

621.316.9

С 60

Библиотечка электротехника

А. Л. Соловьев

**ЗАЩИТА
АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДВИГАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 КВ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

“Библиотечки электротехника”:

Воротницкий В. Э. **Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения.**

Овчаренко Н. И. **Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем.**

Шабад М. А. **Делительные защиты — автоматика деления при авариях.**

Панфилов В. А. **Аналоговые методы и средства электрических измерений.**

Удрис А. П. **Векторные диаграммы и их использование при наладке и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики (части 1 и 2).**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. **Российские и зарубежные газеты и журналы.**

Индексы “Библиотечки электротехника” — приложения к журналу “Энергетик”

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

Адрес редакции
журнала **“Энергетик”**:
115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.
Телефон (495) 675-19-06
E-mail: energetick@mail.ru

621.316.9
С60

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 3 (99)

А. Л. Соловьев

**ЗАЩИТА
АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДВИГАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 КВ**

11658

Москва
НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”
2007

**НИГРЭС
НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА**

УДК 621.313.333(075.9)

ББК 30.82

С 60

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабад

Соловьев А. Л.

С 60 Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2007. — 96 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”; Вып. 3 (99)].

Изложены принципы построения, выполнения и выбора уставок защит электродвигателей напряжением 0,4 кВ, работающих в системах собственных нужд электрических станций и на промышленных предприятиях.

В приложении приведена методика, составленная канд. техн. наук, доцентом А. В. Беляевым для выбора параметров срабатывания (уставок) микропроцессорного реле БМРЗ-0,4, обеспечивающего дальнейшее резервирование отказов автоматических выключателей при междуфазных и однофазных КЗ в сетях 0,4 кВ.

Для специалистов-электроэнергетиков, занимающихся защитами двигателей до 1 кВ.

ISSN 0013-7278 © НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”, 2007

Предисловие

Электрические двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода. Асинхронные двигатели — это наиболее простые, надежные в изготовлении и эксплуатации устройства. На долю асинхронных электродвигателей приходится более 40 % вырабатываемой в стране электроэнергии. Асинхронные двигатели напряжением до 1000 В и мощностью до 400 кВт — наиболее широко применяемый класс электрических машин. По количеству они составляют около 90 % общего числа всех электродвигателей, и на них приходится примерно 55 % всего объема потребляемой электродвигателями электроэнергии [15]. Значительную долю этих машин представляют асинхронные двигатели напряжением 0,4 кВ. Эти двигатели работают в кабельных сетях. Поэтому устройства защитной аппаратуры таких электродвигателей должны защищать и электрические кабели питания этих машин.

Кабельные электрические сети напряжением 0,4 кВ подводят электрическую энергию к массовому потребителю и собственным нуждам электростанций. Большое количество присоединений в этих сетях и объем коммутационной аппаратуры повышают вероятность возникновения аварий, часто переходящих в возгорание кабелей. Все ведущие производители электроэнергетического оборудования выпускают устройства защиты этих сетей и двигателей 0,4 кВ широкой номенклатуры. Однотипные защиты разных ведущих производителей имеют достаточно близкие технические и эксплуатационные характеристики. Задача релейщика заключается в выборе оптимальных характеристик и параметров срабатывания (уставок) защиты. Выбрать оптимальное устройство защиты можно, имея полную информацию о защищаемом двигателе и его ответственности в технологическом процессе, нагрузке и возможности обеспечения самозапуска, условиях эксплуатации в сетях, в которых он работает.

Целью данной брошюры является помощь релейщикам в выборе оптимального варианта построения защит асинхронных электро-

двигателей 0,4 кВ и выборе правильных параметров срабатывания этих устройств.

С 1 января 2003 г. частично вступили в действие новые требования “Правил устройства электроустановок” (ПУЭ), касающиеся электробезопасности, соответствующие международным требованиям. В сетях до 1000 В (табл. 1.7.1 ПУЭ) аппаратура защиты передвижных и переносных электроприемников при фазном напряжении 380 В должна работать с временем отключения не более 0,2 с (при фазном напряжении 220 В — не более 0,4 с). В цепях питания распределительных щитов, а также стационарных электроприемников, питающихся от распределительных щитов, допускается время отключения КЗ не более 5 с при условии обеспечения надежного заземления или наличия системы уравнивания потенциалов [1]. Это возможно только при правильном выборе длин и сечений кабелей, питающих электродвигатели, а также при применении чувствительных и быстродействующих защит. Особые требования по надежности предъявляются к сетям и устройствам собственных нужд электрических станций. Для защиты двигателей 0,4 кВ от коротких замыканий (КЗ) применяют, как правило, автоматические выключатели и плавкие вставки. Электродвигатели мощностью 55 — 200 кВт и ответственные электродвигатели необходимо подключать только к основному распределительному щиту 0,4 кВ и кабелями соответствующей длины и сечения. В мировой практике при проектировании объектов с более мощной двигательной нагрузкой применяются сети напряжением 0,66 кВ, которые позволяют питать двигатели мощностью до 400 кВт. Мощные электродвигатели напряжением 0,66 кВ в России используются в шахтных сетях, сетях метрополитенов, на металлургических предприятиях и т.п. Сети напряжением 0,66 кВ, аналогично сетям 0,4 кВ, выполняются с глухозаземленной нейтралью. Строительство сетей напряжением 0,4 и 0,66 кВ дешевле сетей напряжением выше 1000 В. Требования, предъявляемые к сетям 0,66 кВ, близки к требованиям для сетей 0,4 кВ. С точки зрения построения цепей питания двигательной нагрузки, а также вопросов защиты электродвигателей эти сети имеют много общего. Поэтому материал, изложенный в данной брошюре, можно использовать для выполнения защит электродвигателей с напряжением питания 0,66 кВ.

При расчете токов КЗ для определения чувствительности защит и выбора коммутационных аппаратов рекомендуется использовать учебное пособие: И. Л. Небрат “Расчеты токов короткого замыкания в сетях 0,4 кВ”.

Автор выражает искреннюю благодарность канд. техн. наук А. В. Беляеву и канд. техн. наук М. А. Шабаду за ценные рекомендации и помощь при написании этой работы.

**Замечания и пожелания по брошюре
просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала "Энергетик".**

Автор

Основные характеристики асинхронных электрических двигателей

Самыми надежными, простыми в изготовлении и эксплуатации являются трехфазные асинхронные электрические двигатели. Схемы асинхронных машин с короткозамкнутым и фазным ротором показаны на рис. 1.1. Принцип работы асинхронной машины аналогичен работе трансформатора. Различие заключается в том, что вторичная обмотка размещается на вращающемся роторе и не связана с внешней сетью. На рис. 1.1, *а* эта обмотка состоит из стержней 4, замкнутых накоротко, что соответствует двигателю с короткозамкнутым ротором. В двигателях с фазовым ротором (рис. 1.1, *б*) обмотка 6 через токосъемные кольца 7 соединяется с внешними сопротивлениями 8.

Основной недостаток асинхронных электродвигателей заключается в большом потреблении реактивной мощности, которая практически не зависит от нагрузки. Для снижения потребления реактивной мощности асинхронные двигатели изготавливают с малым зазором между ротором и статором. Это приводит к усложнению их конструкции, снижает надежность и усложняет эксплуатацию. Изготовление асинхронных электрических двигателей, вращающихся с малой скоростью, требует еще большего уменьшения этого зазора. Поэтому асинхронные электрические двигатели выпускаются с частотами вращения не менее 600 мин^{-1} .

Основными электрическими параметрами асинхронного электродвигателя являются:

- номинальное междуфазное напряжение $U_{\text{ном}}$;
- номинальный линейный фазный ток статора электродвигателя $I_{\text{ном}}$;
- номинальная активная мощность на валу электродвигателя $P_{\text{ном}}$;

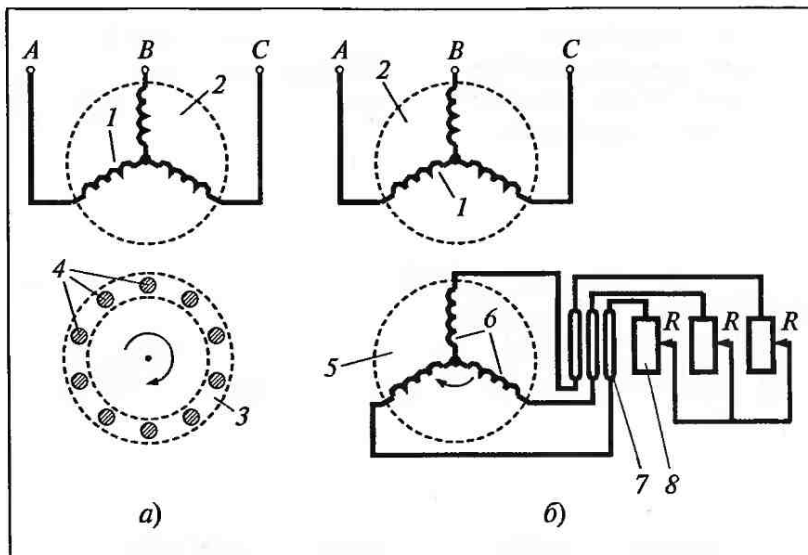


Рис. 1.1. Схемы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором:

1 — обмотка статора асинхронного электродвигателя; 2 — статор асинхронной машины; 3 — короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя (беличья клетка); 4 — стержни (витки) короткозамкнутого ротора; 5 — фазный ротор асинхронного двигателя; 6 — обмотка фазного ротора; 7 — токосъемные кольца; 8 — сопротивления нагрузки фазного ротора

- коэффициент полезного действия электродвигателя η ;
- частота напряжения питания электродвигателя f ;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$.

Полную электрическую мощность, потребляемую электродвигателем из сети, определяют по выражению

$$S = \sqrt{3}U_1 I_1. \quad (1.1)$$

Активную мощность, потребляемую электродвигателем из сети, находят по уравнению

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (1.2)$$

Активную мощность на валу электродвигателя вычисляют по формуле:

$$P_{\text{вал}} = \sqrt{3}U_1 I_1 \eta \cos \varphi. \quad (1.3)$$

В этих выражениях U_1 и I_1 — междупазное напряжение и линейный ток, потребляемый электродвигателем, соответственно.

Синхронной частотой вращения электрического двигателя n_c называют частоту вращения магнитного поля, создаваемого током в обмотках статора:

$$n_c = f_c/p = 3000/p, \quad (1.4)$$

где $f_c = 50$ Гц — частота питающей сети; $t = 60$ с = 1 мин; p — число пар полюсов обмотки статора.

Скольжением называют отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля в статоре электродвигателя. Скольжение в асинхронном электродвигателе представляет относительную величину и определяется из выражения

$$s = (n_c - n)/n_c, \quad (1.5)$$

где n — частота вращения ротора асинхронного двигателя.

В некоторых случаях скольжение удобно определять в процентах:

$$s = [(n_c - n)/n_c]100 \%. \quad (1.6)$$

При работе асинхронных двигателей в номинальном режиме $s = 0,02 \div 0,15$ (2 — 15 %). При работе в номинальном режиме двигателей нормального исполнения $s = 0,04$ [8, 10, 16].

Ток в обмотках статора двигателя превышает номинальное значение на интервале скоростей вращения $0 - n_{\text{ном}}$. На холостом ходу частота вращения электродвигателя близка к синхронной и скольжение близко к нулю. При работе электродвигателя на холостом ходу трение в подшипниках, сопротивление воздуха в системе вентиляции создают тормозящий момент, вызывающий скольжение [14]. При увеличении нагрузки на валу электродвигателя увеличивается скольжение, а следовательно, увеличивается ток в статорных обмотках двигателя. В момент пуска электродвигателя частота вращения вала равна нулю. Этот режим сопровождается большими пусковыми токами $I_{\text{пуск}}$. Зависимость пускового тока асинхронного двигателя от времени приведена на рис. 1.2 [14, 16].

Пусковые токи электродвигателя соизмеримы с токами КЗ и в несколько раз превышают ток, потребляемый электродвигателем при номинальной нагрузке в установившемся режиме. Это свойство электродвигателей требует отстройки устройств релейной защиты от излишних срабатываний при пусковых токах. Следует отметить,

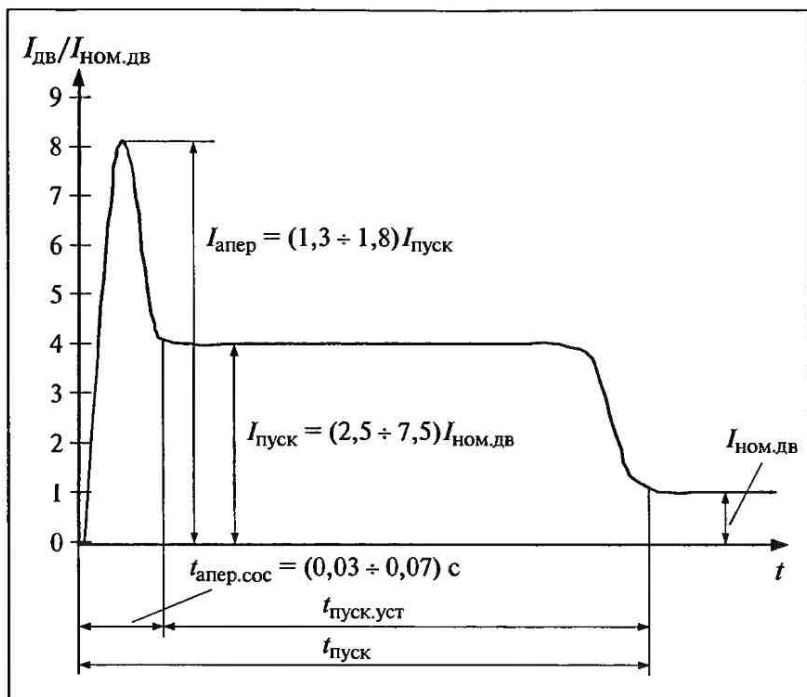


Рис. 1.2. Зависимость пускового тока асинхронного двигателя от времени

что у современных асинхронных электродвигателей серии 4А с короткозамкнутым ротором коэффициент пуска $k_{п} \leq 7,5$ [15]. Поэтому сделать чувствительную защиту от междуфазных КЗ с помощью ранее применявшихся устройств релейной защиты достаточно сложно.

Известно, что температура обмотки электродвигателя пропорциональна квадрату протекающего по ней тока [9, 20 – 23]. Поэтому при пусковом токе $5I_{ном}$ мгновенное значение температуры обмотки электродвигателя увеличивается в 25 раз.

Время разгона электродвигателя (условия пуска) определяется его конструкцией и типом механической нагрузки на валу. К двигателям с легкими условиями пуска ($t_{пуск} = 2 \div 5 \text{ с}$) относятся двигатели питательных, циркуляционных насосов и др. К двигателям с тяжелыми условиями пуска ($t_{пуск} = 5 \div 15 \text{ с}$) относятся двигатели дробилок, шаровых мельниц, дымососов, центрифуг и т.п.

К тяжелым режимным условиям работы электродвигателей и питающих их сетей следует отнести самозапуск, т.е. одновременный пуск нескольких электродвигателей. Режим самозапуска возникает при КЗ и сопровождается снижением уровня питающего напряжения электродвигателей. В этом режиме уменьшается силовой момент, развиваемый двигателями, увеличивается скольжение и все двигатели потребляют повышенный ток. Если при самозапуске двигателей не предпринять дополнительных мер по разгрузке сети, то может произойти останов двигателей и станции в целом. Поэтому необходимо провести расчет режима самозапуска и отключать менее ответственных двигатели до начала самозапуска ответственных двигателей. При снижении напряжения сети до $U = 0,7 U_{\text{ном}}$ частота вращения двигателя снижается до $n = 0,92 n_{\text{ном}}$ (если двигатель не потеряет устойчивость) [6]. Поэтому по частоте вращения электродвигателя практически невозможно контролировать напряжение сети.

Токи в обмотках статора зависят от напряжения питания двигателя. Эта зависимость приведена на рис. 1.3 для электродвигателей с различными отношениями тока намагничивания к номинальному току двигателя $I_{\text{нам}}/I_{\text{ном.дв}}$ (30, 40 и 50 %) при $U_{\text{дв}} = U_{\text{ном.дв}}$ [14]. Используя данные характеристики, можно прогнозировать токи при самозапуске электродвигателей.

Простейшим способом изменения номинального напряжения статорной обмотки двигателя является изменение ее присоединений со схемы “звезда” в схему “треугольник” и наоборот (рис. 1.4). Изменение схемы включения двигателя эквивалентно изменению числа витков в фазных обмотках в 1,73 раза. Таким образом можно использовать двигатели на напряжение 127/220 В и 220/380 В. Автоматическое переключение схем “звезда” — “треугольник” иногда применяют для облегчения условий пуска двигателей с короткозамкнутым ротором или улучшения технико-экономических показателей привода при неполной нагрузке двигателей [8]. Схема пуска трехфазного асинхронного электродвигателя включением на пусковую схему “звезда” и с переключением на рабочую схему “треугольник” приведена на рис. 1.5.

Перед пуском двигателя (рис. 1.5) включаются выключатели $QS1$, $QF2$ и $SF2$. При нажатии на кнопку “Пуск” $SB2$ включается пускатель $KM2.1$, соединяющий концы фазных обмоток двигателя $M1$ в “звезду”. Одновременно включается реле времени $KT1$, замыкая контакт $KT1.3$, шунтирующий контакты кнопки “Пуск” $SB2$. С выдержкой времени, необходимой для пуска двигателя, отключается контакт $KT1.1$ реле времени $KT1$. Контактная группа $KT1.1$ отклю-

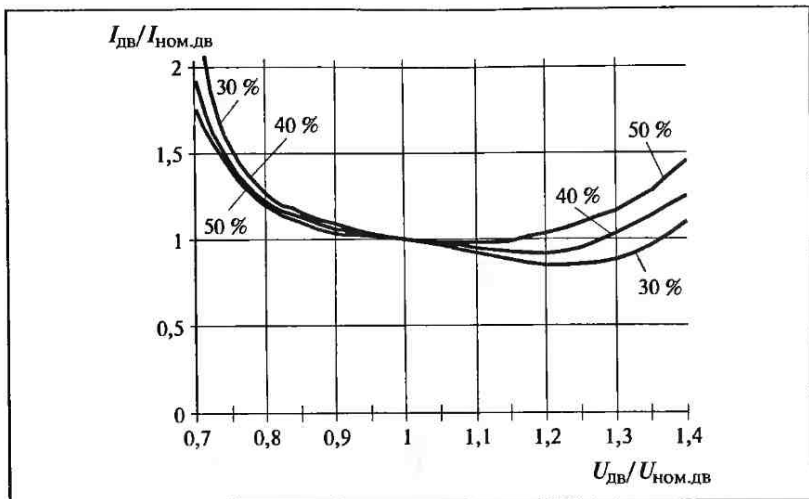


Рис. 1.3. Зависимость тока статора асинхронного двигателя от напряжения питания

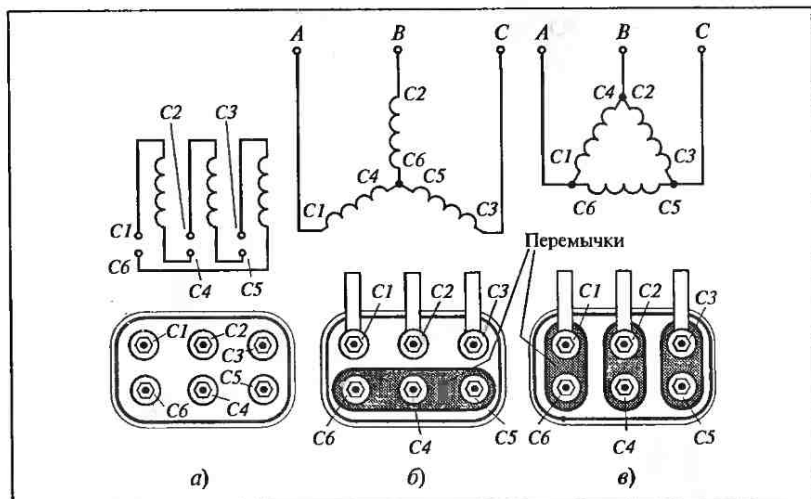


Рис. 1.4. Схемы подключения выводов обмоток статора асинхронного электродвигателя серии 4А:

а — схема присоединения начал и концов обмоток к зажимам колодки в выводной коробке двигателя; б — схема включения обмоток статора в “звезду” и соединение выводных зажимов; в — схема включения обмоток статора в “треугольник” и соединение выводных зажимов

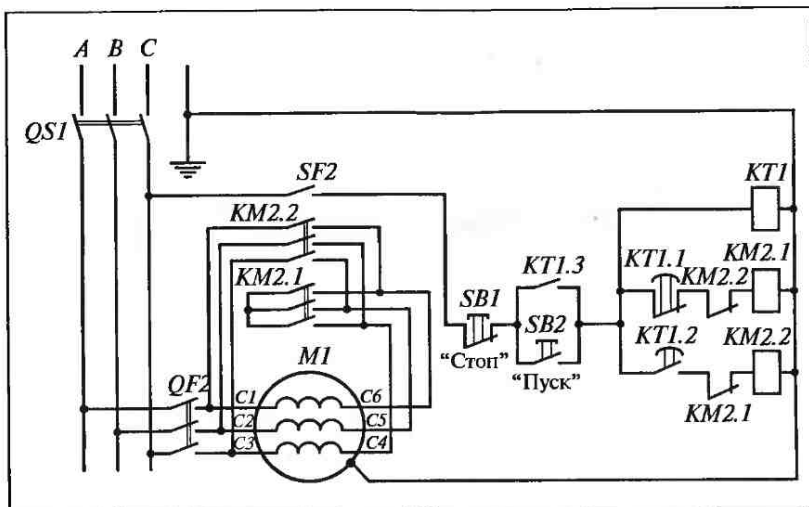


Рис. 1.5. Схема пуска трехфазного асинхронного электродвигателя включением на пусковую схему "звезда" и с переключением на рабочую схему "треугольник": SB1 — красная кнопка КМЕ4201 ("Стоп"); SB2 — черная кнопка КМЕ4201 ("Пуск"); KM2.1, KM2.2 — пускатель ПМА-3100У4 (220 В); KT1 — промежуточное реле времени (220 В); M1 — электродвигатель; QF2 — выключатель автоматический; SF2 — выключатель автоматический А63, 4 А; QSI — выключатель пакетный

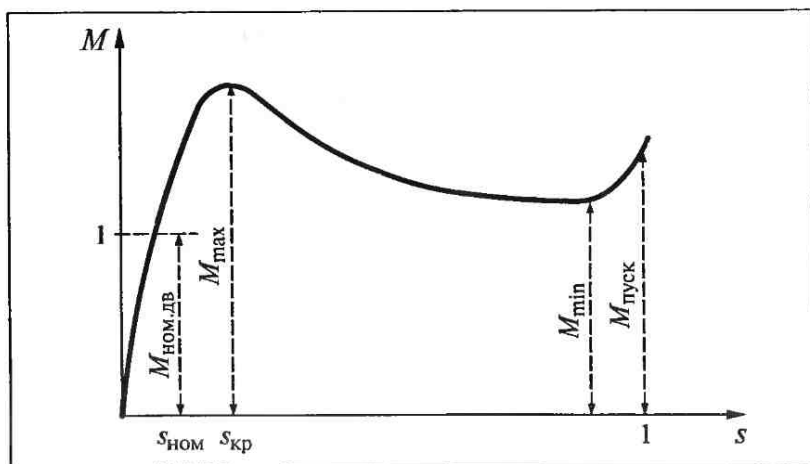


Рис. 1.6. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

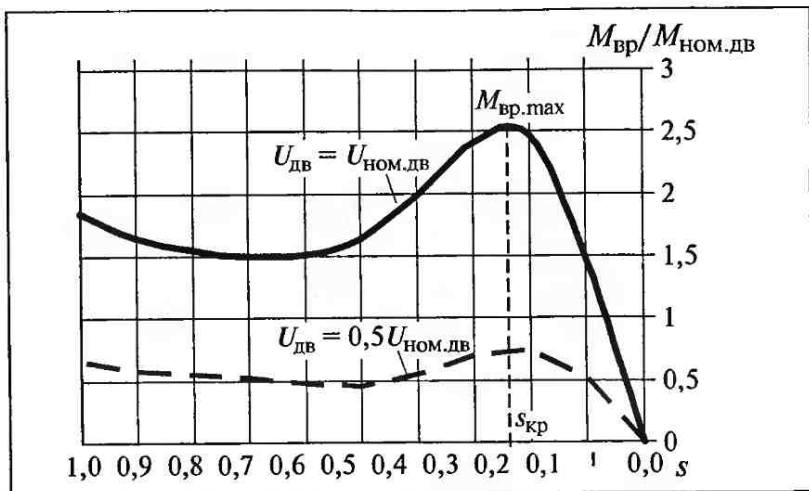


Рис. 1.7. Зависимость вращающего момента от величины скольжения асинхронных двигателей

чает обмотку пускателя *KM2.1*, и включается контакт *KT1.2*, включающий обмотку пускателя *KM2.2*. Пускатель *KM2.2* переключает выводы статорных обмоток двигателя по схеме “треугольник”, и двигатель продолжает работать в этом режиме.

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя определяется следующими параметрами (рис. 1.6):

- пусковым (начальным) моментом $M_{\text{пуск}}$ при скольжении $s = 1$;
- минимальным вращающим моментом M_{min} (при скольжении $s = 0,7 \div 0,9$);
- максимальным вращающим моментом $M_{\text{мах}}$ при $s = s_{\text{кр}}$;
- номинальным вращающим моментом $M_{\text{ном}}$ при $s = s_{\text{ном}}$.

Номинальный вращающий момент электродвигателя рассчитывается по формуле [15]:

$$M_{\text{ном.дв}} = 9570 \frac{P_{\text{ном.дв}}}{n_c(1 - s_{\text{ном}})}, \quad (1.7)$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; n_c — синхронная частота вращения электродвигателя, мин^{-1} ; $s_{\text{ном}}$ — номинальное скольжение.

