток плавких вставок по следующим формулам (ПУЭ, п.5.3.56):

- $I_{вст} \geq I_d / 2,5$ или $I_{вст} \geq (2 \dots 3)I_n$ – для двигателей механизмов с легкими условиями пуска (малой длительностью разгона, небольшим числом включений и т.п.)
- $I_{вст} \geq I_d / 1,6$ или $I_{вст} \geq (3 \dots 5)I_n$ – для двигателей механизмов с тяжелыми условиями пуска (большая длительность разгона, частые пуски и т.п.)

Из приведенных формул видно, что выбранные по ним плавкие вставки имеют номинальные токи, превышающие номинальный ток двигателя в разы. Поэтому защита цепей двигателя от токов перегрузки, построенная на данных предохранителях, принципиально невозможна и поэтому исключается. Защита от токов перегрузки строится, как и для предохранителей типа аМ, на тепловых реле или тепловых расцепителях автоматических выключателей.

Внимание!

1. Электромагнитный расцепитель автоматического выключателя или плавкая вставка предохранителя, выбранные по условию отстройки от пускового тока двигателя, должны быть проверены и по условию срабатывания для обеспечения электробезопасности людей.

В соответствии с ПУЭ (7 изд., п.1.7.79), чтобы в электроустановках с системой заземления TN обеспечивалась электробезопасность наибольшее время автоматического отключения питания при возникновении повреждения изоляции токоведущих частей, т.е. при однофазном замыкании на корпус, было не более 0,4 с при номинальном фазном напряжении 220 В.

Столь малое время отключения обеспечивается током, который приводит к срабатыванию электромагнитного расцепителя выключателя или мгновенному плавлению плавкой вставки предохранителя. Для предохранителей типа gG и gL ток мгновенного срабатывания вставки составляет не менее $6I_{вст}$, а предохранителей типа аМ - более $10I_{вст}$. Более точные данные предоставляют заводские время - токовые характеристики предохранителей.

Искомое значение тока однофазного короткого замыкания в действующих цепях двигателя для выполнения процедуры проверки может быть получено с помощью:

- приборов для измерения токов КЗ
- приборов для измерения полного сопротивления петли «Фаза – Нуль» $Z_{ф-н}$ с последующим расчетом тока однофазного КЗ

2. Электромагнитный расцепитель автоматического выключателя или плавкая вставка предохранителя, выбранные по условию отстройки от пускового тока, должны быть проверены по условию защиты кабелей двигателей от перегрева токами КЗ, т.е. по условию надежного отключения поврежденного участка.

Согласно ПУЭ (6 изд., п.3.1.9) кабели будут защищены от перегрева токами КЗ, если обеспечено условие: по отношению к длительно допустимым токовым нагрузкам проводников аппараты защиты имеют кратность – k не более:

- 3,0 – для номинального тока плавкой вставки предохранителя, т.е. $I_{дл.доп} \leq I_{вст} \leq 3I_{дл.доп}$

- 4,5 – для тока уставки автоматического выключателя только с электромагнитным расцепителем, т.е. $I_{эм.р} \leq 4,5I_{дл.доп}$
- 1,25 – для тока трогания (срабатывания) расцепителя автоматического выключателя с регулируемым тепловым расцепителем (кратность токовой отсечки, т.е. электромагнитного расцепителя, не ограничивается), т.е. $I_{теп.р} \leq 1,25I_{дл.доп}$

Из приведенного условия следует, что плавкая вставка предохранителя не обеспечит надлежащей защиты кабеля от перегрева токами КЗ в том случае, когда номинальный ток плавкой вставки $I_{вст}$ окажется больше трехкратного значения длительно допустимого тока кабеля: $I_{вст} > 3I_{дл.доп}$.

Такое нарушение может возникнуть в цепях двигателей с тяжелыми условиями пуска, когда номинальный ток плавкой вставки предохранителя типа gG и gL завышается для отстройки от пусковых токов. Чтобы выполнить условие потребуется увеличить сечение кабельной линии в целях повышения значения длительно допустимого тока для нее - $I_{дл.доп}$ или применить более совершенную токовую защиту от КЗ. В некоторых случаях поможет замена завышенных плавких вставок типа gG и gL на вставки типа aM.