На рис. 1.7 приведена зависимость вращающего момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором от скольжения (при напряжении питания $U_{дв} = U_{ном.дв}$ и $U_{дв} = 0,5U_{ном.дв}$). Устойчивая работа электродвигателя сохраняется при увеличении тормозящего момента $M_{тр}$ от нуля до максимального значения характеристики $M_{вр max}$. Критическое скольжение $s_{кр}$ соответствует максимальному моменту вращения $M_{вр max}$. При увеличении тормозящего момента $M_{тр}$ выше значения $M_{вр max}$ двигатель может остановиться. Этот процесс называют “опрокидыванием” электродвигателя.

Момент вращения асинхронных двигателей $M_{вр max}$ связан квадратичной зависимостью с напряжением питания [16, 20]:

$$M_{вр} = kU_{дв}^2. \quad (1.8)$$

При снижении напряжения питания двигателя в 2 раза вращающий момент уменьшается в 4 раза. Работа асинхронных электродвигателей при пониженном напряжении $U_{дв}$ сопровождается появлением токов перегрузки и уменьшением вращающего момента по квадратичной зависимости, что может привести к останову (“опрокидыванию”) двигателя. Вращающий момент, развиваемый синхронными электродвигателями, линейно связан с питающим напряжением. Поэтому для ответственных приводов при высокой нестабильности питающего напряжения рекомендуется использовать синхронные электродвигатели.

Длительное протекание токов, превышающих номинальное значение, вызывает перегрев электродвигателя и приводит к активному старению и разрушению изоляционных материалов, в том числе и изоляции обмоток статора. При повышении температуры обмоток происходит ухудшение изоляционных свойств, снижение механической прочности и эластичности изоляции. Изоляционные материалы стареют, крошатся и перестают выполнять свои функции.

Опытным путем установлено, что процесс старения изоляции можно определить из формулы [21]:

$$T = T_0 \exp(-\alpha t), \quad (1.9)$$

где T — срок службы изоляции при температуре t ; T_0 — срок службы изоляции при температуре $t = 0$ °С [в зависимости от типа изоляции $T_0 = (1,5 \div 5) \cdot 10^4$ лет]; α — коэффициент, зависящий от типа изоляции и скорости ее старения.

В России используется экспериментально полученное так называемое 8-градусное правило прогнозирования температурного ста-

рения изоляции: при повышении температуры изоляции на 8 °С срок ее службы уменьшается в 2 раза. Например, при длительном воздействии на изоляционные материалы температуры 105 °С гарантируется срок службы изоляции 20 лет. При длительном повышении температуры изоляции до 113 °С срок ее службы сократится до 10 лет, а при температуре 121 °С — до 5 лет. Это правило справедливо для диапазона температур 80 — 150 °С. При температурах изоляции ниже 80 °С процесс старения изоляционных материалов замедляется, а при температурах более 150 °С старение становится более интенсивным. Коэффициент α в выражении (1.9) при 8-градусном правиле принимают равным 0,0865. В нормах Международной электротехнической комиссии (МЭК) принято 6-градусное правило, при котором $\alpha = 0,112$ [20, 21].

Недопустимый нагрев изоляционных материалов статорных обмоток может быть связан с перегрузкой электродвигателя. Поэтому для двигателей, подверженных технологическим перегрузкам, применяются защиты от симметричных перегрузок. Перегрузка двигателя может быть обусловлена неисправностью приводимого в действие механизма. Допустимое время перегрузки электродвигателя принято оценивать по упрощенным выражениям, например [22]:

$$t_{\text{доп}} = A / (k_i^2 - 1), \quad (1.10)$$

где A — коэффициент, определяемый конструкцией электродвигателя и способом его охлаждения (характеризует нагрев двигателя); $k_i = I_{\text{дв}} / I_{\text{ном.дв}}$ — кратность тока перегрузки электродвигателя.

Коэффициент A принимают равным: 250 для двигателей с принудительной системой охлаждения и большими массой и габаритами, 150 для двигателей открытого типа [14].

Для выбора мощности электродвигателя необходимо сравнить характеристику противодействующего момента привода и характеристику момента электродвигателя во всем диапазоне частот вращения. Момент сопротивления привода определяется из формулы [19]:

$$M_c = M_0 + (M_{\text{ном}} - M_0)(n/n_c)^\alpha, \quad (1.11)$$

где M_0 — момент сопротивления привода при пуске; $M_{\text{ном}}$ — момент сопротивления привода при номинальной частоте вращения; n , n_c — соответственно текущая и синхронная частоты вращения привода; α — показатель степени, определяющий вид привода и условия его работы.

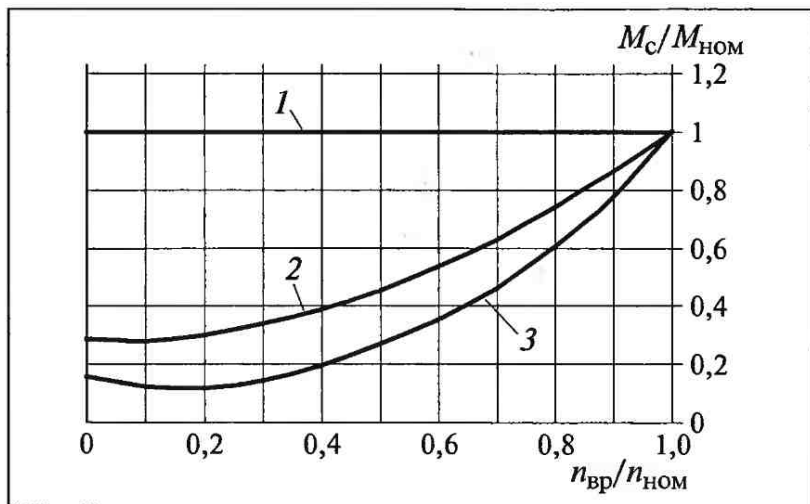


Рис. 1.8. Моменты сопротивления различных механизмов СН электростанции от частоты вращения электродвигателей, отн. ед.

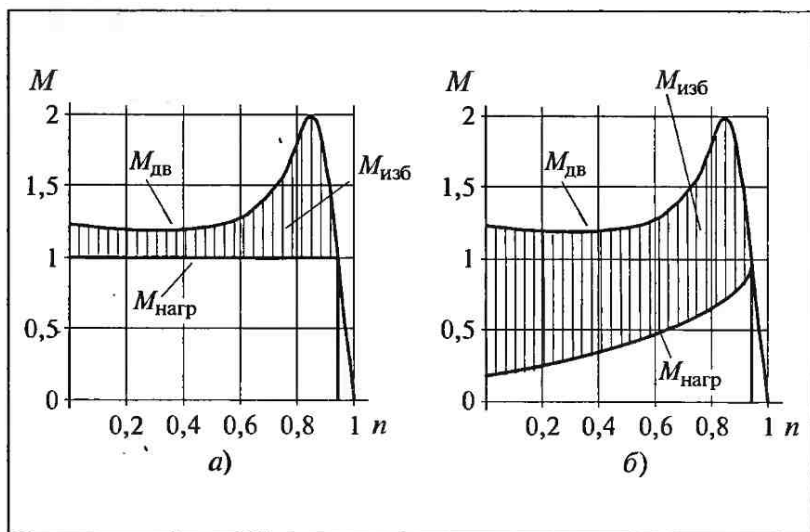


Рис. 1.9. Характеристики избыточных моментов при вращении асинхронного электродвигателя и нагрузки при постоянном (а) и изменяющемся (б) сопротивлении нагрузки

Вышеприведенное выражение удобнее представить в относительных единицах:

$$M_c = M_0 + kr^\alpha. \quad (1.12)$$

Зависимости моментов сопротивления для различных механизмов приведены на рис. 1.8. Зависимость 1 характеризует сопротивление привода с постоянным моментом. Зависимости 2 и 3 характеризуют приводы механизмов с вентиляторной и насосной нагрузкой.

Для запуска приводимого механизма необходим положительный избыточный момент вращения:

$$M_{изб} = M_{дв} - M_c > 0. \quad (1.13)$$

Избыточный момент $M_{изб}$ будет увеличивать частоту вращения привода. При этом электродвигатель не должен перегреваться пусковым током выше допустимого значения.

Определить реальное время пуска двигателя можно следующим образом. Необходимо построить механические характеристики двигателя и привода (рис. 1.9) [5, 9, 16, 19]. За базовый принимаем номинальный момент двигателя и все механические параметры привода приводим к валу двигателя.

Графически вычитая из функции $M_{дв}$ функцию $M_{нагр}$, получаем функцию избыточного момента $M_{изб}$. Область между функцией избыточного момента и абсциссой разбиваем на ряд прямоугольников с основанием Δs и высотой $\Delta m_{изб}$.

Полученное время реального пуска $t_{пуск}$ необходимо сравнить с допустимым временем пуска электродвигателя [19]:

$$t_{пуск, доп} = 150(v - v_{ном}) / [J_{ном}^2 (k_I^2 - 1)], \quad (1.14)$$

где v — допустимое превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды; $v_{ном}$ — превышение температуры обмотки статора при номинальной нагрузке на валу электродвигателя; $J_{ном}$ — номинальная плотность тока статорной обмотки (для двигателей массового производства лежит в диапазоне 4 — 6 А/мм²); k_I — кратность пускового тока электродвигателя по отношению к номинальному значению.

При правильно выбранном электродвигателе $t_{пуск} \leq t_{пуск, доп}$. В противном случае необходимо выбрать другой электродвигатель с лучшими пусковыми характеристиками.

Длительность пуска электродвигателя можно определить из выражения [5, 9, 19]:

$$t_{\text{пуск}} = T_j \sum_{i=1}^{i=n} \Delta s / \Delta m_{\text{изб}}, \quad (1.15)$$

где $T_j = GD^2 n_j / (375 M_{\text{ном}})$ — механическая постоянная времени агрегата [9].

Длительность пуска $t_{\text{пуск}}$ и количество пусков электродвигателя в час h при наличии статического и динамического моментов сопротивлений можно найти из выражений [15]:

$$t_{\text{пуск}} = t_{\text{п0}} \frac{F_i}{k_m}; \quad (1.16)$$

$$h = h_0 \frac{k_m k_p}{F_i} \left(\frac{1 - \text{ПВ}}{100} \right), \quad (1.17)$$

где $F_i = (J_{\text{д.р}} + J_{\text{д.м}}) / J_{\text{д.р}}$ — коэффициент инерции; $J_{\text{д.м}}$ — динамический момент инерции приводимого в действие механизма, приведенный к валу электродвигателя; $J_{\text{д.р}}$ — динамический момент инерции ротора электродвигателя; $t_{\text{п0}}$ — паспортная (каталожная) длительность пуска электродвигателя; k_m — коэффициент, определяемый зависимостью статического момента сопротивления от частоты вращения электродвигателя $m_c = f(n/n_c)$ и механической характеристикой двигателя; h_0 — паспортное значение числа пусков электродвигателя в час при отсутствии статических и динамических моментов сопротивления на валу; ПВ — продолжительность включения электродвигателя; $k_p = P(1 - \eta) / P_{\text{ПВ}}(1 - \eta_{\text{ПВ}})$ — отношение суммарных потерь электродвигателя при мощности, соответствующей длительному режиму, к суммарным потерям при мощности, соответствующей повторно-кратковременному режиму.

Предельно допустимый динамический момент инерции приводимого в действие механизма на валу электродвигателя $J_{\text{д. макс}}$, кг · м² (при наличии момента сопротивления), определяется из формулы [15]:

$$J_{\text{д. макс}} = p^\gamma k k_m P_{\text{ном}}^\nu, \quad (1.18)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; p — число пар полюсов электродвигателя; γ, ν — показатели степени.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов k , k_m и показателей степени γ и ν

| Тип двигателя | Диапазон высот оси вращения, мм | k_m при | | | | | k | ν | γ |
|---------------|---------------------------------|-------------------|------------------|-----------|-------------|-------------|-------|-------|----------|
| | | $m_c = (n/n_c)^2$ | $m_c = n/n_{c1}$ | $m_c = 1$ | $m_c = 0,9$ | $m_c = 0,8$ | | | |
| 4А | 50 – 132 | 0,9 | 0,8 | 0,4 | – | – | 0,045 | 1,0 | 2,0 |
| | 160 – 250 | 0,85 | 0,7 | 0,2 | – | – | | | |
| | 280 | | | – | 0,15 | – | | | |
| | 315 – 355 | 0,8 | 0,65 | – | – | 0,15 | | | |
| 4АН | 160 – 250 | 0,85 | 0,7 | 0,2 | – | – | 0,075 | 0,9 | 2,0 |
| | 280 | | | – | 0,15 | – | | | |
| | 315 – 355 | 0,8 | 0,65 | – | – | 0,15 | | | |
| 4АР | 160 – 250 | 0,85 | 0,75 | 0,35 | – | – | 0,06 | 1,0 | 2,0 |
| 4АС | 71 – 250 | 0,9 | 0,8 | 0,5 | – | – | 0,045 | 1,1 | 2,5 |

Значения коэффициентов k , k_m и показатели степени для двигателей серии 4А представлены в табл. 1.1 [15].

Значения коэффициентов k_m в табл. 1.1 приведены для следующих случаев:

- квадратичная зависимость статического момента сопротивления от частоты вращения $m_c = (n/n_c)^2$ (вентиляторная характеристика);
- линейная зависимость статического момента сопротивления от частоты вращения $m_c = n/n_{c1}$;
- постоянный статический момент сопротивления нагрузки $m_c = \text{const}$;
- при отсутствии статического момента сопротивления $m_c = 0$, $k_m = 1$.

Если характер зависимости $m_c = f(n/n_c)$ не соответствует данным табл. 1.1, а также для двигателей со значениями k , k_m , γ и ν , отличными от значений, приведенных в табл. 1.1, можно рассчитать длительность пуска $t_{\text{пуск}}$ и допустимое число пусков в час h_0 с помощью приближенных выражений [15]:

$$t_{\text{пуск}} = 1,07 F_i J_{\text{д-р}} \frac{(n_{\text{ном}}/1000)^2}{(m_{\text{ср}}/m_{\text{с.ср}})}, \quad (1.19)$$

где $n_{\text{НОМ}} = n_c(1 - s_{\text{НОМ}})$ — номинальная частота вращения электродвигателя, мин^{-1} ; $m_{\text{ср}} = \frac{1}{n_{\text{НОМ}}} \int_0^{n_{\text{НОМ}}} m dn$ — среднее значение отношения вращающего момента электродвигателя к номинальному значению в процессе пуска; $m_{\text{с.ср}} = \frac{1}{n_{\text{НОМ}}} \int_0^{n_{\text{НОМ}}} m_c dn$ — среднее значение отношения статического момента сопротивления на валу электродвигателя к номинальному моменту в процессе пуска;

$$h_0 = 3600 P_{\Sigma \text{НОМ}} / A_{\text{П}0}, \quad (1.20)$$

где $P_{\Sigma \text{НОМ}} = P_{\text{НОМ,ДВ}}(1 - \eta) / \eta$ — суммарные потери в электродвигателе при номинальной нагрузке, кВт; η — КПД двигателя при номинальной нагрузке; $A_{\text{П}0}$ — потери энергии за один пуск электродвигателя при отсутствии статической и динамической нагрузки, кВт · с:

$$A_{\text{П}0} = 5,56 J_{\text{ДР}} \left(\frac{n_c}{1000} \right)^2 \left[1 + \frac{P_{\text{М1П}} i_{\text{П}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})}{P_{\text{НОМ}} m_{\text{П}}} \right], \quad (1.21)$$

где $P_{\text{М1}} = 3 I_{\text{НОМ,ДВ}}^2 r_{\theta} \cdot 10^3$ — потери в обмотке статора при номинальной нагрузке и расчетной рабочей температуре θ , кВт.

Для изоляционных материалов класса В $\theta = 75^\circ \text{C}$ и $r_{(75)} = 1,22 r_{(20)}$; класса F — $\theta = 115^\circ \text{C}$ и $r_{(115)} = 1,37 r_{(20)}$, где $r_{(20)}$ — значение активного сопротивления обмотки фазы статора электродвигателя при 20°C .

Предельно допустимый момент инерции можно приближенно оценить по условию приращения температуры обмотки за длительность одного пуска:

$$\Delta \theta = v_t t_{\text{П}}, \quad (1.22)$$

где v_t — скорость нарастания температуры в статорной обмотке электродвигателя при пуске, $^\circ \text{C}/\text{с}$.

В первом приближении v_t можно оценить как начальную скорость нарастания температуры при заторможенном роторе электродвигателя:

$$v_t = (k_{\text{П}} J)^2 / N, \quad (1.23)$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент пуска электродвигателя; $N = 200$ — при пуске двигателя из холодного состояния; $N = 165$ — при повторном пуске двигателя для изоляционных материалов класса нагревостойкости В; $N = 146$ — при повторном пуске двигателя для изоляционных материалов класса нагревостойкости F.

Двигатель серии 4А, нагретый до рабочей температуры, допускает один пуск с предельно допустимым динамическим моментом инерции на валу. Этот же двигатель из холодного состояния допускает два последовательных пуска с предельно допустимыми динамическими моментами инерции на валу и остановом двигателя между пусками [15].

Значения количества предельно допустимых пусков в час (h и h_0) и предельно допустимого момента инерции $J_{\text{д max}}$ определяются предельно допустимой температурой обмотки статора или ротора электродвигателя. При расчетах h и h_0 температура обмотки статора принимается равной предельной длительно допустимой для класса нагревостойкости применяемой в двигателе изоляции. При определении предельного допустимого момента инерции в качестве предельно допустимой температуры принимается температура срабатывания встроенной температурной защиты при кратковременных перегрузках. В соответствии с рекомендациями МЭК для материалов нагревостойкостью класса В температура изоляционных материалов не должна превышать $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, класса F — $225\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура обмотки ротора не должна превышать значения $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Разработан ряд прикладных программ для компьютеров на основе решения дифференциальных уравнений, позволяющих более точно прогнозировать время пуска электродвигателей под нагрузкой. Например, в Санкт-Петербургском техническом университете под руководством проф. А. К. Черновца разработана “Программа расчета электромеханических переходных процессов в системах рабочего и резервного электроснабжения собственных нужд электростанций при пуске и самозапуске”.

В период эксплуатации электродвигателей изоляция подвергается нагреву, воздействиям электрических полей, механических нагрузок, агрессивных сред, климатических факторов, различных излучений и т.п. Для малогабаритных машин с напряжением до 1000 В уровень механических нагрузок оказывается сравнительно небольшим, градиенты электрических полей невелики, и они не вызывают электрического старения изоляции. Активное старение изоляции двигателей на $0,4\text{ кВ}$ обусловлено тепловыми перегрузками.

Для электродвигателей, работающих в режимах периодического реверса, важным фактором, снижающим рабочий ресурс, являются механические нагрузки и коммутационные перенапряжения при пусках.

Существенное влияние на срок службы изоляции оказывает и окружающая среда: температура воздуха и особенно влажность, а также загрязненность пылью и агрессивными газами. Поэтому при выборе типа электродвигателя следует учитывать характер помещения, в котором он устанавливается. Это относится к электродвигателям с изоляцией, состоящей из пористых волокнистых органических материалов со значительной гигроскопичностью. Сопротивление изоляции электродвигателя, согласно ПУЭ, не нормируется. Считается, что сопротивление изоляции электрических машин должно быть не менее 1 кОм на 1 В номинального напряжения машины. Проникновение влаги ухудшает диэлектрические свойства изоляции и вызывает необходимость ее периодической просушки. В этом случае следует применять закрытые продуваемые двигатели.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Требования, предъявляемые к устройствам защиты электрических двигателей с напряжением питания 0,4 кВ

Требования к устройствам релейной защиты при аварийных и аномальных режимах работы электроэнергетического оборудования различны. Поэтому они рассматриваются отдельно [1].

Защиты при *аварийных режимах* должны действовать селективно, иметь высокое быстродействие, обладать необходимой чувствительностью и надежностью.

Селективность, или избирательность, защит позволяет при аварии отключать только поврежденный элемент или участок сети. Селективное действие защит является обязательным требованием. Неселективное действие защит допускается в исключительных случаях для обеспечения быстродействия и только в том случае, если это не повлечет за собой опасных последствий [1, 22, 23].

Быстродействие защит позволяет минимизировать размеры разрушений при КЗ, обеспечить термическую стойкость оборудования, кабелей и уменьшить влияние снижения напряжения на работу потребителей.

Чувствительность называется способность защит выявлять КЗ в зоне действия и резервировать действие других защит смежных элементов сети, в том числе и при КЗ через переходное сопротивление. Чувствительность защит должна быть достаточной при всех режимах работы электроэнергетической системы.

Надежность необходима для правильной и безотказной работы защит при КЗ в пределах установленной для них зоны действия.

Релейная защита от *аномальных режимов* работы должна обладать *селективностью, чувствительностью и надежностью*. Высокого быстродействия от этих защит, как правило, не требуется. Защиты

от аномальных режимов работают на “сигнал”, а отключение производится только при возникновении опасности повреждения оборудования.

Надежность и бесперебойность работы электрических двигателей в первую очередь обеспечиваются правильным выбором их номинальной мощности, режимом работы, видом исполнения, правильным выбором сечений и типов соединительных кабелей, правильно работающими устройствами релейной защиты и противоаварийной автоматики. Электрические двигатели являются самыми распространенными потребителями электрической энергии на любом производстве. Поэтому устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики электрических двигателей должны быть выполнены как можно проще. При этом должна обеспечиваться высокая надежность работы этих устройств.

Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики электродвигателей служат для ликвидации аварийных и аномальных режимов работы, которые возникают при их эксплуатации.

Высокие требования предъявляются к защитам ответственных электродвигателей собственных нужд электрических станций. Неправильное срабатывание защит этих двигателей или неправильная работа системной и технологической автоматики может привести к сбою нормальной работы электростанций.

Известно, что наиболее тяжелые повреждения в любом электроэнергетическом оборудовании, в том числе и электродвигателях, связаны с возникновением коротких замыканий. В сетях с напряжением 0,4 кВ КЗ сопровождаются дугой и выгоранием изоляционных материалов.

К *аварийным режимам* относятся:

- многофазные (трех- и двухфазные) КЗ в обмотках, в выводной коробке двигателя или соединительном кабеле;
- однофазные замыкания на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью;
- витковые замыкания в обмотке двигателя.

Электрические двигатели подключаются к распределительным устройствам, вторичным или реактированным сборкам собственных нужд с помощью кабелей. Устройства защиты защищают электрические двигатели и соединительные кабели от КЗ. При защите электродвигателей подключенными с помощью кабеля устройствами с зависящей от тока характеристикой возможны задержка или отказ срабатывания таких защит. При возникновении КЗ происходят разогрев кабеля и возрастание его активного сопротивления, так называемый “тепловой спад тока КЗ”. Поэтому устройства защиты

должны отключать поврежденное электроэнергетическое оборудование при “тепловом спаде”.

К *анормальным режимам* относится тепловая перегрузка, связанная с недопустимым нагревом обмоток двигателя. Тепловые перегрузки вызывают активное старение и разрушение изоляции обмоток двигателя. Перегрузки двигателя могут быть симметричные и несимметричные. Симметричная тепловая перегрузка может быть вызвана:

- длительным протеканием по обмоткам двигателя токов, превышающих номинальные значения;
- перегрузкой механизмов, приводимых в действие электродвигателем;
- нарушением условий охлаждения двигателя.

Несимметричная перегрузка может быть вызвана неполнофазным режимом работы двигателя или при аварийной ситуации витковыми замыканиями в обмотках статора.

Бросок пускового тока при прямом пуске вызывает высокий вращательный момент на валу двигателя. Этот момент нагружает не только двигатель, но и исполнительный механизм. Плавное управление продлевает срок службы двигателя и его привода. Для запуска асинхронных трехфазных двигателей переменного тока широко применяется плавный пуск. Механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором можно изменять при включении дополнительного реостата в цепь ротора. Это позволяет регулировать частоту вращения ротора электродвигателя. При плавном уменьшении сопротивления реостата до нуля обеспечивается плавный пуск и переход двигателя на естественную механическую характеристику. Развитие микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой электроники позволило создать относительно недорогие устройства “плавного пуска” и частотного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Использование плавного пуска обеспечивает плавное увеличение напряжения на статорных обмотках двигателя. Это ограничивает пусковые токи и минимизирует провал напряжения в сети при запуске двигателя. Устройства плавного пуска выпускаются многими ведущими производителями электронного энергетического оборудования. Например, фирма Siemens выпускает устройства плавного пуска Sikostart 3RW30, Sikostart 3RW34 и устройства плавного пуска с функциями управления Simostart MV, Sikostart 3RW22. Преобразователи частоты VACON обеспечивают плавный пуск, останов и непрерывное регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей. Эти устройства выполняют комплексную защиту электродвига-

телей от перегрузок, в том числе вызванных нарушениями питающей сети (перекос фаз, импульсные перенапряжения и пр.).

Требования, предъявляемые к необходимому комплексу устройств противоаварийной автоматики и защитам электрических двигателей, сформулированы в ПУЭ [1].

Защита от междуфазных КЗ должна отключать поврежденный двигатель с минимальной выдержкой времени (согласно ПУЭ [1] в сетях 0,4 кВ $t_{откл.к} \leq 0,2$ с) и может быть реализована с помощью плавких предохранителей и автоматических выключателей. При недостаточной чувствительности электромагнитных расцепителей автоматических выключателей в системе собственных нужд электростанций для защиты электродвигателей могут применяться выносные электромагнитные и статические токовые реле с действием на независимый расцепитель выключателя [1]. Для защиты крупных и ответственных электродвигателей применяются микропроцессорные защиты. Междуфазные КЗ вызывают наибольшие повреждения двигателей и создают недопустимые возмущения в системах электроснабжения. Такую защиту принято называть токовой отсечкой. При недостаточной чувствительности токовой отсечки ее действие резервирует защита от перегрузки с зависимой от тока характеристикой. При защите электродвигателей воздушными автоматическими выключателями применяют автоматические выключатели с двумя расцепителями [$t_{ср1} = 0$ с и $t_{ср2} = f(I_k)$]. При несрабатывании токовой отсечки и отключении КЗ расцепителем автоматического выключателя с зависимой от тока характеристикой $t_{ср2} = f(I_k)$ сложно обеспечить требования ПУЭ по быстродействию защиты от КЗ в сетях 0,4 кВ ($t_{откл.к} \leq 0,2$ с).

Значения пусковых токов приводятся в паспорте на двигатель и составляют $I_{пуск.дв} = (2,5 \div 7,5) I_{ном.дв}$. Реальные токи при пусках двигателя могут на 15 – 20 % отличаться от паспортных значений. Для крупных электродвигателей рекомендуется индивидуальное измерение пусковых токов при нагруженном на них механизме. Правильно работающая защита от КЗ должна быть отстроена от пусковых токов и не срабатывать при пуске (или самозапуске) двигателя. Ток при междуфазных КЗ вблизи нулевой точки статорной обмотки двигателя или витковых КЗ (с замыканием малого числа витков статорной обмотки) меньше значения пускового тока двигателя. Защита от таких КЗ должна сработать при токах меньше пускового тока двигателя. Эти противоречивые требования делают невозможным построение полноценной защиты двигателей простыми способами. Решить данную проблему позволило применение микропроцессорных защит. Защита электродвигателей от междуфазных КЗ, входя-

щая в состав многофункциональных микропроцессорных защит, выполняется с помощью токовой отсечки. Микропроцессорные устройства позволяют загроублять действие защиты во время пуска и самозапуска двигателя и в стационарном режиме работы двигателя обеспечить срабатывание защиты при токах меньше пускового тока двигателя. Применение микропроцессорных устройств усложняет конструкцию защит (в сравнении с использованием автоматических выключателей), требует применения дополнительных трансформаторов тока и питания защит от цепей оперативного тока. Но это окупается высокой чувствительностью и многофункциональностью микропроцессорных устройств при защите крупных ответственных электродвигателей.

При построении релейной защиты крупных электрических двигателей либо при большой длине соединительного кабеля токовая отсечка оказывается недостаточно чувствительной и не обеспечивает полноценной защиты двигателя и систем его питания. Учитывая невысокую стоимость трансформаторов тока сетей 0,4 кВ для защиты ответственных двигателей, можно рекомендовать применение продольной дифференциальной защиты в трехфазном исполнении. Продольная дифференциальная защита двигателей в сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью обладает более высокой чувствительностью, чем токовая отсечка, защищает двигатель при любых КЗ, включая междуфазные КЗ вблизи нулевой точки статорной обмотки двигателя, и наилучшим образом резервирует действие защиты от однофазных замыканий на землю. Применение продольной дифференциальной защиты возможно для двигателей, имеющих нулевые выводы статорных обмоток. К сожалению, электродвигатели 0,4 кВ являются большой редкостью.

Электродвигатели малой мощности (до 28 кВт) подключают к вторичным реактированным сборкам собственных нужд электростанций. Эти двигатели защищаются относительно слаботочными автоматическими выключателями с низкой отключающей способностью. Применение автоматических выключателей с токовой отсечкой для защиты таких электродвигателей неэффективно, поскольку токи КЗ ограничиваются реактором и при защите двигателя токовая отсечка может не сработать. Для защиты от междуфазных КЗ маломощных электродвигателей, подключенных к вторичным реактированным сборкам собственных нужд электростанций, применяются автоматические выключатели с зависимой от тока характеристикой $t_{ср.з} = f(I_K)$. Но использование автоматических выключателей с зависимой от тока характеристикой делает невозможным

выполнение требований ПУЭ по быстродействию защиты от КЗ в сетях 0,4 кВ ($t_{\text{откл.к}} \leq 0,2$ с).

Защита от КЗ является основной защитой, и ее применение обязательно для всех типов электродвигателей.

Защита от замыканий на землю. Однофазные замыкания на землю в обмотках и на выводах статора для сетей собственных нужд электрических станций с глухозаземленной нейтралью (0,4 кВ) сопровождаются большими токами и представляют собой однофазные КЗ. Значение тока однофазного КЗ на землю в сети 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью находится в диапазоне 8 – 18 кА в зависимости от мощности питающего трансформатора собственных нужд (ТСН). Однофазные замыкания на землю, как и междуфазные КЗ, представляют большую опасность для двигателей и создают недопустимые возмущения в системах электроснабжения. Поэтому такие защиты должны работать без выдержки времени. Данный вид повреждений является наиболее частым. Пример построения релейной защиты от замыкания на землю (в системе собственных нужд напряжением 0,4 кВ) приведен на рис. 9.1 и 9.2.

Для повышения надежности защита от однофазных КЗ на землю выполняется двухступенчатой. Первая ступень реализуется с помощью автоматических выключателей или кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности *ТТНП2 – ТТНП4* (например, ТЗЛМ, ТЗЛ, ТЗР, ТКР) и чувствительных токовых реле *КА2 – КА4* (например, РТ-40, РТЗ-51 или РСТ-13). Номинальный ток реле выбирают в зависимости от типа трансформатора тока нулевой последовательности. Первичный ток срабатывания защиты определяется из выражения

$$I_{\text{ср.з}} = (0,5 \div 1,0) I_{\text{ном.дв}} \quad (2.1)$$

и в зависимости от типа применяемого реле может лежать в диапазоне 5 – 150 А [6]. Коэффициент чувствительности защиты при КЗ на землю на выводах двигателя должен быть не менее 1,5. Первая ступень защиты работает без выдержки времени.

Резервирование отказов выключателей двигателей, подключенных к вторичным силовым сборкам 0,4 кВ, осуществляется селективными автоматическими выключателями (см. рис. 9.1) *SF4C* и *SF7C*. Эти выключатели работают с выдержкой времени 0,3 с.

Вторая ступень защиты от замыкания на землю реализуется на базе максимальной токовой защиты (МТЗ с независимой характеристикой) с трансформатором тока в цепи нейтрали трансформатора ТСН 6,3/0,4 кВ (см. рис. 9.1 и 9.2). Для обеспечения селективно-

сти в работе защит вторая ступень защиты работает с выдержкой времени 0,2 – 0,3 с. Известно, что через 0,3 – 0,4 с однофазные КЗ на землю в кабельных сетях 0,4 кВ переходят в многофазные. Поэтому в сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью [1] время отключения однофазного замыкания на землю не должно превышать 0,4 с. Это обусловлено пожарной стойкостью соединительных кабелей.

Защита от перегрузки должна устанавливаться на электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска (с длительностью прямого пуска непосредственно от сети 20 с и более), перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении длительности пускового периода, вследствие понижения напряжения в сети [1].

Защита от перегрузки подразделяется на защиту от симметричных и несимметричных перегрузок.

Защита от симметричных перегрузок (тепловая защита) устанавливается на двигателях, подверженных технологическим перегрузкам, и двигателях с необеспеченным самозапуском. К таким электродвигателям можно отнести двигатели мельниц, дробилок, багерные насосы и т.п. Защита работает на отключение двигателя, на разгрузку механизма или на сигнал. Данная защита, как правило, выполняет также функцию защиты от затянувшегося пуска или неудачного самозапуска.

Защита от перегрузки не устанавливается на двигателях, не подверженных технологическим перегрузкам и не имеющих тяжелых условий пуска и самозапуска, например на электродвигателях циркуляционных и питательных насосов электрических станций и т.п.

Температура обмотки статора работающего электродвигателя пропорциональна квадрату протекающего по ней тока. Перегрузочная способность электрических двигателей определяется зависимостью между сверхтоком и допустимым временем его протекания. Длительность допустимой перегрузки электродвигателя можно определить из выражения [21]:

$$t_{\text{доп}} = t_{\text{доп1}} \frac{k_{j1}^2 - 1}{k_{jn}^2 - 1}, \quad (2.2)$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время перегрузки электродвигателя; $t_{\text{доп1}}$ — допустимое время перегрузки электродвигателя для заданной заводом изготовителем кратности тока перегрузки k_{j1} ; k_{jn} — кратность тока перегрузки электродвигателя.

Так как допустимая длительность полупорной перегрузки для электродвигателей с косвенным охлаждением составляет 2 мин (120 с), то

$$t_{\text{доп}} = 120 \frac{1,5^2 - 1}{k_{j1}^2 - 1} = 120 \frac{2,25 - 1}{k_{j1}^2 - 1} = \frac{150}{k_{j1}^2 - 1}. \quad (2.3)$$

Поэтому, зная допустимое время перегрузки электродвигателя $t_{\text{доп}}$ при заданной кратности тока перегрузки k_{j1} , можно определить перегрузочную характеристику защищаемого электродвигателя.

При использовании этой закономерности широко применяются два критерия для оценки перегрузок электродвигателей. Первый критерий основан на выражении (2.2) и приведен в [23]:

$$t_{\text{доп}} = \tau (\lambda - 1) / (k_i^2 - 1), \quad (2.4)$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время перегрузки электродвигателя; τ — постоянная времени нагрева электродвигателя; λ — коэффициент, зависящий от типа электродвигателя (для асинхронных двигателей с косвенным воздушным охлаждением принимают $\lambda \approx 1,3$); $k_i = I_{\text{дв}} / I_{\text{ном.дв}}$ — кратность сверхтока перегрузки.

Второй критерий предложен в [22]. В его основу положено выражение (2.3):

$$t_{\text{доп}} = A / (k_i^2 - 1), \quad (2.5)$$

где A — коэффициент, определяемый конструкцией электродвигателя и характеризующий его нагрев (для электродвигателей с косвенным воздушным охлаждением принимают $A \approx 150$).

Если постоянная времени нагрева двигателя τ неизвестна, то ее можно определить, найдя коэффициент A из (2.2), (2.4) и (2.5), и наоборот:

$$A = t_{\text{доп}} (k_{j1}^2 - 1); \quad A = \tau (\lambda - 1); \quad \tau = A / (\lambda - 1). \quad (2.6)$$

Используя выражения (2.2), (2.4) или (2.5), можно построить перегрузочную характеристику защищаемого электродвигателя. Например, перегрузочная характеристика электродвигателя с воздушным косвенным охлаждением и постоянной времени нагрева $\tau = 300$ с изображена сплошной линией на рис.2.1.

Характеристика оптимально настроенной защиты от перегрузки должна проходить немного ниже перегрузочной характеристики защищаемого электродвигателя (пунктирная линия на рис. 2.1). Такая

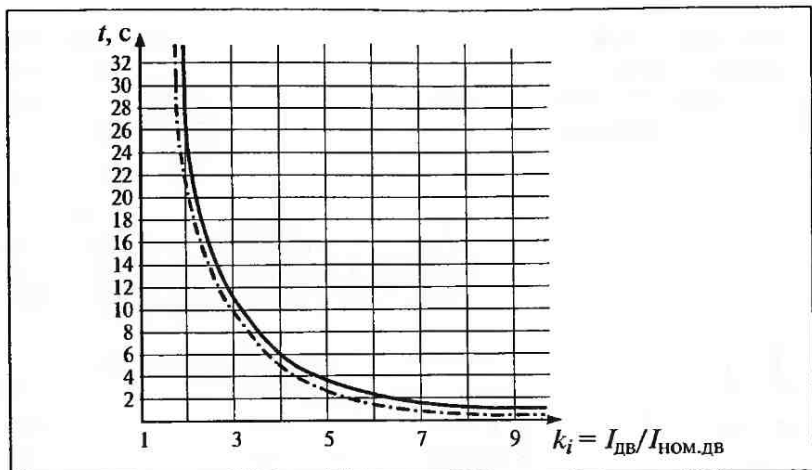


Рис. 2.1. Перегрузочная характеристика электродвигателя с косвенным воздушным охлаждением и постоянной времени нагрева $\tau = 300$ с

времятоковая характеристика защиты позволяет максимально использовать перегрузочную характеристику электродвигателя.

Специальные защиты от витковых замыканий в статорных обмотках электродвигателей не применяются из-за сложности их реализации. Функцию защиты от витковых замыканий выполняют *защиты от несимметричных перегрузок*. Работа защиты от несимметричных перегрузок основана на измерении токов обратной последовательности. К защите от несимметричных перегрузок относится и защита от неполнофазного режима работы электродвигателя.

Защиты от перегрузок могут быть реализованы с помощью автоматических выключателей с тепловым расцепителем, тепловых реле, индукционных реле с инверсной характеристикой, электромеханических реле и реле времени, микропроцессорных защит.

Защиты от перегрузок, построенные с помощью тепловых реле, и автоматические выключатели с тепловыми расцепителями сложны в обслуживании и наладке, имеют большой разброс и нестабильность характеристик. Часто характеристики этих защит не соответствуют тепловым характеристикам защищаемых двигателей. Этот недостаток ограничивает применение электромеханических тепловых реле для защиты ответственных двигателей. Это обусловлено неполным использованием перегрузочных характеристик защищаемых двигателей.

Защиты от перегрузок, построенные с помощью индукционных реле с ограниченно зависимыми характеристиками (например,

РТ-80 или РТ-90), просты в эксплуатации и имеют более высокую надежность, чем тепловые реле. Это позволяет с помощью одного реле выполнить защиту от перегрузки и отсечку при многофазных КЗ. Индукционный элемент с зависимой от тока выдержкой времени применяется для защиты от перегрузки, а мгновенный элемент выполняет функцию отсечки (например, реле РТ-82). При работе защиты от перегрузки двигателя на сигнал или разгрузку механизма применяют реле РТ-84. Недостаток применения индукционных реле обусловлен тем, что при малых кратностях токов перегрузки эти реле не позволяют полноценно использовать перегрузочные характеристики двигателей.

Развитие микропроцессорной техники позволило пересмотреть подход к построению защит электродвигателей от перегрузки, в том числе и для двигателей 0,4 кВ. В настоящее время широкое распространение получил алгоритм, работающий по температурному критерию и основанный на измерении токов, потребляемых электродвигателем.

Приращение температуры $\Delta\theta_{\infty}$ статорных обмоток электродвигателя (в установившемся режиме при $t = \infty$) относительно температуры окружающей среды или ранее полученного теплового импульса можно определить из выражения [20]:

$$\Delta\theta_{\infty} = \Delta\theta_{\text{ном}} \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} \right)^2, \quad (2.7)$$

где $\Delta\theta_{\text{ном}}$ — номинальное значение температуры двигателя при протекании по его статорным обмоткам номинального тока $I_{\text{ном.дв}}$; $I_{\text{дв}}$ — ток, протекающий по статорным обмоткам двигателя, измеренный устройством релейной защиты.

Нагрев электродвигателя моделируется переходной характеристикой аperiodического звена первого порядка. Поэтому процесс нагрева электродвигателя в первом приближении можно описать экспонентой [20]. Температура обмоток двигателя $\Delta\theta_{\text{нагр}}$ в любой момент времени $t_{\text{нагр}}$ определяется микропроцессорной системой из выражения

$$\Delta\theta_{\text{нагр}} = \Delta\theta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}} \right) + \theta_{\text{окр. ср}}, \quad (2.8)$$

где $\Delta\theta_{\infty}$ — приращение температуры статорных обмоток электродвигателя в установившемся режиме, полученное из выражения

(2.7); $\theta_{\text{окр.ср}}$ — температура окружающей среды или температура от ранее полученного теплового импульса (при предыдущем пуске двигателя); $\tau_{\text{нагр}}$ — постоянная времени нагрева двигателя.

В выражениях (2.7) и (2.8) микроконтроллер подставляет измеренные значения токов $I_{\text{дв}}$ и время работы двигателя $t_{\text{нагр}}$ в секундах. По выражению (2.8) определяется текущее значение температуры статорной обмотки двигателя, и, если значение температуры превышает значение уставки, срабатывает защита от перегрузки. Предположим, что данная защита сработала, двигатель отключился и остывает. Процесс охлаждения двигателя, как и его нагрев, описывается экспонентой. Следовательно, значение текущей температуры при охлаждении двигателя $\Delta\theta_{\text{охл}}$ можно найти по выражению

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{охл}} &= (\theta_{\text{уст}} - \theta_{\text{окр.ср}}) e^{-\frac{t_{\text{охл}}}{\tau_{\text{охл}}}} + \theta_{\text{окр.ср}} = \\ &= \theta_{\text{уст}} e^{\tau_{\text{охл}}} + \theta_{\text{окр.ср}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{охл}}}{\tau_{\text{охл}}}} \right), \end{aligned} \quad (2.9)$$

где $\theta_{\text{уст}}$ — значение уставки по температуре, при которой сработала защита; $t_{\text{охл}}$ — время процесса охлаждения электродвигателя; $\tau_{\text{охл}}$ — постоянная времени охлаждения электродвигателя.

При отсутствии принудительной системы охлаждения постоянную времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ принимают равной постоянной времени нагрева $\tau_{\text{нагр}}$.

При охлаждении двигателя до температуры, при которой возможен пуск, микропроцессорная система защиты сигнализирует о возможности повторного пуска. Данная защита с использованием температурного критерия хорошо работает при малой кратности превышения номинальных значений токов двигателя и позволяет выводить на устройства индикации текущее значение температуры статорных обмоток двигателя.

При построении защит от перегрузки в двигателях с частотным приводом или при возможном нарушении режима охлаждения электродвигателя применяются термореле. Температура срабатывания этих реле лежит в диапазоне $(75 \pm 10) \div (155 \pm 10) \text{ } ^\circ\text{C}$. Термореле выпускаются с нормально разомкнутыми и нормально замкнутыми контактами. С помощью этих реле контролируются температура осевых подшипников, активной стали и перегрев обмоток двигателя. Для контроля температуры двигателя реле располагают в торце-

вой области статора. Поэтому при определении температуры изоляции статорных обмоток двигателя эти реле имеют большую инерционность. Наибольшая динамическая погрешность при определении температуры обмоток с помощью термореле получается при пусках двигателя, когда сталь статора имеет температуру окружающей среды, а по обмоткам двигателя протекают пусковые токи. Этот недостаток ограничивает применение термореле для защиты изоляции статорных обмоток двигателя от перегрева. Инерционность термореле частично минимизируется применением температурно-токовых реле. В температурно-токовых реле биметаллический элемент имеет дополнительный подогрев нихромовым проводником, включенным через трансформатор тока. Для защиты двигателей от перегрева применяют два температурно-токовых реле. Их подогреватели включаются с помощью двух специальных трансформаторов тока в цепь двух фаз статорных обмоток двигателя. Температурно-токовые реле встраиваются в электродвигатели мощностью 0,2 – 100 кВт. Реле, в зависимости от типа защищаемого двигателя, калибруются на температуры срабатывания $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$ или $(130 \pm 5)^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды $(0 \pm 40)^\circ\text{C}$.

В настоящее время (вместо контактных термореле серий “Т”, ТМ-4 и т.д.) применяются современные помехоустойчивые термисторные защиты двигателей. В качестве датчиков температуры применяются термисторы или позисторы. Например, фирма Siemens выпускает защиту двигателя 0,4 – 0,66 кВт SIRIUS 3R с термореле типов 3RU11 или 3RN1. При подключении к реле 3RN1 двух термисторов (с различной температурой срабатывания) можно задать две уставки срабатывания реле. Реле с двумя уставками могут работать на сигнал и отключение перегретого двигателя. Также с помощью первой ступени тепловой защиты реле может включить дополнительное охлаждение, снизить нагрузку на валу и т.п. При срабатывании второй ступени двигатель отключается. Термореле второй ступени калибруется на температуру срабатывания 120 или 130 °С. Погрешность срабатывания второй ступени защиты должна быть не более $\pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды 0 – 40 °С. Иногда дополнительные датчики температуры (как и термореле) встраивают в зоны осевых подшипников, активную сталь двигателя и элементы привода рабочего механизма.

В качестве температурных датчиков (термисторов) температурных защит электродвигателей применяют платиновые, никелевые или медные температурные датчики. Следует иметь в виду, что, например, фирма Schneider Electric выпускает микропроцессорные защиты электродвигателей, работающие с платиновыми Pt 100

(100 Ом при 0 °С) и никелевыми (100 Ом, 120 Ом) термометрами. Отечественная промышленность выпускает электродвигатели, оснащенные, как правило, более дешевыми медными термометрами. Поэтому без замены элементов входных измерительных цепей и перепрограммирования коэффициентов передачи измерительного канала температуры эти защиты с медными термометрами сопротивлений работать не могут. Современные микропроцессорные температурные защиты электродвигателей с применением термометров имеют функцию диагностики исправности датчика температуры. При обрыве или замыкании проводника температурного датчика (когда измеряемое сопротивление выходит за допустимые пределы) защита сигнализирует о неисправности. Например, температурная защита электродвигателей фирмы Schneider Electric предназначена для измерения температур в диапазоне от – 35 до + 205 °С. Если измеренное значение температуры статорной обмотки лежит за пределами этого диапазона, то это говорит о неисправности канала измерения температуры.

Защита минимального напряжения (от потери питания) должна устанавливаться на электродвигателях с недопустимым самозапуском по условиям технологического процесса или условиям безопасности. По ПУЭ допускается изменение напряжения в сети питания двигателей не более 5 % и для крановых установок не более 15 %. Защита минимального напряжения реализуется с помощью нулевого расцепителя автоматического выключателя, магнитного пускателя или реле минимального напряжения. Для обеспечения селективности выдержка времени защиты минимального напряжения выбирается на ступень больше времени действия быстродействующих защит от многофазных КЗ (в пределах от 0,5 до 1,5 с). Уставка защиты минимального напряжения должна быть, как правило, не ниже 70 % номинального напряжения сети. Это обусловлено тем, что вращающий момент на валу электродвигателя связан с питающим напряжением квадратичной зависимостью [4]. Работа защиты минимального напряжения с меньшим значением уставки может привести к режиму “опрокидывания” электродвигателя. Защита действует на отключение менее ответственных двигателей для облегчения самозапуска более ответственных двигателей. Защита работает на отключение двигателя, если невозможен его самозапуск под нагрузкой. Защита минимального напряжения не должна отключать двигатели напряжением 0,4 кВ при быстро ликвидируемых КЗ. Как правило, защиты минимального напряжения электродвигателей работают в составе устройств системной автоматики промышленных предприятий или электростанций. В случаях, когда невоз-

можен самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов, применяют отключение части ответственных механизмов с последующим их автоматическим повторным пуском после окончания самозапуска первой группы электродвигателей. Включение последующих групп электродвигателей может осуществляться по току, напряжению или времени [1].

Магнитные пускатели являются устройствами коммутации и выполняют функцию защиты минимального напряжения. Магнитные пускатели отключают электродвигатель при снижении напряжения сети до $(0,65 \div 0,7)U_{\text{ном}}$ и при восстановлении питающего напряжения самостоятельно не включаются. Если требуется обеспечить самозапуск двигателя, управляемого магнитным пускателем, то контакты пусковой кнопки электродвигателя шунтируют контактами реле времени.

Для обеспечения безопасности персонала корпуса электродвигателей и приводимых в действие механизмов должны быть соединены с контуром общего заземления. При невозможности обеспечить заземление с помощью жесткой шины (крановые установки, погружные насосы, передвижные транспортеры и т.п.) применяют заземление с помощью гибкого многожильного проводника или кабеля. В этом случае должны быть предусмотрены специальные защиты: *контролирующая сопротивление цепей заземления и устройство защитного отключения (УЗО)*. При увеличении сопротивления цепи заземления двигателя выше заданной уставки двигатель должен отключаться и не должен включаться. Устройства защитного отключения представляют собой автоматические выключатели, контролируемые целостность изоляции статорных обмоток двигателя относительно земли. Эти устройства имеют уставки срабатывания (токов утечки на землю) 10, 30, 100, 300 и 500 мА. На промышленных предприятиях и электрических станциях применяют УЗО с токами срабатывания 30, 100 или 300 мА. Ток уставки срабатывания УЗО выбирают в зависимости от категории опасности рабочего помещения и напряжения сети.

Для синхронных двигателей должна быть предусмотрена *защита от асинхронного хода*, построенная, как правило, с помощью защиты от перегрузки по току статора, а также *защита цепей ротора от замыкания на землю в одной и двух точках*. Причем первая из них работает на сигнал, а вторая на отключение поврежденного электродвигателя. Для синхронных двигателей должна быть предусмотрена и *защита от обрыва цепи в системе возбуждения*, действующая без выдержки времени на отключение электродвигателя.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Защита электрических двигателей плавкими предохранителями

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Защита с помощью плавких вставок (предохранителей) является наиболее простым, надежным и дешевым способом построения защиты электрических двигателей на промышленных предприятиях от КЗ, в том числе от замыканий на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью. *Защита с помощью плавких вставок не может быть использована как защита электрических двигателей от перегрузок.* Защита плавкими вставками может быть рекомендована для защиты двигателей мощностью до 100 кВт на промышленных предприятиях. Правильным техническим решением является построение защиты одного электродвигателя с помощью комплекта плавких вставок. Защита одним комплектом плавких вставок нескольких электродвигателей нежелательна, но возможна при условии небольшого разброса их мощностей и поочередного режима работы. В этом случае номинальный ток плавкой вставки выбирают по двигателю наибольшей мощности.

Правильно выбранные плавкие вставки обладают токоограничивающими свойствами. При КЗ плавкая вставка перегорает раньше, чем ток КЗ достигает максимального (ударного) значения. Это свойство плавких вставок позволяет минимизировать повреждения в двигателях при КЗ.

Основной недостаток защиты плавкими вставками заключается в однократности их действия, возможности неполнофазного режима работы электрического двигателя и низкой оперативности их замены. Поэтому плавкие вставки не применяют при защите электродвигателей в системе собственных нужд электростанций.

Двигатель при двухфазном питании потребляет ток

$$I_{\text{дв}} = (1,8 \div 2,5) I_{\text{ном.дв}}, \quad (3.1)$$

и такой режим работы может быть достаточно долгим. Это вызывает перегрев двигателя, повышенное старение и разрушение изоляции статорных обмоток. Поэтому при защите плавкими вставками должна быть предусмотрена специальная защита от неполнофазного режима работы электрического двигателя.

Второй недостаток применения плавких вставок заключается в необходимости их периодической замены. Правильно выбранная плавкая вставка имеет номинальный ток меньше пускового тока двигателя. Во время пусков двигателя времятоковая характеристика вставки изменяется. Это обусловлено разогревом и старением плавкого проводника при пусковых токах двигателя. Поэтому для электрических двигателей с частыми пусками периодичность замены вставок возрастает пропорционально частоте пусков.