4.2. Защита цепей двигателей от токов перегрузки в результате повышенных механических нагрузок

Механические перегрузки, возникающие в приводимых механизмах, и заклинивание ротора вызывают токовые перегрузки. Токовые перегрузки вызывают перегрев электродвигателя и, если их не ограничить по времени действия, то они приводят к сокращению срока службы или к повреждению электродвигателя.

Цель защиты от токов перегрузки – обнаружить перегрузку и прекратить ее до наступления недопустимого нагрева изоляции обмоток электродвигателя и его цепей, т.е. до наступления предела термической стойкости изоляции.

Защита выполняется с использованием следующих устройств:

- токовых реле тепловой защиты электродвигателей – тепловых реле
- тепловых реле перегрузки, встроенных в софт – стартеры
- автоматических выключателей для защиты электродвигателей
- терморезисторов с положительным температурным коэффициентом (РТС), встроенных в обмотки статора электродвигателя, и сопутствующих им электронных реле контроля температуры обмоток

Аппараты защиты от токов перегрузки имеют регулируемый расцепитель для того, чтобы иметь возможность точного выставления на нем номинального рабочего тока двигателя I_n – точки отчета защиты. Выбор уставки расцепителя следует вести по номинальному току двигателя, указанному на заводской табличке, а не по его мощности. Дело в том, номинальные и пусковые токи у двигателей одной мощности, но разных серий и производителей, РАЗНЫЕ!

Внимание!

1. На аппаратах защиты электродвигателей выставляется не ток срабатывания расцепителя аппарата, а номинальный рабочий ток электродвигателя. При этом ток несрабатывания аппарата защиты находится в диапазоне от I_n до $(1,05 \div 1,2)I_n$. А ток начального срабатывания в течение установленного стандартом времени ($T_{cp} = 1$ час) располагается в диапазоне $(1,05 \div 1,2)I_n$.
2. Аппараты защиты электропроводки не годятся для защиты двигателей от перегрузки потому, что:
 - не имеют возможности точно настраиваться на номинальный рабочий ток двигателя
 - ток начального срабатывания в течение установленного стандартом времени ($T_{cp} = 1$ час) располагается в диапазоне $(1,3 \dots 1,4)I_n$, где I_n – это номинальный ток аппарата защиты. Т.е. аппарат защиты электропроводки допускает повышенную перегрузку проводов и кабелей по току потому, что провода и кабели обладают повышенной перегрузочной способностью по сравнению с двигателями.
3. Тепловые реле защиты двигателей остывают быстрее, чем перегруженный двигатель, поэтому данные реле оснащаются блокировкой, которую снимают, нажав на кнопку Reset (Сброс) в положении переключателя режимов управления Hand (Ручное). Этим обеспечивается надежное охлаждение двигателя. У данных реле есть и автоматический сброс в положении Auto (Автоматическое). Но его используют только в том случае, когда включение контактора двигателя после автоматического отключения осуществляет вручную – с помощью кнопки.
4. Тепловые расцепители оснащены термокомпенсацией для сохранения точности работы при изменении температуры окружающей среды от -20 до $+60$ °С.
5. Тепловые расцепители аппаратов защиты защищают электродвигатель и от других проблем, которые сопровождаются увеличением тока в фазах, например, от заторможенного ротора, затянувшегося пуска и обрыва одной фазы питающего напряжения при работе электродвигателя с номинальной нагрузкой.
6. Продолжительная работа двигателя в однофазном режиме может привести к преждевременному выходу двигателя из строя. За счет применения дифференциального моста (дифференциального устройства отключения) тепловые расцепители автоматических выключателей для защиты двигателей более чувствительны к выпадению фазы, чем обычные тепловые расцепители сетевых выключателей, не имеющие такого устройства. Время срабатывания при перегрузке по двум фазам (несимметричной перегрузке) меньше, чем время срабатывания при такой же перегрузке, но идущей по трем фазам (симметричной перегрузке). Важно, чтобы двигатель был номинально нагружен до момента «исчезновения одной фазы». Иначе «выпадение одной фазы» не приведет к перегрузке оставшихся фаз и к работе защиты. Дифференциальная тепловая защита быстро срабатывает уже при токе $1,3I_n$.