Плавкие вставки имеют следующие времятоковые характеристики:

- при токах $I_{\text{вст}} = 1,3 I_{\text{ном.вст}}$ время перегорания составляет 1 – 2 ч;
- при токах $I_{\text{вст}} = (3 \div 4) I_{\text{ном.вст}}$ — 5 – 20 с;
- при токах $I_{\text{вст}} = (4 \div 5) I_{\text{ном.вст}}$ — 2 – 8 с;
- при токах $I_{\text{вст}} = (5 \div 7) I_{\text{ном.вст}}$ — 1 – 4 с.

При пусках, реверсах и торможении вставки не должны активно стареть и перегорать. Опытным путем установлено, что ускоренного старения вставок не произойдет, если ток, протекающий через вставку, меньше половины значения тока, который расплавит ее за то же время, т.е. если $I_{\text{вст}} = 5 I_{\text{ном.вст}}$ расплавит вставку за $t = 2 \div 4$ с, то без изменений времятоковой характеристики вставки через нее можно пропустить ток $I_{\text{вст}} = 2,5 I_{\text{ном.вст}}$ за время $t = 2 \div 4$ с.

Простейший вариант защиты электродвигателя с применением плавких вставок приведен на рис. 3.1. Для обеспечения требований техники безопасности плавкие вставки П1 – П3 должны быть установлены после рубильника S1 во всех трех фазах. Они являются элементами защиты кабелей питания и цепей управления электрических двигателей (в данном случае кнопок управления S2, S3 и обмотки магнитного пускателя K1). Защита построена с применением резисторов R1 – R3 (резисторы выбираются одного номинала) и реле K2 с нормально замкнутыми контактами K2.1. В некоторых схемах защит вместо резисторов R1 – R3 применяют конденсаторы [12]. Основной недостаток этих устройств заключается в недействии защиты при обрыве фазного провода в цепи статора или в корпусе

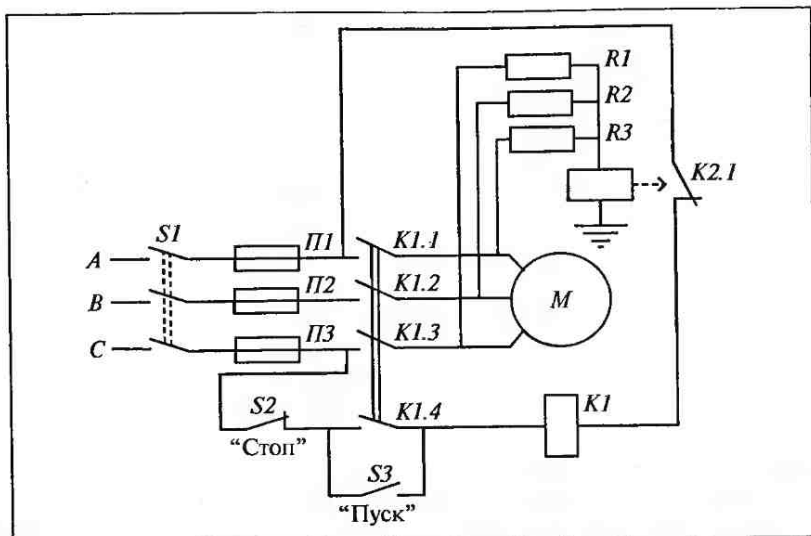


Рис. 3.1. Схема защиты электродвигателя с применением плавких вставок

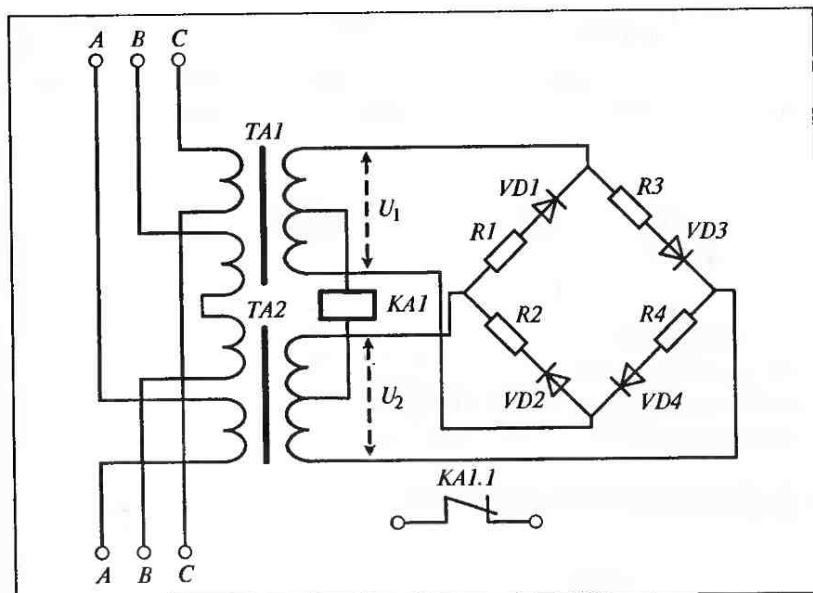


Рис. 3.2. Фазочувствительное устройство защиты электродвигателя (ФУЗ)

Таблица 3.1. Технические характеристики устройств ФУЗ-М

| Параметр | ФУЗ-М | ФУЗ-М2 | ФУЗ-М3 | ФУЗ-М4 | ФУЗ-М5 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Диапазон рабочего тока, А | 1 – 2 | 2 – 4 | 4 – 8 | 8 – 16 | 16 – 32 |
| Ток срабатывания защиты при обрыве фазы, А, не более | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 |
| Время срабатывания защиты при обрыве фазного тока, с, не более | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Время срабатывания защиты при перегрузке 1,5, с, не более | 30 – 50 | 30 – 50 | 30 – 50 | 30 – 50 | 30 – 50 |
| Время срабатывания защиты при перегрузке 7,5, с, не более | 6 – 10 | 6 – 10 | 6 – 10 | 6 – 10 | 6 – 10 |
| Напряжение, В | 380 | 380 | 380 | 380 | 380 |

соединительной коробки двигателя. Данные устройства обеспечивают только контроль исправности плавких вставок.

Более совершенными защитами электродвигателей от неполнофазного режима работы являются устройства с контролем токов в фазах *A*, *B* и *C*. Представителями такого типа устройств являются фазочувствительные устройства защиты (ФУЗ). Схема устройства защиты электродвигателя ФУЗ-М приведена на рис. 3.2. Устройства ФУЗ-М, ..., ФУЗ-5М обеспечивают защиту двигателя при заклинивании ротора, а также при симметричных и несимметричных перегрузках. Технические характеристики этих устройств приведены в табл. 3.1.

Для защиты от неполнофазного режима работы и перегрузок электродвигателей 0,23/0,66 кВ малой мощности можно рекомендовать применение современных электротепловых реле (например, реле типа РТИ производства ИЭК). Принцип действия этих реле основан на разогреве термобиметаллических пластин током электродвигателя. При токе двигателя, превышающем уставку срабатывания реле, электродвигатель отключается от сети. Все термобиметаллические пластины воздействуют на размыкающие контакты через общее коромысло. Такая конструкция реле исключает неполнофазный режим работы электродвигателя.

3.2. ВЫБОР ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Для сетей напряжением 380 В отечественная промышленность выпускает следующие типы предохранителей:

- ПР-2 — предохранители разборные без наполнителя;

- ПН-2 и ПП17 — предохранители разборные с наполнителем (кварцевый песок);

- НПП — предохранители неразборные с наполнителем.

Технические характеристики плавких вставок приведены в приложении (см. табл. П2).

Разборные предохранители допускают замену плавких вставок.

Номинальное напряжение предохранителей и вставок должно соответствовать напряжению питания защищаемых двигателей. Не рекомендуется установка предохранителей и вставок на большее напряжение, так как с увеличением длины проводника плавкой вставки изменяются ее времятоковые характеристики [12].

Токи при торможении и реверсе асинхронных двигателей принимают равными значению и реверсе асинхронных двигателей принимают равными значению пускового тока $I_{\text{пуск}}$ [12].

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и легкими условиями пуска ($t_{\text{пуск}} = 2 \div 5$ с) при небольшой частоте включений номинальный ток плавкой вставки выбирают следующим образом:

$$I_{\text{вст}} \approx (0,4 \div 0,5)I_{\text{пуск}} \quad (3.2)$$

К таким двигателям относятся: электродвигатели вентиляторов, металлорежущих станков, насосов, транспортеров и т.п.

Для асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска ($t_{\text{пуск}} = 10 \div 15$ с) при небольшой частоте включений номинальный ток плавкой вставки выбирают так:

$$I_{\text{вст}} \approx (0,5 \div 0,6)I_{\text{пуск}} \quad (3.3)$$

К таким двигателям относятся электродвигатели дробилок, шаровых мельниц, центрифуг и т.п.

Выражение (3.3) для выбора тока плавких вставок используется при защите асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и легкими условиями пуска ($t_{\text{пуск}} = 2 \div 5$ с) при большой частоте включений двигателя, например для двигателей крановых установок и других двигателей с повторно-кратковременным режимом работы.

Двигатели с фазным ротором имеют невысокие значения пусковых токов $I_{\text{пуск}} \leq 2I_{\text{ном.дв}}$. Для защиты этих двигателей номинальный ток плавкой вставки выбирают из выражения

$$I_{\text{вст}} \approx (1,1 \div 1,25)I_{\text{ном.вст}} \quad (3.4)$$

В исключительных случаях при отсутствии информации о пусковом токе двигателей мощностью до 100 кВт и частотой включения не более 10 – 15 раз в час номинальный ток плавкой вставки, А, можно определить по формулам приближенного вычисления [12]:

$$\text{для двигателей } 0,66 \text{ кВ } I_{\text{НОМ.ВСТ}} \approx 4P_{\text{НОМ.ДВ}};$$

$$\text{для двигателей } 0,4 \text{ кВ } I_{\text{НОМ.ВСТ}} \approx 6P_{\text{НОМ.ДВ}};$$

$$\text{для двигателей } 220 \text{ В } I_{\text{НОМ.ВСТ}} \approx 10,5P_{\text{НОМ.ДВ}},$$

где $P_{\text{НОМ.ДВ}}$ — номинальная мощность двигателя, кВт.

Надежное и быстрое перегорание вставок (за $t = 0,15 - 0,2$ с) обеспечивается при кратности тока

$$I_{\text{к}}/I_{\text{НОМ.ВСТ}} \geq 10 \div 15. \quad (3.5)$$

При такой кратности тока перестает сказываться разброс характеристик вставок в разных фазах. Выражение (3.5) не всегда выполнимо и определяется мощностью питающего трансформатора и удаленностью от него точки КЗ. Поэтому ПУЭ допускает применение вставок на меньшие кратности токов:

$$I_{\text{к}}/I_{\text{НОМ.ВСТ}} = 3 \div 4, \quad (3.6)$$

где значение кратности тока 4 относится к установкам, расположенным во взрывоопасных помещениях [12].

Защита асинхронных двигателей автоматическими выключателями

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) являются первичными защитными аппаратами прямого действия. Они предназначены для аварийных или оперативных отключений электрической цепи. Электрическая дуга, возникающая при разрыве электрической цепи, гасится в среде окружающего воздуха. Поэтому такие выключатели называются воздушными. Автоматические выключатели для защиты электродвигателей от КЗ в сетях 0,4 – 0,23 кВ выполняются трехполюсными (трехфазными).

Автоматические выключатели в зависимости от исполнения могут выполнять функции выключателя, контактора, максимального токового реле с фиксированным временем срабатывания или теплового реле с инверсной характеристикой срабатывания, могут иметь в своем составе независимый, нулевой расцепитель и т.п. Достоинства автоматических выключателей заключаются в многократности их действия, возможности регулировки и проверки уставок. В сравнении с плавкими вставками они более точны, надежны и безопасны в работе. При защите электрических двигателей автоматами возможность неполнофазной работы отсутствует. При использовании автоматических выключателей не требуются трансформаторы тока, дополнительные источники питания и цепи оперативного тока.

Основные элементы автоматического выключателя с максимальным расцепителем изображены на рис. 4.1. Автоматический выключатель включается с помощью ручного 2 или электромагнитного (дистанционно) 1 привода. Отключение выключателя обеспечивается ручным приводом (рукояткой 2), дистанционно при подаче напряжения на обмотку независимого расцепителя 14 (например, с

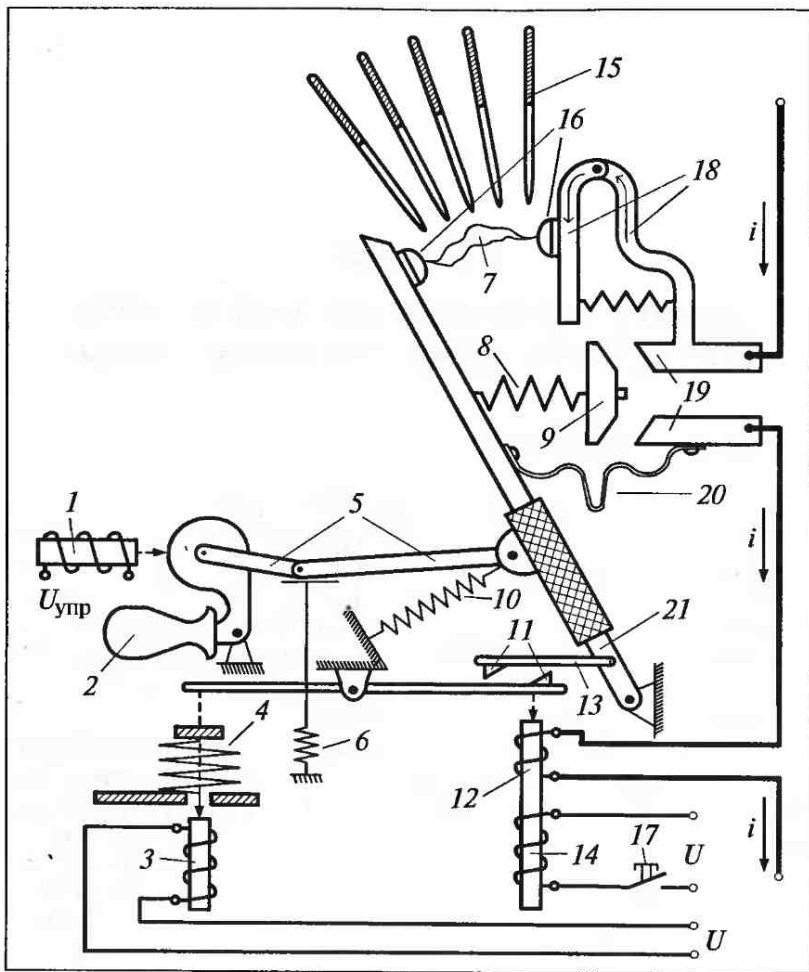


Рис. 4.1. Схема автоматического выключателя:

1 — электромагнитный привод включения; 2 — ручной привод включения; 3 — обмотка минимального расцепителя; 4 — минимальный расцепитель; 5 — рычаги механизма свободного расцепления; 6 — удерживающая пружина фиксации защелки; 7 — электрическая дуга; 8 — пружина фиксации главных контактов; 9 — главный подвижный контакт; 10 — отключающая пружина; 11 — зубцы фиксирующей и удерживающей защелок; 12 — обмотка максимального расцепителя; 13 — фиксирующая защелка; 14 — обмотка независимого расцепителя; 15 — пластины дугогасящей камеры; 16 — дугогасительные контакты; 17 — кнопка управления независимым расцепителем; 18 — электродинамический компенсатор; 19 — главные неподвижные контакты; 20 — гибкая контактная шинка; 21 — коромысло

помощью кнопки 17) или при срабатывании расцепителей защит. Обмотка максимального расцепителя 12 включается последовательно с контактной системой 9, 16, 19 автоматического выключателя и является измерительным органом тока. При протекании через обмотку максимального расцепителя 12 тока больше значения уставки автоматический выключатель срабатывает, преодолевая усилие удерживающей пружины б и выводя из зацепления зубцы удерживающей защелки 11. Контактная система автоматических выключателей, рассчитанных на коммутацию больших токов (более 630 А), выполняется двухступенчатой и состоит из главных 9, 19 и дугогасящих 16 контактов. Главные контактные пары 9, 19 представляют собой массивные медные контакты с серебряными накладками и имеют низкое значение переходного сопротивления (поскольку через них протекает большой ток). Дугогасящие контакты 16 имеют металло-керамическую поверхность, обеспечивающую устойчивость к температуре дуги. При включении автоматического выключателя первыми замыкаются дугогасящие 16, а затем главные 9 и 19 контакты выключателя. После включения выключатель удерживается во включенном положении с помощью зубцов фиксирующей и удерживающей защелок 11. При снижении или исчезновении напряжения в сети срабатывает минимальный расцепитель 3, 4 автоматического выключателя и выключает его, выводя из зацепления зубцы удерживающей защелки 11. При отключении выключателя первой размыкается главная контактная пара и весь ток отключения перераспределяется на дугогасящие контакты. Это исключает образование дуги на главных контактах выключателя. Электрическая дуга с дугогасящих контактов 16 выдувается в дугогасящую камеру магнитным дутьем. Дугогасящая камера выполняется из стальных пластин 15, которые выполняют гашение электрической дуги за счет деления длинной дуги на короткие отрезки. В некоторых выключателях применяется лабиринтное — щелевое — гашение дуги (эффект гашения дуги в узкой щели).

При коммутации больших токов для устранения самопроизвольного отключения выключателя и эффекта приваривания контактов применяется электромеханический компенсатор 18. Компенсатор 18 обеспечивает компенсацию электродинамических усилий на контактах. Токи в шинках 20 имеют разные направления, и при больших значениях токов создается дополнительное электродинамическое усилие прижима контактов. При включении выключателя на КЗ срабатывает максимальный расцепитель. Действие максимального расцепителя преодолевает усилие пружины б и производит перемещение рычагов механизма свободного расцепления 5 в верхнюю

мертвую точку. Это позволяет отбросить коромысло 21 в крайнее левое положение и разомкнуть контактные группы автоматического выключателя.

Воздушные автоматические выключатели по своему функциональному назначению делятся на группы:

- автоматические выключатели с электромагнитным или электронным расцепителем мгновенного действия предназначены для выполнения первой ступени защит от КЗ. Время отключения электрической цепи автоматическими выключателями с электромагнитным расцепителем мгновенного действия $t_{откл} \leq 0,01$ с. Такие выключатели способны срабатывать раньше, чем ток КЗ достигнет ударного значения;

- селективные автоматические выключатели с электромагнитным или электронным расцепителем с независимой от тока характеристикой предназначены для защиты электродвигателей и резервирования отказов защит с электромагнитным или электронным расцепителем мгновенного действия при КЗ. Селективные автоматические выключатели выпускаются с нерегулируемой выдержкой времени срабатывания $t_{ср} = 0,01 \div 0,1$ с. Эта задержка позволяет отстроить защиту от неправильных срабатываний при апериодической составляющей пускового тока (см. рис. 1.2) электродвигателя. В некоторых выключателях электромагнитный расцепитель дополняют часовым механизмом, и такие устройства работают с регулируемой выдержкой времени $t_{ср} = 0,1 \div 0,7$ с. Это необходимо для селективности защит;

- автоматические выключатели с тепловым (электротермическим) или электронным инерционным расцепителем максимального тока с зависимой от тока характеристикой предназначены для защиты электродвигателей от перегрузок и резервирования отказов защит с низкой чувствительностью при удаленных КЗ;

- комбинированные автоматические выключатели с электромагнитным и тепловым расцепителями (предназначены для защиты от КЗ и перегрузок);

- автоматические выключатели с расцепителем минимального напряжения предназначены для построения защиты минимального напряжения и нулевой защиты. Расцепители минимального напряжения служат для отключения электродвигателей при перерывах питания, если повторный пуск этих двигателей или самозапуск нежелателен или недопустим. Напряжение срабатывания нулевого расцепителя лежит в диапазоне $(0,65 \div 0,7)U_{ном}$. Время срабатывания нулевого расцепителя определяется типом нагрузки электро-

двигателя и параметрами системы автоматического восстановления питания сети;

- автоматические выключатели с независимым расцепителем, который предназначен для дистанционного отключения выключателя от выносной защиты (например, от специальной защиты от однофазных КЗ) или аварийной кнопки;

- дифференциальные автоматические выключатели с расцепителями, срабатывающими от тока утечки на землю, называемые устройствами защитного отключения (УЗО). Эти устройства предназначены для повышения безопасности эксплуатации электрооборудования в сетях 0,23/0,4 кВ. Их применяют для быстрого отключения электродвигателя при нарушении его изоляции или при прикосновении персонала к фазным проводам. Промышленность выпускает УЗО с токами срабатывания 10, 30, 100, 300 и 500 мА. Уставка срабатывания выключателя УЗО выбирается в зависимости от необходимой чувствительности защиты и категории рабочего помещения. Устройства защитного отключения с уставками 10, 30 и 100 мА применяются для защиты человека от поражения электрическим током при прикосновении к одной из токоведущих частей электродвигателя. Устройства с уставкой 10 мА рекомендуются для применения в детских учреждениях и помещениях банно-прачечного назначения. Выключатели УЗО с током срабатывания 300 и 500 мА применяются для обеспечения пожаробезопасности в электроустановках и дублируют действие защиты от однофазных замыканий обмотки электродвигателя на землю. Время срабатывания расцепителя УЗО выбирают в зависимости от напряжения питающей сети из диапазона 10 – 100 мс. Необходимо отметить, что дифференциальные автоматические выключатели (УЗО) не защищают электродвигатель от междуфазных КЗ и сверхтоков. Поэтому последовательно с дифференциальным автоматическим выключателем (УЗО) необходимо включать автоматический выключатель для защиты электродвигателя от режима сверхтоков и междуфазных КЗ.

Перечень и основные технические характеристики автоматических выключателей на токи до 630 А включительно, выпускаемых российскими производителями (за исключением выключателей модульной конструкции), приведены в табл. П3 и П4 [26].

Значения токов КЗ в сетях 0,4 кВ лежат в диапазоне 8 – 18 кА [11]. Отечественные автоматические выключатели с током срабатывания до 25 А (АП50Б, ВА51-25, АЕ20-46М) имеют недопустимо низкие параметры предельной коммутационной способности. Поэтому применение таких выключателей возможно только на реактированных присоединениях. Автоматические выключатели, напри-

мер фирмы Schneider Electric или Legrand, с током срабатывания 25 А имеют предельную коммутационную способность до 100 кА [25].

Организации, эксплуатирующие современные отечественные автоматические выключатели, отмечают их низкое качество [7, 26]. На сегодняшний день лучшими техническими характеристиками обладают автоматические выключатели с электронным расцепителем.

К недостаткам защит с применением автоматических воздушных выключателей следует отнести их низкую чувствительность к КЗ вблизи нулевых выводов статорной обмотки двигателя.

4.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ (УСТАВОК) АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При защите электродвигателей от междуфазных КЗ ток срабатывания автоматического выключателя необходимо отстроить от пускового тока электродвигателя. Для защиты электродвигателей с короткозамкнутым ротором ток срабатывания отсечки автоматического выключателя определяют по выражению

$$I_{\text{ср.о}} \geq k_{\text{отс}} k_{\text{п}} I_{\text{ном.дв}} = k_{\text{отс}} I_{\text{пуск.дв}}, \quad (4.1)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки срабатывания защиты (для автоматических выключателей типов А3120, А3130, А3140, А3700Б, АВМ, “Электрон” $k_{\text{отс}} = 1,8$. Для автоматических выключателей типов А3110 и АП-50 $k_{\text{отс}} = 2$); $k_{\text{п}}$ — коэффициент пуска асинхронного электродвигателя; $I_{\text{ном.дв}}$, $I_{\text{пуск.дв}}$ — соответственно номинальный и пусковой токи электродвигателя.

При большой длине соединительного кабеля значение пускового тока электродвигателя $I'_{\text{пуск.дв}}$ можно найти по формуле

$$I'_{\text{пуск.дв}} = 1,05 \frac{U_{\text{пуск.ном}}}{U_{\text{ном.дв}}} I_{\text{пуск.дв}} \approx 1,05 \frac{Z_{\text{пуск.дв}}}{Z_{\text{с}} + Z_{\text{пуск.дв}}} I_{\text{пуск.дв}}, \quad (4.2)$$

где $Z_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} I_{\text{пуск.дв}}}$ — сопротивление электродвигателя при пус-

ке; $I_{\text{пуск.дв}}$ — значение пускового тока двигателя по паспорту или каталогу; $Z_{\text{с}}$ — сопротивление соединительного кабеля.

Для защиты электродвигателей с фазным ротором ток срабатывания отсечки автоматического выключателя отстраивается от номинального тока электродвигателя:

$$I_{\text{ср.о}} = k_{\text{отс}} I_{\text{ном.дв}} \quad (4.3)$$

Для автоматических выключателей типов АЗ120, АЗ130, АЗ140, АЗ700Б, АВМ, "Электрон" $k_{\text{отс}} = 2,5$. Для автоматических выключателей типов АЗ110 и АП-50 $k_{\text{отс}} = 3$.

Надежность срабатывания автоматических выключателей проверяют по расчетному значению токов КЗ в конце защищаемого кабеля. Коэффициент чувствительности отсечки при междуфазных КЗ должен удовлетворять условию:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{к.пер}}^{(3)}}{2 I_{\text{ср.о}}} \geq 1,5, \quad (4.4)$$

где $I_{\text{к.пер}}^{(3)}$ — ток трехфазного КЗ, который вычисляется с учетом переходного сопротивления $r_{\text{пер}}$.

Коэффициент чувствительности защиты отсечкой при однофазных КЗ на землю должен удовлетворять требованию:

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к.пер}}^{(1)}}{I_{\text{ср.о}}} \geq 1,5. \quad (4.5)$$

Если $k_{\text{ч}}^{(1)} < 1,5$, то необходимо увеличить сечения соединительных кабелей (увеличить токи КЗ) либо применить выносную защиту на вторичных реле косвенного действия. Установка выносной защиты считается оправданной, если для обеспечения $k_{\text{ч}}^{(1)} \geq 1,5$ требуется увеличить сечение соединительных кабелей более чем на одну-две ступени. Для двигателей мощностью $P_{\text{дв}} > 55$ кВт, подключенных к основному распределительному щиту 0,4 кВ, как правило, устанавливается дополнительная выносная защита с действием на независимый расцепитель автоматического выключателя [6].