При этом токи в оставшихся фазах работающего двигателя возрастают в 1,5...2,0 раза по отношению к номинальному току.

7. Автоматические выключатели для защиты двигателей подходят и для защиты линий, но нужно следить, чтобы все фазы загружались равномерно, и не происходило отключение «по выпадению фазы». При однофазных потребителях полюса должны включаться последовательно.
8. Предохранители в современных электрических системах не используются для защиты двигателей от токов перегрузки, потому что не имеют возможности точного подбора по току двигателя и не имеют необходимой чувствительности срабатывания при соблюдении правила «неотключения пусковыми токами».
9. Категории использования контакторов для целей коммутации силовых цепей следует учитывать при выборе соответствующего контактора для заданной области применения, в том числе в цепях пуска асинхронных электродвигателей с КЗР. Категории использования электромеханических пускателей и контакторов отражены в стандарте ИЕС 60947-4-1.

Таблица №1

Категория использования	Характеристика применения
АС1	Включение и отключение безиндуктивной ($\cos \phi = 0,95$) нагрузки переменного тока. Цепи термической нагрузки
АС2	Пуск и останов асинхронных электродвигателей с фазным ротором
АС3	Прямой пуск асинхронных электродвигателей с КЗР и останов вращающихся АД с КЗР
АС4	Прямой пуск асинхронных электродвигателей с КЗР и останов АД с КЗР заторможенных механическим тормозом или противовключением (противотоком)

Примечание:

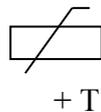
1. Комбинация «контактор – тепловое реле» называется электромеханическим пускателем.
2. Кроме категории использования следует учитывать отключающую способность и максимальный ток включения контактора.

10. Длительно допустимая токовая нагрузка проводников (кабелей и проводов) подключаемых к двигателям должна быть не менее 100 % номинального тока двигателя. Сечение кабеля определяется по длительно допустимому току (ПУЭ, п.3.1.12 и п.1.3.10). Защита двигателя от перегрузки в таком случае обеспечивает и надежную защиту кабеля от перегрузки.

4.3. Защита двигателей от тепловой перегрузки обмоток

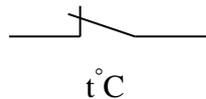
Внутренняя тепловая защита является одной из наиболее совершенных защит от механической перегрузки, обрыва фазы, высокой температуры окружающей среды, недостаточного охлаждения (нарушений воздушного потока охлаждения), частых включений (пускового нагрева) и заклинивания ротора двигателя. Она выполняется с помощью:

- комбинации из 1-го или 3-х терморезисторов с положительным температурным коэффициентом - РТС, встроенных в обмотки фаз статора, включенных последовательно и подключенных к сопутствующему электронному реле контроля температуры, которое управляет силовым контактором двигателя



- условное графическое обозначение РТС

- герметичных термостатов РТО (тепловых автоматических выключателей), установленных в клеммной коробке или обмотках двигателя: $T_{cp} = 150 \dots 160^{\circ}C$. Тепловые автоматы напрямую управляют силовым контактором двигателя



- условное графическое обозначение РТО

Датчики РТС имеют следующие преимущества перед датчиками РТО:

- Меньшую тепловую инерцию и поэтому быстрее срабатывают
- Меньшие размеры и поэтому лучший контакт с обмоткой
- Устанавливаются в каждую фазу
- Обеспечивают защиту при блокировании ротора

Различные типы тепловой защиты двигателей ТР (от англ. Thermal Protection) обозначаются кодом из 3-х цифр, в котором:

- 1-я цифра – тип допускаемого защитой повышения температуры (1 - только медленное повышение, например, из-за постоянной перегрузки; 2 - медленное и быстрое, 3 - только быстрое: например, из-за заклинивания ротора)
- 2-я цифра – число уровней срабатывания (1 – только отключение, 2 – аварийный сигнал и отключение)
- 3-я цифра – категория встроенной тепловой защиты (1 – защита допускает меньший нагрев двигателя во время тепловой перегрузки, 2 – защита допускает больший нагрев двигателя во время тепловой перегрузки)

Код тепловой защиты приводится на заводской табличке двигателя.