В исключительных случаях ПУЭ допускает снижение коэффициента чувствительности защиты отсечкой при однофазных КЗ на землю:

$k_{\text{ч}}^{(1)} \geq 1,4$ для автоматических выключателей с $I_{\text{ном}} \leq 100$ А;

$k_{\text{ч}}^{(1)} \geq 1,25$ — с $I_{\text{ном}} \geq 100$ А.

Для отстройки срабатывания отсечки автоматического выключателя от апериодической составляющей броска пускового тока электродвигателя необходимо выбирать автоматические выключатели с временем срабатывания больше апериодической составляющей пускового тока электродвигателя $t_{с.з} > t_{ап}$ (см. рис. 1.2).

Для защиты электродвигателей от перегрузок и резервирования отказов защит с низкой чувствительностью при удаленных КЗ применяют автоматические выключатели с тепловым (электротермическим) или электронным инерционным расцепителем с зависимой от тока характеристикой.

Для несрабатывания защиты от перегрузки в установившемся (стационарном) режиме работы электродвигателя выбирают автомат с номинальным током электромагнитного расцепителя большим (не более чем на 10 – 15 %) или равным номинальному току двигателя $I_{ном.расц} \geq I_{ном.дв}$. Правильно настроенная защита от перегрузок не должна срабатывать при пусках и самозапуске электродвигателей. Поэтому для двигателей с легкими условиями пуска ток тепловых или комбинированных расцепителей автоматического выключателя определяют следующим образом:

$$I_{ср.п} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} I_{ном.дв} = (1,2 \div 1,4) I_{ном.дв} \quad (4.6)$$

Для автоматических выключателей АЗ100, АЗ700, АП-50 с тепловым и электромагнитным комбинированным расцепителем ($k_{отс} = 1,25$; $k_{в} = 1$) $I_{ср.п} = 1,25 I_{ном.расц}$.

Для двигателей с тяжелыми условиями пуска или работающих в режиме частых пусков ток теплового или электромагнитного комбинированного расцепителя определяют по выражению

$$I_{ср.п} = (1,4 \div 1,6) I_{ном.дв} \quad (4.7)$$

Иногда приходится грубить защиту от перегрузки из-за предела кратности тока отсечки $I_{ср.о} = 7 I_{ном.расц}$ (выключатели АЗ134, АЗ144):

$$I_{ном.расц} \leq \frac{I_{ср.о}}{7} = \frac{(11 \div 12) I_{ном.дв}}{7} = (1,5 \div 1,8) I_{ном.дв} \quad (4.8)$$

Это не позволяет обеспечить необходимую чувствительность защиты. В этом случае устанавливается дополнительная выносная защита от перегрузки в одной фазе защищаемого электродвигателя. У автоматических выключателей других типов кратность тока отсечки

к номинальному току теплового или комбинированного электромагнитного расцепителя $I_{\text{ср.п}} > 10 I_{\text{ном.расц}}$ и требования к уставке выключателя при защите двигателей с легкими условиями пуска от перегрузки $I_{\text{ср.п}} = (1,2 \div 1,4) I_{\text{ном.дв}}$ выполняются.

Защита от перегрузки на термобиметаллических контактах имеет нестабильные характеристики срабатывания. Например, завод — изготовитель автоматических выключателей АЗ110 заявляет, что при повышении температуры окружающей среды на каждые 10°C ток срабатывания защиты от перегрузки уменьшается на $6 - 8\%$. При понижении температуры окружающей среды на каждые 10°C ток срабатывания защиты от перегрузки автоматического выключателя АЗ110 увеличивается на $5 - 7\%$.

Для несрабатывания защиты от перегрузки при пусках и самозапуске электродвигателей необходимо выполнить условие $t_{\text{ср.п}} \geq (1,5 \div 2) t_{\text{пуск.дв}}$. Это условие выполнимо для всех типов автоматических выключателей, кроме АВМ ($t_{\text{ср.п}} = 2 \div 4 \text{ с}$). Для двигателей с тяжелым затяжным пуском у выключателя АВМ выводится из действия защита от перегрузки (заклиниванием анкерной скобы часового механизма). При этом добавляется выносная защита с включением реле в одну из фаз защищаемого электродвигателя.

Выбор автоматических выключателей с тепловым расцепителем можно производить следующим образом. С помощью выражений (2.2), (2.4) или (2.5) строят тепловую перегрузочную характеристику защищаемого электродвигателя. И по ней выбирают автоматический выключатель с возможно близкой характеристикой, проходящей немного ниже перегрузочной характеристики защищаемого электродвигателя.

При эксплуатации автоматических выключателей при температуре, отличной от заводской температуры их калибровки, номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя определяют по формуле

$$I_{\text{ср.п}} = (1,2 \div 1,6) I_{\text{ном.дв}} / \alpha, \quad (4.9)$$

где α — коэффициент, учитывающий влияние температуры окружающей среды,

$$\alpha = 1 + 0,006(t_{\text{калиб}} - t_{\text{окр.ср}}); \quad (4.10)$$

$t_{\text{калиб}}$ — температура калибровки автоматического выключателя на заводе-изготовителе (принимают $25, 35$ или 45°C); $t_{\text{окр.ср}}$ — температура окружающей среды.

Надежность срабатывания автоматических выключателей проверяют по расчетному значению токов КЗ в конце защищаемого кабеля.

Если при низкой чувствительности отсечки защита от перегрузок должна отключать однофазные КЗ, то коэффициент чувствительности защиты от однофазных КЗ на землю должен удовлетворять следующим условиям:

для невзрывоопасных помещений

$$k_{\text{Ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к.пер}}^{(1)}}{I_{\text{ном.расц}}} \geq 3; \quad (4.11)$$

для взрывоопасных помещений

$$k_{\text{Ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к.пер}}^{(1)}}{I_{\text{ном.расц}}} \geq 6. \quad (4.12)$$

Проверка автоматических выключателей на отключающую способность проводится для случая трехфазного КЗ в начале соединительного кабеля [18]:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = U_{\text{с}} / (\sqrt{3}Z_{\phi}), \quad (4.13)$$

где $U_{\text{с}}$ — напряжение питающей сети (380 В); Z_{ϕ} — полное сопротивление цепи КЗ, Ом.

Защита электродвигателей от коротких замыканий вторичными электромеханическими реле косвенного действия

При недостаточной чувствительности защит, встроенных в автоматические выключатели, необходимо применять выносные вторичные токовые реле с действием на независимый расцепитель выключателя. Защиты от КЗ на вторичных реле косвенного действия имеют более высокую чувствительность, чем автоматические выключатели. Токовые реле включаются через дополнительные трансформаторы тока в цепи статорных обмоток электродвигателя и требуют для управления независимым расцепителем автоматического выключателя дополнительный источник оперативного тока.

Максимальные мощности асинхронных двигателей 0,4 кВ не превышают 200 кВт. Защита от междуфазных КЗ для электродвигателей мощностью до 5 МВт (согласно ПУЭ) выполняется токовой отсечкой без выдержки времени (рис. 5.1) [1]. Поэтому для защиты основной массы двигателей 0,4 кВ целесообразно применить двухрелейную схему ("неполная звезда") (рис. 5.2).

Ток уставки срабатывания защиты отстраивается от пусковых токов электродвигателя:

$$I_{\text{ср.защ}} = k_{\text{отс}} k_{\text{сх}} k_{\text{пуск}} I_{\text{ном.дв}} / K_I = k_{\text{отс}} k_{\text{сх}} I_{\text{пуск.дв}} / K_I \quad (5.1)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки. При использовании реле типа РТ-40, действующего через промежуточное реле с временем срабатывания $t_{\text{ср}} = 0,04 \div 0,06$ с, принимается равным $k_{\text{отс}} = 1,8$; для реле прямого действия и индукционных реле типов РТ-82 и РТ-84 (вследствие меньшей их точности) $k_{\text{отс}} = 2$ [11, 23, 25]; $k_{\text{сх}}$ — коэффициент схемы. Коэффициентом схемы называют отношение тока,

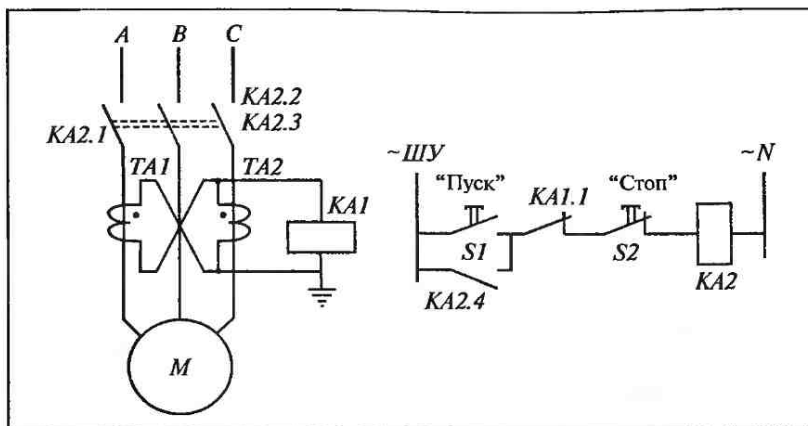


Рис. 5.1. Однорелейная схема защиты электродвигателя от КЗ

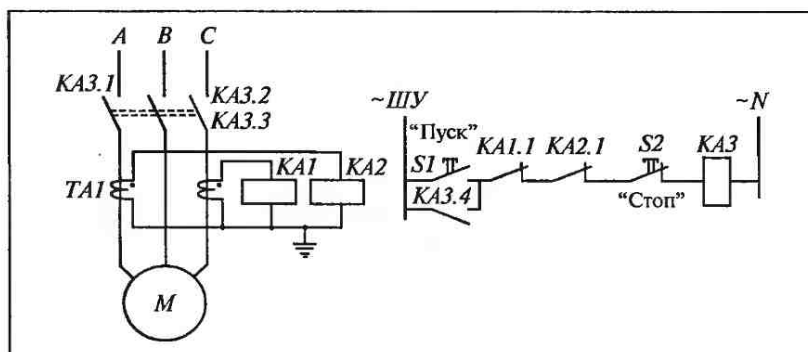


Рис. 5.2. Двухрелейная схема защиты электродвигателя от КЗ

протекающего через обмотку реле, и тока, протекающего через трансформатор тока. Для однорелейной схемы, приведенной на рис. 5.1, $k_{сх}$ принимают равным $\sqrt{3} \approx 1,73$; для двухрелейной схемы, приведенной на рис. 5.2, $k_{сх}$ принимают равным 1; $I_{ном.дв}$, $I_{пуск.дв}$ — соответственно номинальный и пусковой токи двигателя; $k_{пуск}$ — коэффициент пуска; K_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$.

На рис. 5.3 приведена схема релейной защиты электродвигателя от междуфазных и однофазных КЗ и перегрузки [6]. Токсовая отсечка от междуфазных (реле $KA2$, $KA4$) и защита от однофазных КЗ (реле

КА1) действуют без выдержки времени на отключение выключателя *Q* (независимый расцепитель *УАТ*). Реле *КА1* включено в схему фильтра тока нулевой последовательности и реагирует на однофазные замыкания на землю.

Защита от перегрузки (реле *КА3*) действует с выдержкой времени на отключение электродвигателя или на сигнал. При работе защиты от перегрузки электродвигателя на сигнал контакт реле *КТ* включают в цепь сигнализации. Шинки переменного оперативного тока релейной защиты ~ШУ питаются от независимого источника. При построении защиты можно использовать в качестве: *КА1 – КА4* реле РТ-40, *КТ* — реле времени ЭВ-247, *КЛ* — промежуточное реле РП-25, *КН1 – КН2* — указательные реле РУ-21/0,5.

Ток срабатывания отсечки от междуфазных КЗ определяют по формуле

$$I_{\text{ср.о}} = k_{\text{отс}} I_{\text{пуск.дв.}} \quad (5.2)$$

При использовании в качестве *КА1 – КА4* реле РТ-40 значение $k_{\text{отс}} = 1,8$. Ток срабатывания защиты от однофазных КЗ на землю выбирают из условий отстройки от тока небаланса фильтра нулевой последовательности. Ток небаланса вызван несимметрией характеристик трансформаторов тока *ТА1 – ТА3* и несимметрией фазных напряжений и токов. При пусках электродвигателя также воз-

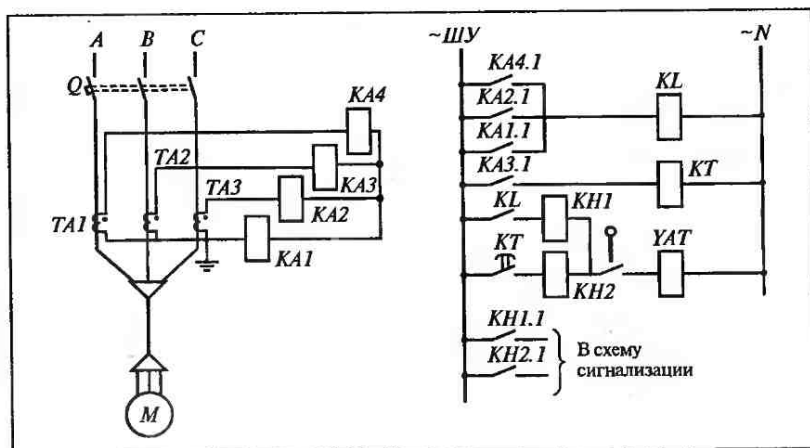


Рис. 5.3. Схема релейной защиты электродвигателя от однофазных и междуфазных КЗ и перегрузки

можно увеличение тока небаланса. Поэтому ток срабатывания защиты принимают:

$$I_{\text{ср.з}} = (0,5 \div 1,0)I_{\text{ном.дв}} \quad (5.3)$$

В отличие от токовой отсечки, защита от однофазных КЗ не требует отстройки от пускового тока электродвигателя. Поэтому применение такой защиты обеспечивает более высокую чувствительность при однофазных КЗ, чем токовая отсечка.

Коэффициент чувствительности защиты от однофазных КЗ на выводах электродвигателя через переходное сопротивление должен быть не менее $k_{\text{чР}}^{(1)} \geq 1,5$.

Ток срабатывания защиты от перегрузки определяют по выражению

$$I_{\text{ср.п}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{ном.дв}}, \quad (5.4)$$

где $k_{\text{н}} = 1,05 \div 1,1$ — коэффициент надежности; $k_{\text{в}} = 0,8$ — коэффициент возврата.

Время срабатывания защиты от перегрузки принимается из условия несрабатывания защиты при пуске или самозапуске электродвигателя и определяется по формуле

$$t_{\text{ср.п}} \geq (1,5 \div 2,0)t_{\text{пуск.дв}}, \quad (5.5)$$

где $t_{\text{ср.п}}$ — время срабатывания защиты при токе, равном пусковому току электродвигателя.

Если обеспечить $k_{\text{ч}} \geq 1,5$ для защит от междуфазных и однофазных КЗ не удастся или существует необходимость полной защиты статорных обмоток двигателя, то в этом случае в качестве защиты от междуфазных КЗ следует применить продольную дифференциальную защиту. Для защиты крупных двигателей возможно применение защиты на базе реле с насыщающимися трансформаторами (РНТ-565). Для отстройки защиты от пусковых токов электродвигателя уставку срабатывания реле продольной дифференциальной защиты определяют по выражению

$$I_{\text{ср.з}} = 2I_{\text{ном.дв}}, \quad (5.6)$$

где $I_{\text{ном.дв}}$ — номинальный ток защищаемого электродвигателя.

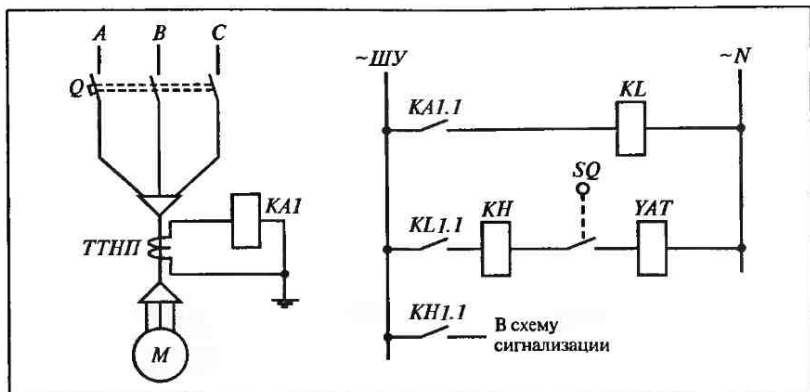


Рис. 5.4. Схема релейной защиты электродвигателя от однофазных КЗ

Применение продольной дифференциальной защиты возможно только для двигателей, имеющих нулевые выводы статорных обмоток.

На рис. 5.4 приведена схема релейной защиты электродвигателя от однофазных КЗ [6]. Эта схема применяется, если защита автоматическими выключателями не обеспечивает отключение (недостаточно чувствительности) однофазных КЗ, а также для защиты мощных электродвигателей ($P_{дв} > 55$ кВт), подключенных к главному щиту 0,4 кВ.

В защите можно использовать следующие типы реле: в качестве КА1 реле РТ-40/2 или РТ-40/6; KL — промежуточное реле РП-25; KH1 — указательное реле РУ-21/0,5; ТТНП — трансформатор тока типа ТЗЛМ (можно применить ТЗЛ, ТЗР, ТКР). Первичный ток срабатывания защиты определяется по выражению (5.6) и составляет 5 — 150 А. Коэффициент чувствительности защиты при однофазных КЗ на выводах электродвигателя должен быть $k_{\text{ч}}^{(1)} \geq 1,5$. Защита питается от переменного или постоянного оперативного тока.

Устройства контроля сопротивления заземления корпуса электродвигателя

Важной задачей при работе с электрооборудованием является безопасность персонала. Для выполнения требований техники безопасности двигатель, корпус и элементы приводимого в действие механизма должны быть заземлены.

Задача усложняется, если двигатель не может быть жестко связан металлической шиной с контуром заземления (краны, кран-балки, погружные насосы и т.п.).

На рис. 6.1 изображен простейший вариант устройства контроля сопротивления заземления электропривода, совмещенный со схемой управления двигателем. Устройство работает следующим образом. Корпус станции управления двигателем жестко соединен шиной с контуром заземления в точке *a*. Корпус двигателя и приводимого в действие механизма — точка *b*. Точки *a* и *b* соединяются гибкой многожильной заземляющей шиной, имеющей активное сопротивление $R_{\text{зазем}}$.

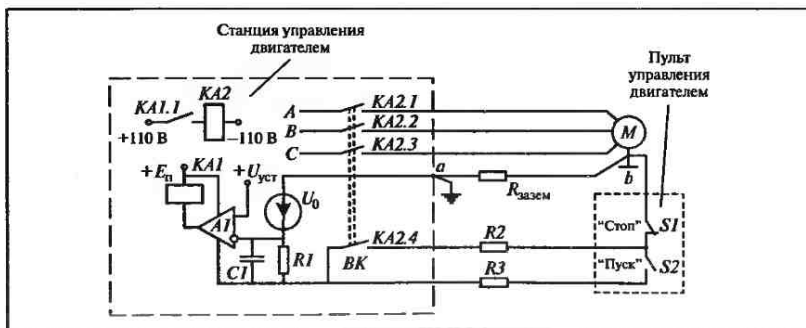


Рис. 6.1. Схема контроля сопротивления заземления и управления электродвигателем (вариант 1)

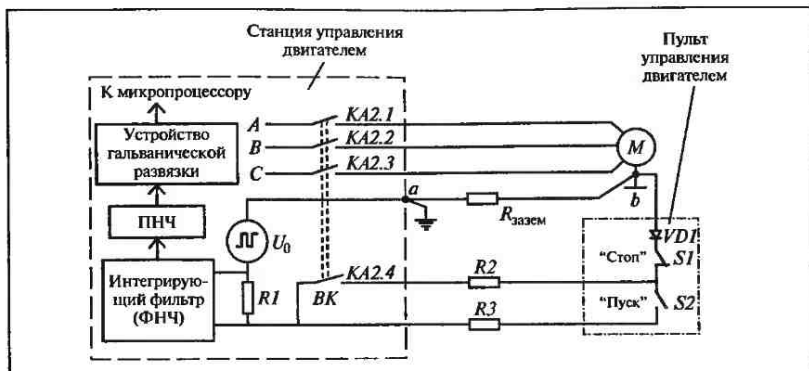


Рис. 6.2. Схема контроля сопротивления заземления и управления электродвигателем (вариант 2)

Провода, соединяющие пульт управления с модулем питания двигателя, имеют сопротивления R_2 и R_3 . При нажатии кнопки "Пуск" замыкается цепь через источник постоянного напряжения U_0 , R_1 , R_3 и $R_{\text{зазем}}$. В этом режиме на резисторе R_1 формируется напряжение

$$U_{R1} = R_1 U_0 / (R_{\text{зазем}} + R_2 + R_1). \quad (6.1)$$

Это напряжение с помощью компаратора $A1$ сравнивается с напряжением уставки $U_{\text{уст}}$. Напряжение уставки вычисляется по выражению:

$$U_{\text{уст}} = R_1 U_0 / (R_{\text{max зазем}} + R_2 + R_1), \quad (6.2)$$

где $R_{\text{max зазем}}$ — максимально допустимое сопротивление заземления.

Если сопротивление заземления $R_{\text{зазем}}$ меньше предельно допустимого значения $R_{\text{max зазем}}$, компаратор $A1$ переключается и срабатывает реле $KA1$. Реле $KA1$ включает вакуумный контактор $KA2$, и двигатель M запускается. Вспомогательные контакты (BK) контактора $KA2.4$ шунтируют кнопку $S2$ "Пуск", и двигатель продолжает работать. При увеличении сопротивления заземления $R_{\text{зазем}}$ выше $R_{\text{max зазем}}$ (или при нажатии кнопки "Стоп") падение напряжения на резисторе R_1 уменьшается и компаратор $A1$ формирует сигнал на отключение двигателя. Если перед включением двигателя сопротивление заземления $R_{\text{зазем}}$ выше допустимого значения $R_{\text{max зазем}}$ устройство не позволит включить двигатель.

К недостаткам вышерассмотренного простейшего устройства следует отнести возможность несанкционированного включения электродвигателя при КЗ проводов пульта управления на землю.

Устройство, приведенное на рис. 6.2, свободно от данного недостатка. Источник U_0 представляет собой генератор двухполярных прямоугольных импульсов (меандр) амплитудой $\pm U_0$. Диод $VD1$ встроен в корпус пульта управления работой электродвигателя. При нажатии кнопки "Пуск" замыкается цепь через источник импульсного напряжения U_0 , $R_{\text{зазем}}$, $VD1$, $R3$ и $R1$. На резисторе $R1$ формируется однополярное напряжение прямоугольной формы амплитудой:

$$U_{R1} = R_1(U_0 - U_{vd}) / (R_{\text{зазем}} + R_2 + R_1), \quad (6.3)$$

где U_{vd} — падение напряжения на диоде $VD1$ (при токе 150 — 200 мА для кремниевых диодов $U_{vd} \approx 0,7$ В).

Интегрирующий фильтр нижних частот преобразует эти импульсы в постоянное напряжение:

$$U_{RI} = R_1(U_0 - U_{vd}) / [2(R_{\text{зазем}} + R_2 + R_1)]. \quad (6.4)$$

Напряжение, снимаемое с фильтра, преобразуется в частоту (с помощью преобразователя напряжения в частоту — ПНЧ) и через устройство гальванической развязки (оптрон) подается в микропроцессор. Микропроцессорный частотомер измеряет частоту, масштабирует ее в измеряемое сопротивление заземления и, если сопротивление $R_{\text{зазем}}$ меньше заданной уставки, разрешает пуск двигателя. При увеличении сопротивления $R_{\text{зазем}}$ выше значения уставки или при нажатии кнопки "Стоп" двигатель отключается.

При КЗ на землю кабелей, соединяющих пульт управления и модуль питания двигателя, происходит выключение из работы диода $VD1$. В этом случае на резисторе $R1$ формируется двухполярное напряжение. На выходе интегрирующего фильтра нижних частот напряжение будет близким к нулю, что эквивалентно нажатию кнопки "Стоп" или обрыву заземляющего проводника. При использовании такого устройства невозможен несанкционированный запуск электродвигателя при КЗ на землю кабелей, соединяющих пульт и станцию управления двигателем.

К достоинствам этого устройства следует отнести возможность диагностики, т.е. возможность измерения сопротивления заземления двигателя при нажатии кнопки "Пуск" или при работающем двигателе. Поэтому при увеличении сопротивления цепи заземления корпуса двигателя персонал может заблаговременно предпринять меры по его восстановлению.

Предпусковой контроль сопротивления изоляции электрических двигателей

Сети с глухозаземленной нейтралью не позволяют измерять сопротивление изоляции относительно земли на работающем электроэнергетическом оборудовании. Это обусловлено тем, что сопротивление изоляции включается параллельно сопротивлению работающей нагрузки. Плановые проверки состояния изоляции выключенного электродвигателя с помощью мегомметра, как правило, не спасают от возникновения аварии. Изоляция неработающего электродвигателя впитывает влагу, и подавляющее число аварий возникает при включении такого двигателя в работу. Для частичного решения данной проблемы многие фирмы — производители микропроцессорных защит применяют так называемый предпусковой контроль сопротивления изоляции электрического двигателя [17].

Контроль сопротивления изоляции статорной обмотки производится на неработающем электродвигателе. Если измеренное сопротивление изоляции выше значения уставки, то станция управления двигателем позволяет его включить. Это исключает возможность включения двигателя с недостаточно высоким сопротивлением изоляции. Измерение сопротивления изоляции производится на рабочем электродвигателе до момента его выключения. При выключении электродвигателя устройство измерения сопротивления изоляции переходит в режим калибровки. Устройство предпускового контроля сопротивления изоляции (рис. 7.1) переходит в режим измерения при выключении электродвигателя контактором *КА1*. С помощью вспомогательных контактов *КА1.4* источник опорного напряжения U_0 подключается к любому фазному выводу обмотки двигателя (например, фаза *С*).