Например, обозначение ТР 211 «говорит» о том, что тепловая защита реагирует как на постепенное, так и на быстрое повышение температуры, имеет один уровень срабатывания – отключение и минимальное значение максимально допустимой

температуры двигателя. Такая защита защищает и от механической перегрузки и от заклинивания ротора. Ей не требуется тепловое токовое реле для защиты двигателя от токов перегрузки!!! Достаточно дополнительной защиты от токов КЗ в виде предохранителей типа аМ или автоматического выключателя, оснащенного электромагнитным расцепителем.

Например, обозначение ТР 111 «говорит» о том, что тепловая защита реагирует только на постепенное повышение температуры, имеет один уровень срабатывания – отключение и минимальное значение максимально допустимой температуры двигателя. Такая защита не защищает от заклинивания ротора, поэтому двигатель обязательно должен быть защищен и тепловым токовым реле. В цепи управления оба реле быть соединены последовательно, чтобы двигатель не запускался повторно прежде, чем оба устройства будут приведены в исходное положение.

Датчики РТС имеют цветовую маркировку проводов, которая помогает определить температуру срабатывания. Температура срабатывания датчиков находится в диапазоне от 90°C до 180 °C с интервалом 5°C. Датчики имеют нелинейное сопротивление, которое резко увеличивается при повышении температуры выше температуры срабатывания: с сотен Ом до нескольких кОм.

Например, коричнево-синяя маркировка относится к датчику с температурой срабатывания 165°C. Достижение указанной температуры или обрыв линии связи с датчиками вызывает срабатывание реле и отключение двигателя.

Внутренняя тепловая защита намного эффективнее устройств внешней защиты от токов перегрузки, т.к. напрямую измеряет температуру обмоток и реагирует на ее изменения.

4.4. Специальные защиты электродвигателей

К ним относятся защиты от недопустимого падения питающего напряжения, асимметрии питающего напряжения, обратного вращения ротора, снижения сопротивления изоляции обмотки статора, работы без нагрузки и др.

- Защита от недопустимого падения напряжения в момент пуска (защита минимального напряжения) выполняется с помощью расцепителей минимального напряжения. Рекомендуемое максимальное допустимое падение напряжения при пуске электродвигателя составляет 15 % U_n (СПЗ1 -110-2003, п.7.23). Это гарантирует сохранение высокого пускового момента и быстрый выход электродвигателя на номинальные обороты.
- Защита от асимметрии питающего напряжения и обратного вращения ротора выполняется с помощью реле контроля фаз.
- Защита от недопустимого снижения сопротивления изоляции обмотки статора выполняется с помощью токовых дифференциальных реле защиты от замыканий на землю (УЗО). Этот тип защиты необходим для ответственных механизмов, работающих в условиях высокой влажности и/или запыленности. Защита предотвращает выход электродвигателя из строя из-за больших токов утечки через изоляцию. Большие токи утечки возникают по причине физического повреждения изоляции, ее загрязнения, увлажнения и др.

- Защита от работы без нагрузки выполняется на электронных токовых реле. Служит для обнаружения отказа узла передачи крутящего момента между двигателем и агрегатом.

Список литературы

1. Защита двигателя при эксплуатации. Материалы для помощи при проектировании. SIEMENS, 2006
2. Справочник по электрооборудованию. Тома 1 и 2. ABB, 2008
3. Аппаратура распределения и управления до 4000 А. Техническое руководство. Legrand
4. Электродвигатели. GRUNDFOS, 2006
5. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения. Schneider Electric, 2007
6. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №4. Координация защит низкого напряжения. Руководство №5. Schneider Electric, 2006
7. В.П. Шеховцов. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования. 2-е издание, исправленное. М.: Форум, 2012
8. В.И. Рябов. Электрооборудование. 5-е издание, переработанное. М.: Экономика, 1990
9. В.И. Дьяков. Типовые расчеты по электрооборудованию. 5-е издание переработанное и дополненное. М.: Высшая школа, 1976