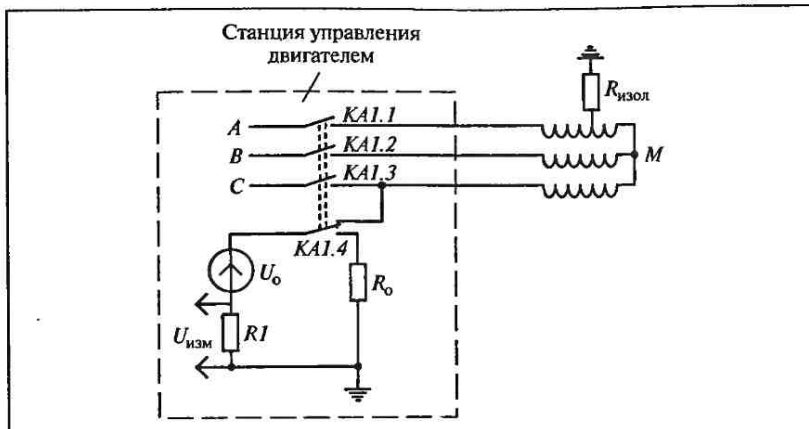


Рис. 7.1. Схема устройства предпускового контроля сопротивления изоляции

Измеряемое падение напряжения на резисторе $R1$ обратно пропорционально сопротивлению изоляции:

$$U_{\text{изм}} = U_0 R_1 / (R_1 + R_{\text{изол}}). \quad (7.1)$$

Гиперболическая передаточная функция устройства обеспечивает большой динамический диапазон измеряемых сопротивлений. При высоком сопротивлении $R_{\text{изол}}$ станция управления разрешает запуск исправного двигателя.

Следует иметь в виду, что сопротивление изоляции — нелинейная от приложенного напряжения величина. Поэтому корректное измерение сопротивления изоляции электродвигателя возможно при уровне измерительного напряжения, близком к рабочему напряжению сети. Значение измерительного напряжения для измерения сопротивления изоляции оборудования, работающего в сети 0,4 кВ, принимают $U_0 = 300 \div 350$ В.

При включении двигателя устройство измерения переходит в режим калибровки. Этот режим реализуется подключением образцового резистора с сопротивлением R_0 (с помощью вспомогательных контактов $KA1.4$) к измерительной цепи. В режиме калибровки микропроцессорная система определяет исправность устройства измерения сопротивления изоляции. При неисправном устройстве измерения $R_{\text{изол}}$ система релейной защиты электродвигателя работает или на сигнал, или на отключение двигателя. Уставка срабатывания защиты от снижения сопротивления изоляции статор-

ных обмоток электродвигателей 0,4 кВ (и 0,66 кВ) лежит в диапазоне $R_{\text{изол}} = 100 \div 500$ кОм. Значение сопротивления изоляции электродвигателя, согласно ПУЭ, не нормируется. Из опыта эксплуатации следует, что сопротивление изоляции электрических машин должно быть не менее 1 кОм на 1 В номинального напряжения машины, т.е. для электродвигателей напряжением 380 В сопротивление изоляции должно быть не менее 380 кОм.

Значение измерительного тока (задается сопротивлением резистора R_I) не должно превышать 1 мА. Это необходимо для обеспечения безопасности персонала.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

Микроэлектронные и микропроцессорные защиты электродвигателей

При недостаточной чувствительности, селективности или низком быстродействии защит, встроенных в автоматические выключатели, а также защит на вторичных токовых реле применяют микроэлектронные и микропроцессорные защиты. Микроэлектронные и микропроцессорные реле усложняют схему защит и требуют дополнительных трансформаторов тока и источника оперативного тока для питания реле.

Все ведущие производители релейной защиты выпускают электронные устройства защиты сетей и двигателей 0,4 кВ широкой номенклатуры. Однотипные защиты ведущих фирм имеют достаточно близкие технические и эксплуатационные характеристики. При разработке этих реле, как правило, использованы ранее известные алгоритмы построения защит, переведенные на новую элементную базу.

Микроэлектронные реле (статические реле на микроэлектронной элементной базе) позволяют обеспечить высокую чувствительность и стабильные характеристики защит, потребляют небольшую мощность по цепям питания. Представителем таких реле является защита электродвигателя типа РЗД-ЗМ ("ВНИИР", г. Чебоксары). Питание этого реле осуществляется от измерительных трансформаторов тока, встроенных в реле. Технические и эксплуатационные характеристики реле РЗД-ЗМ приведены в приложении. Для обеспечения работоспособности защиты (при КЗ между фазами *A* и *B*) автоматический выключатель, управляемый этим реле (см. рис. П.2), должен иметь в своем составе нулевой расцепитель.

Применение микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов позволило обеспечить более высокие технические и

эксплуатационные качества защит, чем при применении статических реле на микроэлектронной базе, плавких предохранителей и автоматических выключателей. Использование вычислительных устройств в составе реле позволило разработать новые алгоритмы построения защит, реализация которых была невозможна на ранее применявшейся элементной базе.

Микропроцессорные защиты, в том числе и для двигателей 0,4 кВ, обладают многофункциональностью, высокой чувствительностью, более стабильными и точными характеристиками, позволяют более полно использовать перегрузочные характеристики защищаемого двигателя, выполняют функцию ранней диагностики развития аварий, имеют функцию самодиагностики, выявляющую неисправности в работе микропроцессорной части защиты, имеют в своем составе часы реального времени. Современные микропроцессорные защиты сетей 0,4 кВ имеют функцию логической селективности ZSI [2] (например, автоматический выключатель с электронным расцепителем фирмы Schneider Electric STR53UE [2]). Логическая селективность позволяет с минимальной выдержкой времени отключить ток КЗ. Это обеспечивает минимальный термический износ сети при аварийных режимах.

Некоторые микропроцессорные защиты сетей 0,4 кВ имеют возможность регистрировать процесс развития аварий. Поэтому относительно высокая стоимость таких защит окупается их многофункциональностью и надежностью работы. Высокий уровень интеграции современных интегральных схем позволил обеспечить высокую надежность работы этих устройств и снизить их себестоимость.

Микропроцессорные защиты не требуют настройки (настройка этих реле заключается во вводе правильных уставок), позволяют упростить ввод уставок, а также выводить информацию об уставках и работе защищаемых объектов в систему АСУ ТП. Кроме функции защиты аналогичные устройства выполняют функцию диагностики, например предпусковой контроль сопротивления изоляции статорной обмотки двигателя в режиме технологических пауз [17]. Это исключает возможность включения двигателя при недостаточно высоком сопротивлении изоляции. Использование этих устройств обеспечивает выполнение современных требований ПУЭ к устройствам защит 0,4 кВ. Паспортные данные, технические и эксплуатационные характеристики некоторых микропроцессорных защит приведены в приложении.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

Принципы выполнения релейной защиты трансформаторов собственных нужд ТСН-6,3/0,4 кВ (10/0,4 кВ) и кабельных сетей 0,4 кВ

Схема выполнения защит ТСН-6,3/0,4 кВ (10/0,4 кВ) и отходящих элементов сети 0,4 кВ приведена на рис. 9.1. Значение тока однофазного КЗ на землю в сети 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью может лежать в диапазоне 8 – 18 кА. Значения токов КЗ в сети 0,4 кВ определяются мощностью трансформатора собственных нужд (ТСН) и схемой соединения его обмоток [11, 22 – 24]. Известно, что в кабельных сетях 0,4 кВ однофазные КЗ за время 0,3 с переходят в трехфазные. Поэтому максимальное время отключения многофазных КЗ для кабелей, отходящих от секции РУСН 0,4 кВ, не должно превышать 0,3 с. Это определяется термической стойкостью современных кабелей и накладывает жесткие требования на быстрдействие и селективность защит. Для защиты кабельных сетей 0,4 кВ применяются различные автоматические выключатели, вторичные электромеханические, микроэлектронные (статические) и микропроцессорные реле (см. гл. 8).

Необходимый набор защит ТСН-6,3/0,4 кВ и отходящих элементов сети 0,4 кВ должен соответствовать требованиям ПУЭ и состоять из следующих защит.

1. *Защита реактивированных вторичных сборок 0,4 кВ.* Защиты применяются для защиты цепей питания электродвигателей СН мощностью 0,1 – 28 кВт и систем освещения (см. рис. 9.1). Эти двигатели обеспечивают привод регулирующей и запорной арматуры системы собственных нужд. Применение реакторов ограничивает токи КЗ. Поэтому для выполнения таких защит применяют более дешевые маломощные автоматические выключатели, например

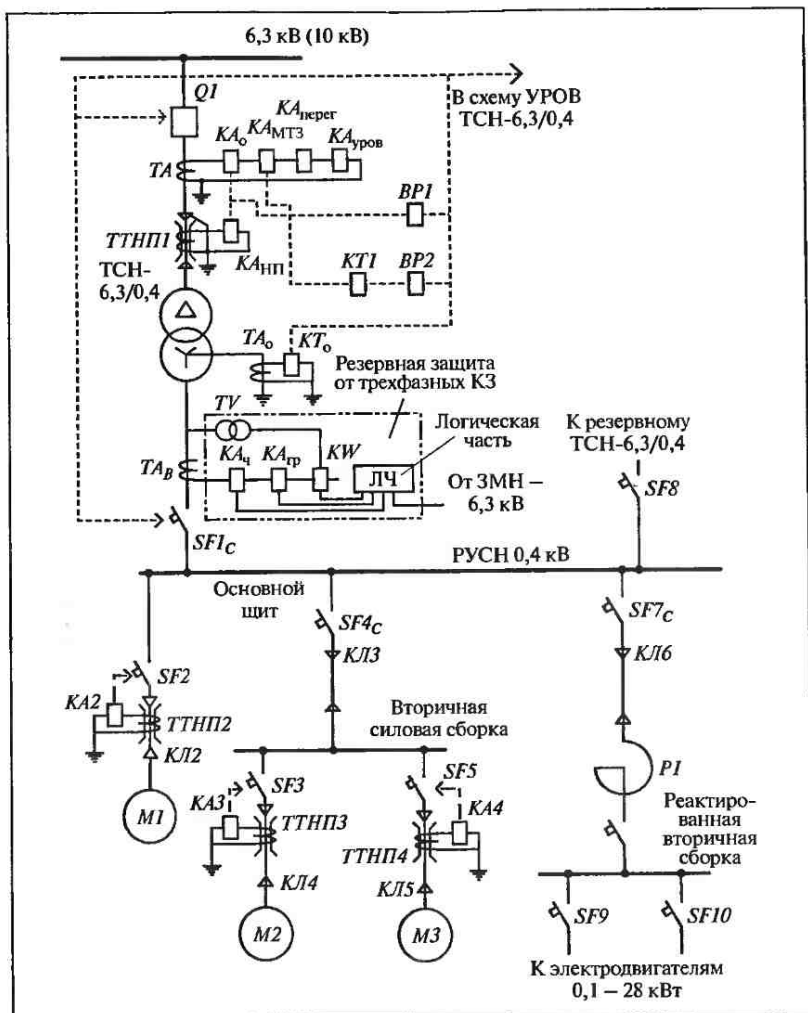


Рис. 9.1. Схема построения защит ТСН-6,3(10)/0,4 кВ и отходящих элементов сети 0,4 кВ

АП-50 с максимальным током отключения $I_{к \max} \leq 1,5$ кА. Автоматический выключатель, установленный после реактора, должен быть оборудован расцепителем с зависимой от тока характеристикой времени срабатывания защиты $t = f(I)$. Поэтому на реакторных вторичных сборках отключение КЗ электромеханическим

автоматическим выключателем с зависимой от тока характеристикой за $0,3 - 0,4$ с не представляется возможным. Полноценная защита электродвигателей может быть решена только цифровыми устройствами с применением функции логической селективности (*ZSI*).

2. *Защита кабельных линий, отходящих от секции РУСН 0,4 кВ, питающих электродвигатели мощностью 55 – 200 кВт, и групповых линий питания вторичных сборок 0,4 кВ.* Защиты этих присоединений выполняются с помощью токовых отсечек, встроенных в комбинированные автоматические выключатели *SF2*, *SF4_C*, *SF7_C* (см. рис. 9.1), реле косвенного действия, а также применением микроэлектронных или микропроцессорных защит. Эти устройства должны обеспечивать необходимую чувствительность при всех видах КЗ на выводах электродвигателя и защищаемых вторичных сборках. Для обеспечения селективности при работе защит присоединений вторичных сборок 0,4 кВ отсечки автоматических выключателей *SF4_C*, *SF7_C* (или других устройств при реализации этих защит) выполняются с выдержкой времени $t_{cp} = 0,1$ с. Для повышения надежности действия этих защит последовательно с автоматическими выключателями с отсечкой устанавливаются автоматические выключатели с зависимой от тока характеристикой.

Для повышения чувствительности защиты удаленного электродвигателя вместе с автоматическим выключателем, оборудованным отсечкой, устанавливается выносная защита нулевой последовательности на *ТТНП2* и токовом реле *КА2*. Выносная защита располагается в ячейке КТП СН этого электродвигателя. В качестве *КА2* рекомендуется применение реле типа РТ-40/6. Применение реле с высоким сопротивлением обмоток в данных защитах недопустимо. Это обусловлено недостаточной нагрузкой для трансформаторов тока типа ТЗЛМ. Например, при использовании реле типа РТ-40/0,2, более чувствительного, но обладающего высоким сопротивлением обмотки, защита имеет недостаточно высокую чувствительность. Выносные защиты нулевой последовательности работают без выдержки времени и действуют на независимый расцепитель автоматических выключателей *SF2*, *SF3* и *SF5*. При низкой чувствительности защиты электродвигателей автоматическими выключателями защита этих присоединений может быть выполнена с применением микропроцессорных реле, имеющих в своем составе защиту нулевой последовательности от однофазных замыканий на землю.

3. *Токовая защита нулевой последовательности* предназначена для резервирования действия защит от замыкания на землю в сети 0,4 кВ. Трансформатор тока защиты *ТА₀* устанавливается в цепь за-

земления нейтрали обмотки ТСН 0,4 кВ. При использовании в качестве TA_0 трансформатора типа ТЗЛМ применяется реле типа РТЗ-51, при использовании трансформатора типа ТК-20 — реле РСТ-13. Токовая защита нулевой последовательности работает с выдержкой времени $t_{ср} \leq 0,3$ с. При выполнении этой защиты на современной элементной базе может быть рекомендовано применение микропроцессорного реле типа БМРЗ-0,4.

4. *Резервная защита от трехфазных КЗ в сети 0,4 кВ (включает в себя защиту дальнего резервирования)* предназначена для резервирования отказов автоматических выключателей, в том числе для отключения удаленных трехфазных КЗ на присоединениях, отходящих от секции 0,4 кВ. Данная защита должна отключать любые трехфазные КЗ в любой точке кабельной сети 0,4 кВ с временем $t_{откл} \leq 0,2$ с. Применение защиты обязательно для трансформаторов ТСН 6,3/0,4 кВ мощностью 630 кВт и более. Защита должна быть отстроена от режимов группового пуска и самозапуска электродвигателей секции 0,4 кВ. Для обеспечения работоспособности защиты необходимо правильно выбирать сечения кабелей присоединений в сетях 0,4 кВ. Токовый и блокирующий органы защиты должны выполняться с учетом специфических особенностей сетей 0,4 кВ.

Один из ранних вариантов такой защиты был разработан в 1975 г. Атомтеплоэлектропроектом (см. рис. 9.1) [11]. Блокирующий орган защиты выполнен на реле минимального напряжения (например, реле типа РН-54) и реле напряжения обратной последовательности (РНФ-1М). Реле минимального напряжения и реле напряжения обратной последовательности расположены на секции нормальной эксплуатации 6,3 кВ (10 кВ). При такой реализации блокировки защита не реагирует на снижение напряжения в сети 0,4 кВ и самозапуск всех электродвигателей 0,4 кВ при любых видах КЗ в сети 6,3 кВ (10 кВ), т.е. самозапуск электродвигателей секции СН 0,4 кВ, связанный со снижением напряжения на секции 6,3 кВ, обеспечивается блокировкой этой защиты.

Функция резервной защиты заключается в отключении трехфазных КЗ в любой точке сети 0,4 кВ при отказах автоматических выключателей. Токовая часть защиты построена с применением двух последовательно включенных токовых реле KA_4 и $KA_{гр}$ на вторичный ток фазы В. Реле подключены к трансформатору тока TA_B . Уставка по току срабатывания грубого реле $KA_{гр}$ отстраивается от тока полной нагрузки *РУСН 0,4 кВ* и пускового тока самого мощного электродвигателя на этой секции.

Дальнее резервирование при трехфазном КЗ в кабелях длиной более 250 м должно обеспечиваться чувствительным токовым реле

$KА_ч$. Уставка по току срабатывания реле $KА_ч$ отстраивается от значения номинального тока полностью нагруженного $PУСН 0,4$ кВ.

Для устранения ложного срабатывания резервной защиты от чувствительного реле $KА_ч$ при одиночных пусках электродвигателей действие защиты блокируется с помощью реле активной мощности KW . При наличии КЗ в линии ток в кабеле носит активный характер и реле активной мощности KW разрешает срабатывание защиты. При пуске или самозапуске ток в электродвигателях имеет реактивный характер и реле активной мощности KW блокирует действие защиты. На трансформаторах ТСН мощностью менее 630 кВт (250 и 400 кВт) резервная защита не устанавливается. Дальнее резервирование в этом случае обеспечивается МТЗ этих трансформаторов.

К существенным недостаткам вышеприведенной защиты дальнего резервирования следует отнести:

- ее низкую чувствительность из-за влияния на ток КЗ сопротивления электрической дуги. Переходное сопротивление электрической дуги в сети 0,4 кВ принимают $R_d = 3 \div 15$ МОм (в зависимости от мощности ТСН) [18], что может быть соизмеримо с внутренним сопротивлением ТСН;

- защита не действует при однофазных и двухфазных КЗ в фазах A и C (трансформатор тока $ТА_B$ установлен в фазе B);

- защита имеет низкую чувствительность при дальних КЗ. Это вызвано ограничением значения тока КЗ высоким сопротивлением длинных соединительных силовых кабелей 0,4 кВ;

- при блокировке защиты дальнего резервирования от защиты минимального напряжения в сети 6,3 (10) кВ (для обеспечения самозапуска электродвигателей собственных нужд 0,4 кВ) защита не работает;

- защита сложна в настройке и выборе значений уставок срабатывания.

Алгоритм работы этой защиты был разработан с учетом применявшихся в то время электромеханических и статических реле. Цифровые устройства релейной защиты позволили реализовать новые алгоритмы работы защиты дальнего резервирования, которые не могли быть ранее реализованы на старой элементной базе.

В настоящее время разработана более совершенная защита дальнего резервирования отказов выключателей на микропроцессорном реле БМРЗ-0,4 [7] при КЗ в сети 0,4 кВ. Защита БМРЗ-0,4 выполняет функцию резервирования отказов автоматических выключателей как при многофазных, так и при однофазных КЗ. Схема защиты дальнего резервирования на реле БМРЗ-0,4 приведена на рис. 9.2.

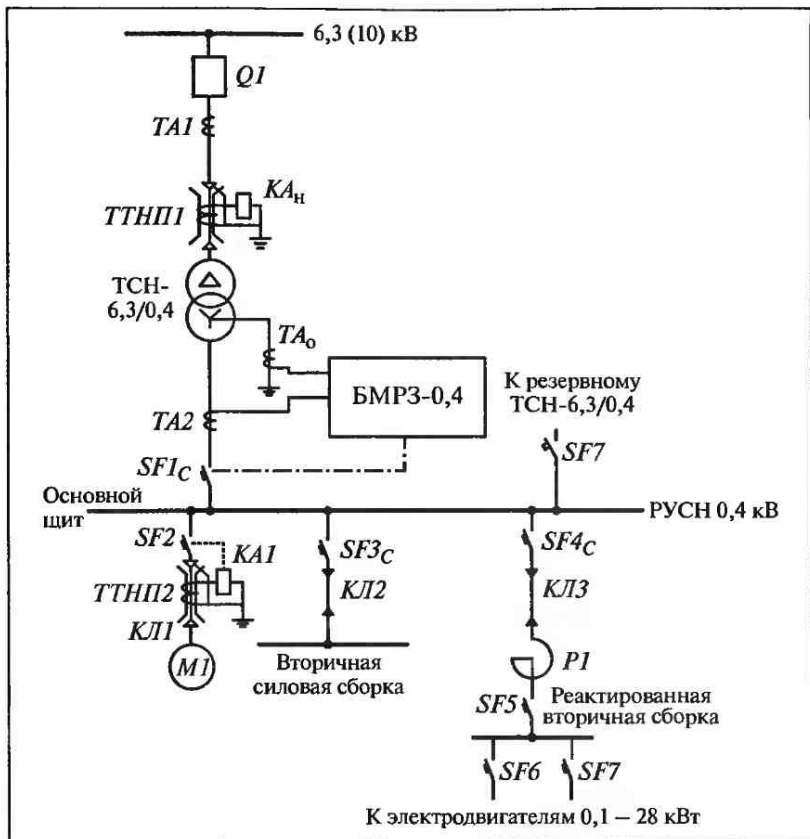


Рис. 9.2. Схема защиты дальнего резервирования отказа выключателей на микропроцессорном реле БМР3-0,4

Принцип действия реле БМР3-0,4 основан на выполнении трех групп условий срабатывания.

Первая группа условий срабатывания защиты получается в результате анализа приращений активной ΔI_{1a} и реактивной ΔI_{1p} составляющих токов прямой последовательности:

$$\Delta I_{1a} \geq k I_{1p} \text{ при } I_{1a} > 0, \quad (9.1)$$

где k — коэффициент принимается равным единице в стационарном режиме работы системы собственных нужд и изменяется в течение

ние временного интервала ($t = 0,2$ с) от 1 до 2 при скачкообразных изменениях напряжения в сети. Это позволяет заблокировать действие защиты при возникновении кратковременных КЗ в сети ВН и связанный с ним кратковременный режим самозапуска двигателей в сети 0,4 кВ. Для блокировки защиты при включении неподвижной статической нагрузки вводится отстройка:

$$I_{\text{бл}} \geq k_{\text{отс}} I_{\text{ст.н}}, \quad (9.2)$$

где $I_{\text{ст.н}}$ — максимальный ток статической нагрузки; $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,2 \div 1,3$. При отсутствии статической нагрузки $I_{\text{бл}}$ принимают равным $0,2I_{\text{н.т}}$.

Для действия защиты при несимметричных КЗ вводится уставка срабатывания по токам $I_{2\text{ср}}$ обратной последовательности:

$$I_{2\text{ср}} \geq I_{2\text{нб.доп}}, \quad (9.3)$$

где $I_{2\text{нб.доп}}$ — уставка допустимого значения тока небаланса обратной последовательности.

Для ТСН с соединением обмоток “звезда — звезда с нулевым проводом” $I_{2\text{нб.доп}}$ определяется по выражению

$$I_{2\text{нб.доп}} = 0,25k_{\text{отс}} I_{\text{ном.т}}/3, \quad (9.4)$$

где $I_{\text{ном.т}}$ — номинальный ток питающего трансформатора ТСН 6(10)/0,4 кВ со стороны 0,4 кВ.

Для ТСН с соединением обмоток “треугольник — звезда с нулевым проводом” $I_{2\text{нб.доп}}$ определяется по выражению

$$I_{2\text{нб.доп}} = 0,75k_{\text{отс}} I_{\text{ном.т}}/3. \quad (9.5)$$

Для устранения ложных срабатываний резервной защиты при срабатывании автоматических выключателей (при КЗ на присоединениях 0,4 кВ) вводится условие согласования по чувствительности с автоматическими выключателями, установленными в конце зоны действия резервной защиты:

$$\Delta I > I_{\text{др}}, \quad (9.6)$$

где ΔI — значения приращений фазных токов; $I_{\text{др}}$ — уставка согласования, которая определяется по выражению

$$I_{др} = I_{согл} \geq k_{н.с} I_{ср.о.авт}, \quad (9.7)$$

где $k_{н.с} = 1,2$ коэффициент надежности согласования; $I_{ср.о.авт}$ — ток срабатывания отсечки автоматического выключателя с максимальным значением тока отсечки.

Вторая группа условий необходима для правильной работы защиты при близких симметричных КЗ, когда сопротивление шинпровода или кабеля носит в основном индуктивный характер. Этот режим характеризуется большими значениями токов в точке КЗ. В этом случае идентификация КЗ определяется из условий:

$$I_1 > 2I_{ном}; \quad U_1 > 0,5U_{ном}, \quad (9.8)$$

где I_1 и U_1 — соответственно ток и напряжение прямой последовательности; $I_{ном}$ — номинальное значение тока источника ввода 0,4 кВ; $U_{ном}$ — номинальное напряжение на секции 0,4 кВ.

Третья группа условий необходима для правильной работы защиты при близких несимметричных КЗ. Этот режим характеризуется большими значениями токов обратной последовательности. В этом режиме защита срабатывает при выполнении следующих условий:

$$I_2 > I_{2нб}; \quad I_2 > I_1/4; \quad \Delta I \geq I_{др}. \quad (9.9)$$

Все группы условий имеют регулируемые временные задержки и два выходных реле. Выходные реле действуют с выдержкой времени $T_{др1}$ на отключение секционного и $T_{др2}$ на отключение вводного выключателя 0,4 кВ.

Реле БМРЗ-0,4 имеет дополнительную ступень дальнего резервирования с зависимой от тока характеристикой:

$$t_{ср.з} = \frac{9T}{\frac{I}{I_{ср.з}} - 1}, \quad (9.10)$$

где $t_{ср.з}$ — время срабатывания защиты; $I/I_{ср.з}$ — отношение тока, протекающего через защиту, к значению тока ее срабатывания; T — уставка времени срабатывания защиты в независимой части характеристики.

Ток срабатывания дополнительной ступени согласовывается с зависимой характеристикой выключателя, имеющего наибольший номинальный ток:

$$I_{ср.з} \geq (1,2 \div 1,3)I_{ср.авт}, \quad (9.11)$$

где $I_{\text{ср.ав}}$ — ток срабатывания защиты от перегрузки автоматического выключателя с наибольшей уставкой зависимой характеристики.

Методика выбора уставок для настройки блока БМРЗ-0,4 приведена в приложении.

Авторы [7] отмечают, что при выборе большого сечения проводников соединительных силовых кабелей устройство не работает. Это вызвано тем, что при близких КЗ значение индуктивного сопротивления в таких кабелях превышает их активное сопротивление и устройство воспринимает КЗ как пуск или самозапуск электродвигателей. Одним из основных достоинств применения блока БМРЗ-0,4 является правильная и быстрая работа защиты при отказе отсечек автоматических выключателей и возникновении “теплого спада” тока КЗ.

5. *Защита от симметричных перегрузок* предназначена для выявления и защиты от режима симметричных перегрузок (во всех фазах) ТСН. Данная защита действует на сигнал. Защита выполняется с помощью одного токового реле $KA_{\text{перег}}$. Реле $KA_{\text{перег}}$ включается в токовую цепь трансформатора тока TA одной из фаз A или C со стороны 6,3 кВ ТСН (см. рис. 9.1).

6. *Токовая отсечка от междуфазных КЗ* устанавливается со стороны 6,3 кВ ТСН и построена с применением двух токовых реле KA_0 , включенных в фазы A и C (см. рис. 9.1). Токовая отсечка работает без выдержки времени и действует на выходное реле BPI . Реле BPI отключает рабочий ТСН без блокировки АВР защищаемой секции 0,4 кВ. В качестве реле KA_0 рекомендуется использовать реле типа РСТ-13 или РТ-40. Данная защита относится к основным защитам ТСН и действует без выдержки времени на отключение ТСН. Защита также может быть выполнена на цифровом терминале, например SPAC-801 производства АВВ или аналогичных устройствах других фирм-производителей. В этом случае SPAC-801 выполняет функцию максимальной токовой защиты и защиты от однофазных замыканий на землю в ТСН.

7. *Защита от однофазных замыканий на землю со стороны 6,3 кВ*. Выполнение этой защиты зависит от режима нейтрали и реализуется, как и аналогичные защиты от однофазных замыканий на землю других присоединений в сети 6,3 (10) кВ, например с помощью трансформатора тока нулевой последовательности $TННП$ типа ТЗЛМ. Реле $KA_{\text{НП}}$ выполняет функцию пускового органа (см. рис. 9.1). В качестве реле $KA_{\text{НП}}$ рекомендуется применение реле типа РТЗ-51. Защита относится к основным защитам ТСН и действует на отключение ТСН или на “сигнал”. Возможно применение цифрового реле SPAC-801.

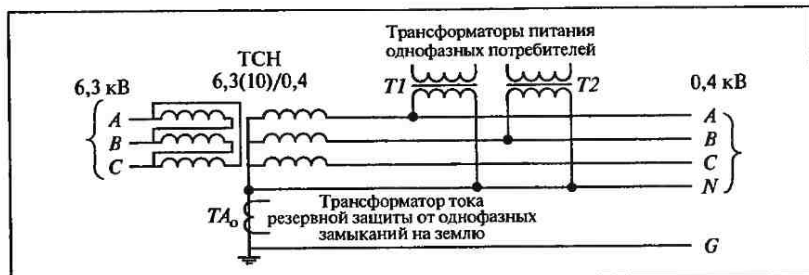


Рис. 9.3. Схема подключения однофазных нагрузок по пятипроводной схеме соединения ТСН и потребителей

8. **Максимальная токовая защита (МТЗ)** устанавливается со стороны вводов 6,3 кВ ТСН и является одновременно защитой ввода рабочего питания 0,4 кВ (см. рис. 9.1). Защита выполняется с применением трех реле $KA_{МТЗ}$. Два из них включаются на вторичные токи фаз А и С, а третье включается на сумму вторичных токов А и С. Это обеспечивает более высокую чувствительность защиты к двухфазным КЗ на стороне 0,4 кВ ТСН с соединением обмоток по схеме Δ/Y . В качестве реле $KA_{МТЗ}$ допускается применение статического реле типа РСТ-13.

Защита работает с выдержкой времени (задержка выполнена на реле $KT1$) и действует на выходное реле $BP2$. Реле $BP2$ отключает ТСН, блокирует АВР питания защищаемой секции 0,4 кВ. Для реализации данной защиты возможно применение цифрового реле SPAC-801 (или ему подобных) с установкой трансформаторов тока TA в трех фазах.

На промышленных предприятиях, где наряду с двигательной нагрузкой используются мощные однофазные потребители в сетях с глухозаземленной нейтралью (система TN-S [1]), применяется пятипроводная схема подключения потребителей (рис. 9.3).

Такое техническое решение позволяет уменьшить ток небаланса (протекающий через трансформатор тока TA_0), вызванный несимметричным распределением нагрузки однофазных потребителей. Это обеспечивает более высокую чувствительность резервной защиты ТСН при однофазных замыканиях на землю. Резервная защита от КЗ на землю защищает фазные выводы и часть обмоток трансформаторов питания однофазных потребителей от замыкания на землю. Трансформаторы питания однофазных потребителей должны иметь собственные устройства защиты от витковых КЗ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Время действия устройств защитного отключения, приведенное в табл. П.1, необходимо для обеспечения электробезопасности, в том числе в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники и ручной инструмент.

В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и другие щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с [1].

Допускаются значения времени отключения, превышающие значения, указанные в табл. П.1, но не более 5 с в цепях, питающих только стационарные электроприемники от распределительных щитов или щитков при выполнении одного из следующих условий:

- полное сопротивление защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком не превышает значения, Ом [1]:

$$R_{з.пров} = U_{пад} Z_{ц} / U_{ф}, \quad (\text{П.1})$$

Таблица П.1. Наибольшие допустимые времена действия устройств защитного автоматического отключения для сетей с глухозаземленной нейтралью (TN) (табл. 1.7.1 ПУЭ) [1]

| Номинальное фазное напряжения, В | Время отключения, с |
|----------------------------------|---------------------|
| 127 | 0,8 |
| 220 | 0,4 |
| 380 | 0,2 |
| Более 380 | 0,1 |

Таблица П.2. Технические характеристики предохранителей на напряжение 380 В

| Тип | Номинальный ток, А | | Предельное значение отключаемого тока, кА |
|---------|------------------------|-------------------------------|---|
| | патрона предохранителя | плавкой вставки | |
| НПН2-60 | 60 | 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 63 | 10 |
| ПН2-100 | 100 | 31,5; 40; 50; 63; 80; 100 | 100 |
| ПН2-250 | 250 | 80; 100; 125; 160; 200; 250 | 100 |
| ПН2-400 | 400 | 200; 250; 315; 355; 400 | 40 |
| ПН2-600 | 630 | 315; 400; 500; 630 | 25 |
| ПП17 | 1000 | 500; 630; 800; 1000 | 120 |

Таблица П.3

а) Номенклатура автоматических выключателей, выпускаемых отечественной промышленностью с номинальными токами 25 – 63 А

| Завод-изготовитель | Тип автоматических выключателей при номинальных токах | | | | |
|---|---|--------------------|-----|-------|---|
| | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 |
| Дивногорский завод низковольтной аппаратуры | — | — | — | — | АЕ2040-10Б |
| Октябрьский завод низковольтной аппаратуры | — | ВА16-26 ВА51-26 | — | — | ВА23-29 |
| НВА, Новосибирск | ВА51-25 | — | — | — | — |
| НВА, Черкесск | АЕ2530 ВА51-25 АС25 | — | — | — | АЕ2040 ВА19-29 ВА23-29 |
| “Электроаппарат”, Тирасполь | АЕ100 | — | — | — | АЕ2044 |
| “Электроаппарат”, Курск | ВА13-25 | ВА14-26 | А63 | АК50Б | АЕ2040 АК63 ВА13-29 ВА2129 АП150Б |

б) Номенклатура автоматических выключателей, выпускаемых отечественной промышленностью с номинальными токами 100 – 630 А

| Завод-изготовитель | Тип автоматических выключателей при номинальных токах | | | | |
|---|---|--------------------|---------|---------|-------------------|
| | 100 | 160 | 250 | 400 | 630 |
| Дивногорский завод низковольтной аппаратуры | ВА57-31 | А37 | ВА57-35 | — | ВА57-39 |
| НВА, Новосибирск | ВА57-31 | А37 | ВА57-35 | — | ВА57-39 |
| “Электроаппарат”, Курск | ВА21-29 | — | — | — | — |
| “Контактор”, Ульяновск | — | А3790 | | | А3790У ВА51-39 |
| | | ВА04-36 ВА06-36 | ВА04-36 | | |
| НПО “ХЭМЗ” | — | А3700 | | | |
| Ангарский электромеханический завод | ВА55-31 | ВА57-33 | ВА51-35 | — | — |
| Нововятский механический завод, Киров | — | — | — | ВА51-37 | — |

Таблица П.4. Основные технические характеристики выключателей на токи до 630 А

| Тип выключателя | Номинальный ток максимального расцепителя, А | Предельная коммутационная способность выключателя, кА | Уставка по току срабатывания в зоне КЗ |
|-----------------|---|---|--|
| АП50Б | 1,6 – 6,3 | 0,3 – 0,6 | 3, 5, 10 |
| ВА51-25 | 0,3 – 25 | 1,5 – 3 | 7, 10, 14 |
| ВА21-29 | 0,6 – 63 | 0,8 – 5,0 | 6, 12 |
| АЕ20-46М | 0,6 – 63 | 0,8 – 5,0 | 12 |
| ВА57-31 | 16 – 25 31,5 – 100 | 4 – 25 40 | 12 |
| ВА57-35 | 16 – 25 31,5 – 50 63 – 125 160 – 250 | 3,5 – 9 10 15 – 35 40 | 16 15 12,5 10 |
| ВА04-36 | 40 – 250 | 18 | 12 |
| ВА51-39 | 630 | 35 | 12 |

где Z_{Σ} — полное сопротивление цепи “фаза — нуль”, Ом; U_{ϕ} — номинальное фазное напряжение сети, В; $U_{\text{пад}} = 50$ В — падение напряжения на участке защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком, В;

- к заземляющей шине распределительного щита или щитка присоединена дополнительная система уравнивания потенциалов, охватывающая те же сторонние проводящие части, что и основная система уравнивания потенциалов [1].

Технические характеристики предохранителей и автоматических выключателей, а также их номенклатура приведены в табл. П.2 – П.4.

Технические и эксплуатационные характеристики реле защиты электродвигателей типа РЗД-ЗМ

Реле РЗД-ЗМ (“ВНИИР”, г. Чебоксары) предназначено для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей напряжением до 1 кВ от неполнофазных режимов, коротких замыканий в обмотке статора и перегрузок. Реле отключает защищаемый электродвигатель воздействием на катушку магнитного пускателя или на независимый расцепитель автоматического выключателя (см. рис. П.1 и П.2). Питание реле осуществляется от токовых цепей защищаемого электродвигателя. При подключении реле каждая фазная жила (А, В, С) силового кабеля, обеспечивающего питание электродвигателя, пропускается через одно из отверстий в корпусе реле (РЗД-ЗМ1, РЗД-ЗМ2) или окно отдельного трансформатора тока (РЗД-ЗМ3, РЗД-ЗМ4) необходимое количество раз (w_1) в соответствии с табл. П.5. Значения но-

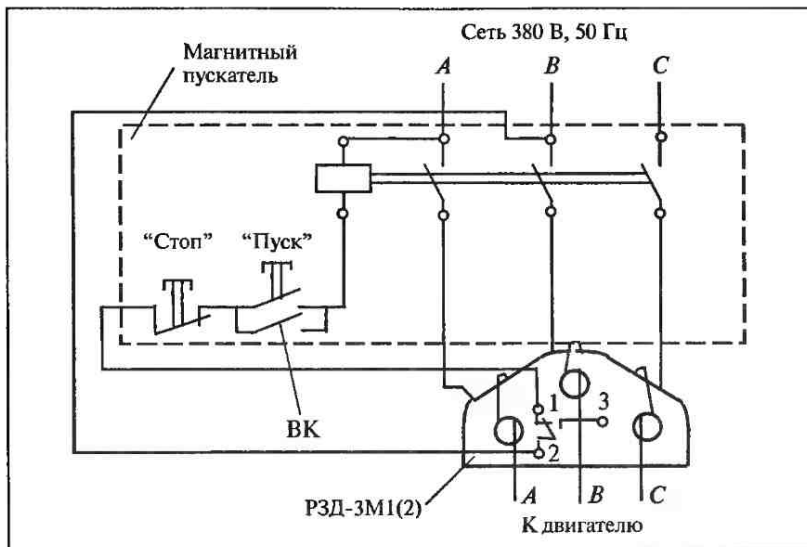


Рис. П.1. Схема подключения реле РЗД-3М с магнитным пускателем

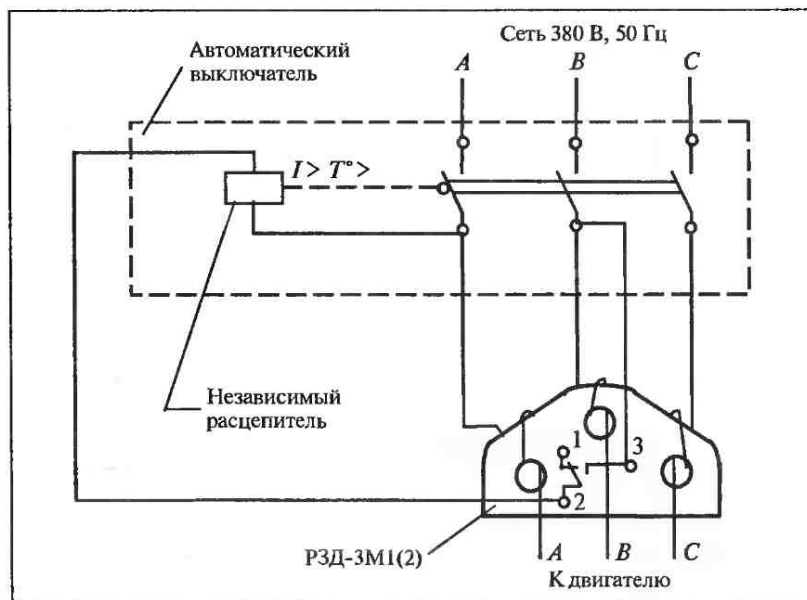


Рис. П.2. Схема подключения реле РЗД-3М с автоматическим выключателем

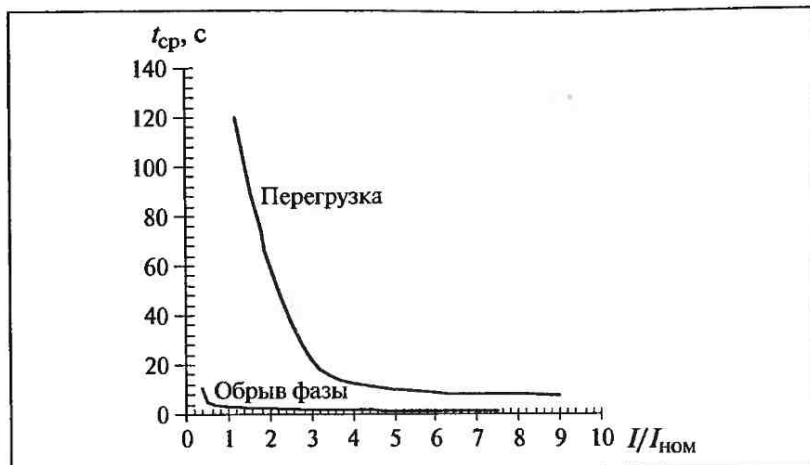


Рис. П.3. Характеристики срабатывания реле РЗД-3М

Таблица П.5. Номинальная намагничивающая сила, А, для различных типов исполнения реле

| | |
|--------------------------------------|--|
| РЗД-3М1 ($I_{w_{НОМ}} = 80A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 40 – 80 (1); 20 – 40 (2); 10 – 20 (4); 5 – 10 (8); 2,5 – 5 (16) |
| РЗД-3М2.1 ($I_{w_{НОМ}} = 160A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 80 – 160 (1) |
| РЗД-3М2.2 ($I_{w_{НОМ}} = 200A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 100 – 200 (1) |
| РЗД-3М3* ($I_{w_{НОМ}} = 300A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 150 – 300 (1) |
| РЗД-3М4.1* ($I_{w_{НОМ}} = 600A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 300 – 600 (1) |
| РЗД-3М4.2* ($I_{w_{НОМ}} = 800A$): | |
| $I_{НОМ}, A (w_1)$ | 400 – 800 (1) |

* В комплект поставки входят три ТТ

Таблица П.6. Массо-габаритные характеристики реле РЗД-3

| Показатель | РЗД-3М1(2) | РЗД-3М3 | РЗД-3М4 |
|---|----------------|-------------------------|----------------------|
| Диаметр отверстия для пропускания фазной жилы силового кабеля, мм | 22 | 39 (диаметр окна ТТ) | 40 (диаметр окна ТТ) |
| Габаритные размеры, мм не более | 160 × 135 × 90 | 160 × 135 × 90 (без ТТ) | |
| Масса, кг не более | 1,1 | 0,8 (без ТТ) | |

минальной намагничивающей силы ($I_{w_{\text{НОМ}}}$) для каждого типа исполнения реле приведены в табл. П.5. В зависимости от номинальной намагничивающей силы реле имеет четыре типа исполнения. В пределах указанных диапазонов номинальных токов защищаемого электродвигателя уставка по току срабатывания регулируется с помощью потенциометра на лицевой стороне реле.

Реле РЗД-3М изготавливаются с функциями контроля дополнительных внешних технологических параметров механизмов, имеющих выход в виде сухого контакта. Это могут быть датчики давления, температуры и т.п.

Реле РЗД-3М могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды от -40 до $+50$ °С.

Характеристика срабатывания реле приведена на рис. П.3, а массо-габаритные характеристики — в табл. П.6.

Основные технические характеристики реле РЗД-3М

| | |
|---|---------------------|
| Уставка по току срабатывания реле при перегрузке | $1,2I_{\text{НОМ}}$ |
| Время срабатывания при перегрузке имеет обратную зависимость от тока нагрузки характеристики и равно, с: | |
| при $1,2I_{\text{НОМ}}$ | 120 — 150 |
| при $6I_{\text{НОМ}}$ | 10 — 12 |
| Уставка по току срабатывания реле при обрыве фазы, не более | $0,3I_{\text{НОМ}}$ |
| Время срабатывания при обрыве фазы имеет обратную зависимость характеристики от тока нагрузки и равно, с, не более: | |
| при $0,3I_{\text{НОМ}}$ | 6 |
| при $6,0I_{\text{НОМ}}$ | 2 |
| Мощность защищаемого электродвигателя, кВт | 1,3 — 400 |
| Допустимая нагрузка на контакты выходного реле при напряжении 380 (220) В, А, не более | 1,5 или 5 |
| Коэффициент плавного регулирования уставки по току срабатывания при перегрузке | 0,5 — 1 |

Номинальный ток, токи срабатывания при перегрузке и при обрыве фазы реле зависят от количества намотанных витков силового кабеля в соответствии с табл. П.5.

На лицевой стороне корпуса расположен потенциометр для регулирования номинального тока в диапазоне, указанном в табл. П.5. Регулирование производится с помощью отвертки через шлиц на ручке потенциометра. Шкала в пределах диапазона регулирования линейна.

Технические и эксплуатационные характеристики реле защиты электродвигателей типа РЗД-1

Реле защиты электродвигателей типа РЗД-1 предназначены для защиты асинхронных двигателей напряжением 380 В и индикации причин аварии ("ВНИИР", г. Чебоксары). Реле питается от напряжения 380 В трехфазного переменного тока. Потребляемая мощность реле не более 35 В · А. Реле РЗД-1 отличаются широкими функциональными возможностями, простотой задания уставок срабатывания (путем набора комбинации фиксированных дискретных уставок в двоичном коде), не требующей имитации, и точ-

ностью их задания (в пределах дискретности). Реле РЗД-1 обеспечивают защиту двигателей при возникновении следующих аварийных ситуаций:

- недопустимая асимметрия напряжения или обрыв фаз трехфазной сети переменного тока на стороне 6 (10) кВ или 380 В питающего трансформатора;

- перегрев двигателя (перегрузка).

Реле РЗД-1 запрещает пуск двигателя при недопустимом снижении сопротивления изоляции его обмоток относительно корпуса.

Реле РЗД-1 имеют также исполнения с дополнительными функциями:

- тепловая защита (при наличии позисторов в статорных обмотках двигателя);

- контроль технологического параметра, например давления в трубопроводе;

- контроль по току перегрузки механизма, работающего в стопорящем режиме;

- с информационными выходами для связи с контроллером или ЭВМ.

Для энергетики разработаны исполнения реле с питанием от сети 220 В оперативного переменного тока, используемые в распределительных устройствах ящичного типа, и исполнения с дополнительным сухим замыкающим контактом для использования этого контакта в цепях сигнализации 220 В оперативного постоянного тока.

Реле РЗД-1 имеют исполнения по току двигателя:

- до 10 А со встроенными в реле трансформаторами тока. Диапазон задания уставок тока 0,2 – 12,6 А — шесть разрядов двоичного кода с дискретностью 0,2 А;

- от 10 до 100 А со встроенными в реле трансформаторами тока. Диапазон задания уставок тока 2 – 126 А — шесть разрядов двоичного кода с дискретностью 2 А;

- свыше 100 А с входами по току с внешних трансформаторов тока. Диапазон задания уставок тока внешнего трансформатора тока 0,2 – 12,6 А — шесть разрядов двоичного кода с дискретностью внешнего трансформатора тока 0,2 А.

Устройство может эксплуатироваться при температуре окружающей среды от -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$.

Технические и эксплуатационные характеристики микропроцессорного блока защиты и диагностики электродвигателей МКЗиД 0,4 кВ

Микропроцессорный блок защиты и диагностики МКЗиД 0,4 кВ, выпускаемый ЗАО “ЭСТРА” [17], предназначен для:

- уменьшения размеров разрушения электродвигателя за счет его отключения на ранней стадии развития повреждения;

- предупреждения повреждения электродвигателя при ненормальных режимах работы;

- непрерывного контроля уровня изоляции обмотки статора относительно корпуса отключенного электродвигателя напряжением 0,4 кВ;

- сигнализации о снижении уровня изоляции ниже допустимого значения с указанием адреса электродвигателя;
- сигнализации состояния электродвигателя “Вкл./Откл.”;
- селективного отключения поврежденного электродвигателя от питающей сети;
- диагностики рабочих механизмов путем анализа электрических параметров электродвигателя;
- контроля и отображения на ЖКИ и передачи на компьютер диспетчера следующих параметров:
 - токов трех фаз;
 - фазного напряжения;
 - уровня сопротивления изоляции статора;
 - уровня несимметрии фазных токов;
 - уровня пульсации фазных токов;
 - величины теплового импульса;
 - протокола срабатывания защит;
 - частоты сети.

Основные характеристики защиты МКЗиД 0,4 кВ

Защита от междуфазных коротких замыканий (максимальная токовая защита без выдержки времени), которая:

- отстраивается от пускового тока электродвигателя без учета апериодической составляющей. Это позволяет повысить чувствительность защиты к коротким замыканиям;
- действует без выдержки времени (минимальное время срабатывания 30 – 45 мс) либо с дополнительной регулируемой задержкой, задаваемой с панели уставок.

Защита от несимметрии фазных токов и витковых замыканий, которая:

- действует по единому алгоритму, не идентифицируя отдельно режим виткового замыкания и режим несимметричной перегрузки;
- имеет ток срабатывания, отстроенный от допустимого для электродвигателя уровня несимметрии в длительном режиме работы;
- имеет выдержку времени, отстроенную от выдержки времени защит от междуфазных КЗ в прилегающей сети.

Защита от симметричной перегрузки:

- имеет интегрально-зависимую характеристику срабатывания, максимально приближенную к перегрузочной характеристике электродвигателя;
- имитирует охлаждение электродвигателя после устранения перегрузки с постоянной времени, соответствующей постоянной времени охлаждения работающего электродвигателя, а после отключения электродвигателя вследствие перегрузки — с постоянной времени остановленного электродвигателя;
- при повторных пусках и периодических перегрузках учитывает накопленный ранее тепловой импульс;
- имеет возможность программного изменения характеристики срабатывания в зависимости от параметров электродвигателя и постоянной времени охлаждения;

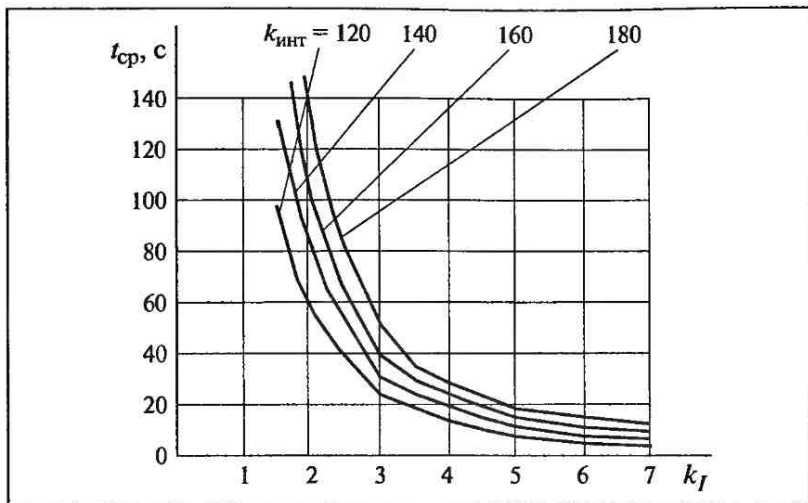


Рис. П.4. Характеристика срабатывания защиты от перегрузки

- осуществляет диагностику агрегата “электродвигатель — механизм” при очередном пуске путем сравнения приращения теплового импульса за время пуска с контрольным значением;
- запрещает пуск электродвигателя при остаточном тепловом импульсе, превышающем контрольное значение.

Характеристики срабатывания для различных значений коэффициента интегрирования (при условии пуска из холодного состояния) приведены на рис. П.4.

Постоянная времени охлаждения остановленного двигателя — 20 мин.

Постоянная времени охлаждения работающего двигателя — 10 мин.

Зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока перегрузки (при различных значениях коэффициента интегрирования $k_{инт}$) приведена в табл. П.7.

Таблица П.7. Зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока перегрузки при различных $k_{инт}$

| $k_{инт}$ | Кратность тока перегрузки k_I | | | |
|-----------|---------------------------------|----|----|---|
| | 1,5 | 3 | 5 | 7 |
| 120 | 97 | 23 | 8 | 4 |
| 140 | 130 | 30 | 11 | 6 |
| 160 | 172 | 38 | 14 | 7 |
| 180 | 232 | 50 | 17 | 9 |

Технические характеристики системы контроля изоляции

Диапазон измерения сопротивления изоляции — 100 кОм — 60 МОм.

Относительная погрешность измерения сопротивления изоляции в диапазоне 400 кОм — 10 МОм не более 10 %.

Погрешность измерения не зависит от колебаний питающего напряжения [в диапазоне $(+10 \div -15) \% U_{\text{ном}}$].

Действует на сигнал либо блокирует включение электродвигателя при снижении сопротивления изоляции ниже заданной уставки.

Контроль изоляции производится автоматически с момента отключения электродвигателя. При этом к его статорной обмотке прикладывается постоянное напряжение 310 В относительно земли. Максимально возможный ток от устройства при контроле изоляции не превышает 1 мА.

При включении ЭД контроль изоляции прекращается.

Защита от повышенной пульсирующей нагрузки, которая:

- предназначена для предупреждения разрушения агрегата “электродвигатель — механизм” при возникновении устойчивого пульсирующего момента на валу электродвигателя, который существенно превышает допустимое для рабочего механизма значение;

- выявляет периодически действующий с частотой вращения агрегата (< 25 Гц) пульсирующий момент;

- действует с выдержкой времени на сигнал либо на отключение.

Для анализа причин срабатывания защит в устройстве формируются четыре протокола срабатывания, в которых фиксируются все контролируемые параметры в момент выдачи команд на отключение, вид сработавшей защиты, часы реального времени.

Локальные устройства системы защиты и диагностики могут объединяться в информационную сеть (интерфейс Modbus RS-485). При подключении модулей “витой парой” обеспечивается дистанционность до 1500 м.

Технические и эксплуатационные характеристики микропроцессорного блока комплексной защиты и диагностики электродвигателей напряжением 0,4 — 6 кВ типа КЗД-04

Микропроцессорное устройство разработано в НИИ энергетики (г. Новочеркасск) и предназначено для защиты асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением 0,4 — 6 кВ любой мощности от всех видов междофазных КЗ и витковых замыканий в обмотке статора, однофазных КЗ на землю (корпус), симметричной и несимметричной перегрузки, от обрыва фазного провода, затянувшихся и несостоявшихся пусков и заклинивания.

Основные технические характеристики защит КЗД-0,4

| | |
|---|-----|
| Время срабатывания токовой отсечки, с, не более | 0,1 |
| Время срабатывания защиты от однофазных КЗ, с, не более | 0,1 |
| Время срабатывания органа несимметрии, с, не более | 2 |
| Время срабатывания органа симметричной перегрузки, с, не более: | |
| при краткости перегрузки 1,5 | 120 |
| при краткости перегрузки 5 | 6,2 |

| | |
|--|-----------------------------|
| Ток срабатывания органа перегрузки | $1,15I_{\text{НОМ}}$ |
| Диапазон регулирования тока срабатывания отсечки | $(8 \div 12)I_{\text{НОМ}}$ |
| Диапазон регулирования тока срабатывания защиты от однофазных КЗ | $(1 \div 5)I_{\text{НОМ}}$ |

Защита обладает высокой чувствительностью, быстродействием, позволяет максимально использовать перегрузочные характеристики защищаемого электродвигателя.

Методика выбора уставок для микропроцессорного реле БМРЗ-0,4 при установке его на вводе 0,4 кВ от трансформатора 6,3(10)/0,4 кВ или генератора 0,4 кВ

1. Максимальная токовая защита

1.1. Первая ступень МТЗ (обозначается $I \gg \gg$) имеет независимую от тока характеристику и два пусковых органа тока: грубый (обозначение $AI \gg \gg$) и чувствительный ($BI \gg \gg$). Чувствительный пусковой орган работает только при введенной функции блокировки МТЗ при пуске и самозапуске электродвигателей. Грубый пусковой орган работает всегда, независимо от того, введена или выведена функция блокировки МТЗ при пуске или самозапуске электродвигателей.

1.2. Ток срабатывания чувствительного пускового органа ($BI \gg \gg$) МТЗ выбирается наибольшим из условий (П.2) и (П.3):

- несрабатывания при максимальном рабочем токе с учетом возврата защиты после отключения внешнего КЗ

$$I_c \geq k_n I_{\text{раб max}} / k_B, \quad (\text{П.2})$$

где k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,1 — 1,2; k_B — коэффициент возврата защиты, принимаемый 0,95; $I_{\text{раб max}}$ — максимальный рабочий ток, принимаемый равным номинальному току питающего трансформатора (генератора) с учетом допустимой перегрузки, А;

- согласования по току с защитами отходящих шин 0,4 кВ

$$I_{\text{ср.з}} \geq k_{\text{н.с}} (I_{\text{ср.о}} + I_{\text{нагр}}), \quad (\text{П.3})$$

$k_{\text{н.с}}$ — коэффициент надежности согласования, принимается 1,2 — 1,3; $I_{\text{ср.о}}$ — наибольший из токов срабатывания отсечки автоматических выключателей отходящих линий, А; $I_{\text{нагр}}$ — ток нагрузки, за исключением тока нагрузки фидера, с защитой которого производится согласование, А.

Проверка коэффициента чувствительности этого пускового органа производится следующим образом:

- при питании от трансформатора и двухфазном КЗ на шинах 0,4 кВ $I_{\text{к Rmin}}^{(2)}$, рассчитанном с учетом переходных сопротивлений и электрической дуги ($R_{\text{д}} = 15$ мОм) при минимальном режиме питающей энергосистемы:

$$k_{\text{чR}}^{(2)} = I_{\text{к Rmin}}^{(2)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,5; \quad (\text{П.4})$$

• при питании от генератора и установившемся токе $I_{кR\infty}^{(3)}$ трехфазного КЗ на шинах 0,4 кВ $I_{кR\min}^{(2)}$, рассчитанном с учетом переходных сопротивлений и электрической дуги ($R_{\Pi} = 15$ мОм):

$$k_{\text{ч}R}^{(3)} = I_{кR\infty}^{(3)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,5. \quad (\text{П. 5})$$

1.3. Ток срабатывания грубого пускового органа МТЗ ($AI \gg$) выбирается наибольшим из условий (П. 2) и (П. 3), а также из условий несрабатывания защиты при пуске и самозапуске электродвигателей:

$$I_{\text{ср.з}} \geq k_{\text{н}} k_{\text{сзп}} I_{\text{раб max}} / k_{\text{в}}, \quad (\text{П.6})$$

где $k_{\text{н}}$, $k_{\text{в}}$, $I_{\text{раб max}}$ принимаются, как и для выражения (П.2); $k_{\text{сзп}}$ — коэффициент самозапуска, учитывающий увеличение тока при самозапуске (пуске) электродвигателей по сравнению с $I_{\text{раб max}}$. При этом ток самозапуска определяется по выражению

$$I_{\text{сзп}} = k_{\text{сзп}} I_{\text{раб max}}. \quad (\text{П.7})$$

Коэффициент чувствительности этого пускового органа защиты проверяется следующим образом:

• при питании от трансформатора по условиям (П.8) и (П.9):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = I_{к\min}^{(2)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,5; \quad (\text{П.8})$$

$$k_{\text{ч}R}^{(2)} = I_{кR\min}^{(2)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,2, \quad (\text{П.9})$$

где $I_{к\min}^{(2)}$ — ток двухфазного металлического КЗ на шинах 0,4 кВ при минимальном режиме питающей энергосистемы;

• при питании от генератора по условиям (П.10) и (П.11):

$$k_{\text{ч}\infty}^{(3)} = I_{к\infty}^{(3)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,5; \quad (\text{П.10})$$

$$k_{\text{ч}R\infty}^{(3)} = I_{кR\infty}^{(3)} / I_{\text{ср.з}} \geq 1,2, \quad (\text{П.11})$$

где $I_{к\infty}^{(3)}$ — установившееся значение тока трехфазного металлического КЗ на шинах 0,4 кВ.

1.4. Выдержка времени после срабатывания грубого или точного пускового органа защиты. С первой выдержкой времени ($TI \gg$) МТЗ действует на отключение секционного выключателя. Она принимается из условий селективности по времени с отсечками выключателей отходящих линий 0,4 кВ:

$$t_{\text{ср1}} = t_{\text{ср.0}} + \Delta t, \quad (\text{П.12})$$

где $t_{\text{ср.0}}$ — наибольшее время срабатывания отсечек автоматических выключателей отходящих линий 0,4 кВ; Δt — ступень селективности, принимаемая 0,3 — 0,4 с.

Со второй выдержкой времени ($T2 \gg$) МТЗ действует на отключение выключателя ввода от трансформатора (генератора). Она выбирается на ступень селективности больше, чем на отключение секционного выключателя:

$$t_{\text{ср}2} = t_{\text{ср}1} + \Delta t. \quad (\text{П.13})$$

1.5. Вторая ступень МТЗ (обозначается $I >$) является защитой от перегрузки и может иметь зависимую или независимую от тока характеристику. Работа зависимой от тока характеристики МТЗ описывается уравнением

$$t_{\text{ср.з}} = \{13,5/[I/I_{\text{ср.з}} - 1]\}[T/1,5], \quad (\text{П.14})$$

где $t_{\text{ср.з}}$ — время срабатывания защиты; $I/I_{\text{ср.з}}$ — отношение тока, протекающего через защиту, к значению уставки тока срабатывания; T — уставка времени срабатывания защиты на независимой части характеристики.

Защита действует на отключение выключателя ввода трансформатора (генератора) или на сигнал.

Ток срабатывания защиты выбирают из выражения (П.2), в котором значение $k_{\text{н}}$ принимают 1,05 — 1,1.

Время срабатывания защиты выбирается из условия отстройки от длительности самозапуска (пуска) электродвигателей $t_{\text{сзп}}$:

- для независимой характеристики (обозначение уставки по времени $T >$)

$$t_{\text{ср.з}} \geq (1,3 + 1,5)t_{\text{сзп}}; \quad (\text{П.15})$$

- для зависимой характеристики время срабатывания задается при кратности тока в реле $I_{\text{р}} = 10 I_{\text{ср.з}}$ (обозначение уставки времени на дисплее реле — T_x).

Подбирается такая характеристика реле, при которой обеспечивается условие (П.15) при токе реле $I_{\text{р}} = I_{\text{сзп}} = k_{\text{сзп}} I_{\text{раб max}}$. Уставку по времени T_x при токе $I_{\text{р}} = 10 I_{\text{ср.з}}$ можно определить непосредственно по уравнению (П.16) по известным значениям $I_{\text{сзп}}$ и $t_{\text{ср.з}} \approx 1,5t_{\text{сзп}}$:

$$T_x = \{1,5t_{\text{сзп}} [(I_{\text{сзп}}/I_{\text{ср.з}}) - 1]\}/9. \quad (\text{П.16})$$

2. Защита от КЗ на землю

2.1. На дисплее защита обозначается ТЗНП, обозначение уставки — $3I_{\text{р}}$. Ток срабатывания защиты выбирают по согласованию с защитами отходящих линий.

Если эти линии оборудованы специальными защитами от замыкания на землю, то ток срабатывания реле принимают:

$$I_{\text{ср.з}} \geq k_{\text{н.с}} I_{\text{ср.з}033\text{л}}, \quad (\text{П.17})$$

где $I_{\text{ср.з}033\text{л}}$ — наибольший из токов срабатывания защит от однофазных замыканий отходящих линий; $k_{\text{н.с}}$ — коэффициент надежности согласования, принимается 1,2 — 1,3.

Если эти линии не оборудованы специальными защитами от КЗ на землю, то ток срабатывания защиты выбирают по согласованию с наибольшим

из токов срабатывания отсечек $I_{\text{ср.о}}$ автоматических выключателей этих линий:

$$I_{\text{ср.з}} \geq k_{\text{н.с}} I_{\text{ср.о}} \quad (\text{П.18})$$

2.2. Выдержка времени определяется по выражениям (П.19) и (П.20):

- на отключение секционного выключателя:

$$t_{\text{ср.з1}} \geq t_{\text{ср.з.л}} + \Delta t, \quad (\text{П.19})$$

где $t_{\text{ср.з.л}}$ — наибольшее время срабатывания защиты от ОЗЗ или отсечки отходящих линий; Δt — ступень селективности, принимается 0,3 — 0,4 с;

- на отключение выключателя ввода от трансформатора (генератора) (T_{02}):

$$t_{\text{ср.з2}} = t_{\text{ср.з1}} + \Delta t. \quad (\text{П.20})$$

3. Дальнее резервирование отказов защит и выключателей отходящих линий

Обозначение на дисплее — ДР. Защита вводится в работу программными ключами S33, S34 и требует ввода следующих уставок:

- 1) номинальный ток источника питания (трансформатора, генератора)

$$I_{\text{ном}} \quad (\text{П.21})$$

- 2) уставка блокировки дальнего резервирования при включении активной статической нагрузки:

$$I_{\text{бл}} \geq k_{\text{н}} I_{\text{ст.н}}, \quad (\text{П.22})$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимается 1,2 — 1,3; $I_{\text{ст.н}}$ — максимально возможная активная статическая нагрузка (недвижительная) подстанции, включаемая одновременно в нормальном режиме или после перерыва питания. При отсутствии статической нагрузки $I_{\text{бл}}$ принимается равным $0,2I_{\text{ном.т}}$ ($0,2I_{\text{г}}$);

- 3) уставка согласования (ток согласования $I_{\text{с}}$) по чувствительности с автоматическими выключателями линий 0,4 кВ, установленных в конце зоны резервирования (обозначение $I_{\text{др}}$):

$$I_{\text{др}} = I_{\text{с}} \geq k_{\text{н.с}} I_{\text{ср.о.в}}, \quad (\text{П.23})$$

где $k_{\text{н.с}}$ — коэффициент надежности согласования, принимается 1,2; $I_{\text{ср.о.в}}$ — ток срабатывания отсечки автоматического выключателя, с защитой которого производится согласование.

Согласование производится без учета нагрузки, так как по принципу работы (на приращении токов) она учитывается автоматически. При выборе значений $I_{\text{с}}$ следует учитывать конкретную конфигурацию сети. Рекомендуется выполнять согласование с автоматическими выключателями линий, отходящими от вторичных сборок 0,4 кВ (а не с выключателями линий главного щита 0,4 кВ). При этом имеется в виду, что отсечки выключателей ли-

Таблица П.8. Ориентировочная протяженность зон резервирования для кабелей с алюминиевыми жилами при трехфазном металлическом КЗ

| Сечение, мм ² | $R_{уд}$, мОм/м | $X_{уд}$, мОм/м | $I_{доп}$, кА | Наибольшая из уставок $I_{бл}$ или $I_{др}$, кА | | | | | L , м |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--|------|------|------|------|---------|
| | | | | 0,30 | 0,60 | 0,90 | 1,20 | 1,50 | |
| 35 | 0,868 | 0,068 | 0,140 | 520 | 300 | 210 | 160 | 130 | 224 |
| 50 | 0,641 | 0,066 | 0,175 | 660 | 390 | 280 | 220 | 180 | 239 |
| 70 | 0,443 | 0,065 | 0,210 | 890 | 540 | 390 | 300 | 250 | 280 |
| 95 | 0,320 | 0,064 | 0,255 | 1120 | 700 | 510 | 400 | 330 | 308 |
| 120 | 0,253 | 0,064 | 0,295 | 1300 | 840 | 620 | 490 | 400 | 325 |
| 150 | 0,206 | 0,063 | 0,335 | 1460 | 960 | 720 | 570 | 470 | 340 |
| 185 | 0,164 | 0,063 | 0,385 | 1640 | 1100 | 830 | 670 | 550 | 355 |
| 240 | 0,125 | 0,055 | 0,465 | 1850 | 1300 | 990 | 800 | 680 | 373 |

Таблица П.9. Ориентировочная протяженность зон резервирования для кабелей с медными жилами при трехфазном металлическом КЗ

| Сечение, мм ² | $R_{уд}$, мОм/м | $X_{уд}$, мОм/м | $I_{доп}$, кА | Наибольшая из уставок $I_{бл}$ или $I_{др}$, кА | | | | | L , м |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--|------|------|------|------|---------|
| | | | | 0,30 | 0,60 | 0,90 | 1,20 | 1,50 | |
| 35 | 0,511 | 0,068 | 0,180 | 810 | 490 | 350 | 270 | 220 | 285 |
| 50 | 0,377 | 0,066 | 0,225 | 1010 | 620 | 450 | 350 | 290 | 301 |
| 70 | 0,261 | 0,065 | 0,275 | 1300 | 830 | 610 | 480 | 400 | 339 |
| 95 | 0,188 | 0,064 | 0,330 | 1580 | 1040 | 770 | 610 | 510 | 370 |
| 120 | 0,149 | 0,064 | 0,385 | 1750 | 1180 | 890 | 710 | 590 | 381 |
| 150 | 0,121 | 0,063 | 0,435 | 1640 | 1290 | 980 | 790 | 660 | 394 |
| 185 | 0,096 | 0,063 | 0,500 | 1160 | 1160 | 1050 | 860 | 727 | 402 |
| 240 | 0,074 | 0,055 | 0,605 | 830 | 830 | 830 | 830 | 830 | 416 |

Примечание. $R_{уд}$, $X_{уд}$ — удельные сопротивления кабелей; $I_{доп}$ — допустимая нагрузка кабелей; L — допустимая длина кабелей по условию падения напряжения.

ний, отходящих от щита 0,4 кВ, должны иметь достаточную чувствительность при дуговых КЗ в конце защищаемых линий. В ряде случаев можно принимать значение I_c , исходя из желаемой зоны резервирования, по данным табл. П.8 и П.9 с учетом § 3.27 ПУЭ (изд. 1998 г.);

4) уставка допустимого небаланса по току обратной последовательности в нулевом проводе понижающего трансформатора при несимметричной нагрузке:

• для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/Y_0 допустимый ток небаланса составляет $0,25I_{ном.т}$. При этом уставка по допустимому току небаланса обратной последовательности (обозначается по шкале I_2):

$$I_2 = I_{2\text{нб.доп}} = 0,25k_{\text{н}} I_{\text{ном.т}}/3, \quad (\text{П.24})$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимается 1,1 — 1,2.

Для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Δ/Y_0 допустимый ток небаланса составляет $0,75I_{\text{ном.т}}$ при этом уставка

$$I_2 = I_{2\text{нб.доп}} = 0,75 k_{\text{н}} I_{\text{ном.т}}/3. \quad (\text{П.25})$$

Для генераторов 0,4 кВ, включенных по схеме с глухозаземленной нейтралью, допустимый ток небаланса принимают в соответствии с ТУ на генератор. При отсутствии точных данных его можно определить следующим образом:

$$I_2 = I_{2\text{нб.доп}} = 0,2k_{\text{н}} I_{\text{ном.т}}/3; \quad (\text{П.26})$$

5) выдержки времени дальнего резервирования ($T_{\text{др1}}$, $T_{\text{др2}}$) на отключение секционного и вводного выключателей принимают на ступень селективности выше времени срабатывания МТЗ:

- на отключение секционного выключателя ($T_{\text{др1}}$):

$$t_{\text{ср.з1}} = t_{\text{ср.МТЗс.в}} + \Delta t, \quad (\text{П.27})$$

где

$$t_{\text{ср.МТЗс.в}} = T1 \gg;$$

- на отключение вводного выключателя ($T_{\text{др2}}$):

$$t_{\text{ср.з2}} = t_{\text{ср.МТЗс.в}} + \Delta t, \quad (\text{П.28})$$

где $t_{\text{ср.МТЗс.в}} = T2 \gg$.

4. Блокировка МТЗ при пуске и самозапуске двигателей

Работает только при введенной функции блокировки МТЗ. Для правильной работы блокировки МТЗ должны быть введены уставки, приведенные в табл. П.8.

Уставка срабатывания чувствительного пускового органа МТЗ первой ступени $B1 \gg$ по току определяется согласно п. 1.2 по выражениям (П.2), (П.3).

Уставка допустимого небаланса по току обратной последовательности определяется согласно п.3, по выражениям (П.24) — (П.26).

Эффективность дальнего резервирования можно оценить по табл. П.8 и П.9.

5. Резервная защита с зависимой характеристикой

Обозначение защиты — ЗДР. Защита вводится в работу программными ключами $\mathcal{L}35$, $\mathcal{L}36$. Эту функцию рекомендуется использовать, если токовая отсечка автоматического выключателя отходящих шин 0,4 кВ линий не охватывает всю длину линии, а последний участок линии защищен защитой с зависимой от тока характеристикой.

Характеристика защиты определяется из уравнения (П.15).

Ток срабатывания (обозначается на дисплее I_3) выбирается из условий согласования с зависимой характеристикой автоматического выключателя отходящей от шин 0,4 кВ линии, имеющего наибольший номинальный ток, без учета нагрузки, поскольку эта защита реагирует на приращение тока:

$$I_{\text{ср.з}} \geq k_{\text{н.с}} I_{\text{ср.пер}}, \quad (\text{П.29})$$

где $I_{\text{ср.пер}}$ — ток срабатывания защиты от перегрузки автоматического выключателя, с защитой которого производится согласование; $k_{\text{н.с}}$ — коэффициент надежности согласования, принимается $k_{\text{н.с}} = 1,2 \div 1,3$.

Время срабатывания $t_{\text{ср.з}}$ (обозначается на дисплее $T_{\text{здр}}$) задается при десятикратном токе I_3 . При этом подбирают такую защитную характеристику ЗДР, которая была бы селективна с защитой от перегрузки автоматического выключателя отходящей линии во всем диапазоне токов КЗ:

- для автоматического выключателя отходящей линии с регулируемой защитной характеристикой — значение тока, при котором задается уставка по времени срабатывания защиты от перегрузки этого выключателя;
- для автоматического выключателя отходящей линии с нерегулируемой защитной характеристикой — значение тока срабатывания электромагнитной отсечки.

Далее по защитной характеристике автоматического выключателя отходящей линии определяется время срабатывания его защиты от перегрузки $t_{\text{ср.з.л}}$. Время согласования ЗДР при токе срабатывания должно составить:

$$t_{\text{с}} = t_{\text{ср.з.л}} + \Delta t, \quad (\text{П.30})$$

где Δt — степень селективности, принимаемая в зависимости от разбросов зависимой характеристики защиты отходящей линии в пределах 2 — 10 с.

Уставку по времени ЗДР можно определить непосредственно по уравнению (П.31), полученному из (П.13), по известным значениям $I_{\text{с}}/I_{\text{ср.з}}$ и $t_{\text{с}}$:

$$t_{\text{ср.з}} = T_{\text{здр}} = \{t_{\text{с}}[I_{\text{с}}/I_{\text{ср.з}}] - 1\}/9. \quad (\text{П.31})$$

Защита ЗДР действует с выдержкой времени $T_{\text{здр}}$ на отключение секционного выключателя и с выдержкой времени $T_{\text{здр}} + (T_{\text{др2}} - T_{\text{др1}})$ на отключение выключателя ввода. Поэтому для обеспечения ее действия на выключатель ввода должны быть введены уставки $T_{\text{др}}$ и $T_{\text{др2}}$ независимо от того, введена ли функция ДР.

После выбора уставок на карте селективности строится характеристика защиты автоматического выключателя отходящей линии и резервной защиты, по которым окончательно проверяются условия селективности при всех возможных значениях тока.

Список литературы

1. **Правила устройства электроустановок.** — 7-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. **Автоматические выключатели и выключатели нагрузки низкого напряжения:** Каталог. (Compact Merlin Gerin 80 — 1250 A), Schneider Electric, 2003.
3. **Александров А. М.** Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ: Методические указания с примерами. — 6-е изд., перераб. и доп. — СПб.: ПЭИПК, 2003.
4. **Александров А. М.** Дифференциальные защиты трансформаторов: Учеб. пособие. — СПб.: ПЭИПК, 2002.
5. **Баптиданов Л. Н., Тарасов В. И.** Электрооборудование электрических станций и подстанций. В 3 т. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953.
6. **Беляев А. В.** Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.
7. **Беляев А. В., Эдлин М. А.** Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кВ // Электрические станции. 2002. № 12.
8. **Брынский Е. А., Преснов Ю. Л.** Неисправности асинхронных электродвигателей и их диагностика: Учеб. пособие. — СПб.: Из-во СПбГТУ, 1999.
9. **Бульчев А. В., Ванин В. К.** Релейная защита электроэнергетических систем. Защита электродвигателей: Учеб. пособие. — СПб.: Из-во СПбГТУ, 1997.
10. **Важнов А. И.** Электрические машины. — Л.: Энергия, 1969.
11. **Зильберман В. А.** Релейная защита сети собственных нужд атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
12. **Зимин Е. Н.** Защита асинхронных двигателей до 500 В. — Л.: Энергия, 1967.
13. **Киреева Э. А., Орлов В. В., Старкова Л. Е.** Электроснабжение цехов промышленных предприятий. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, приложение к журн. “Энергетик”. 2003. Вып. 12 (60).
14. **Коваленский И. В.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1000 В. — М.: Энергия, 1977.

15. **Асинхронные двигатели серии 4А:** Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — СПб.: ООО “Бурса”, 2002.
16. **Курбангалиев У. К.** Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, приложение к журн. “Энергетик”. 2001. Вып. 1 (25).
17. **Микроконтроллерный блок защиты и диагностики электродвигателя напряжением 0,4 кВ (МКЗид-0,4 кВ):** Техн. описание и инструкция по эксплуатации. — Новосибирск, 2001.
18. **Небрат И. Л.** Расчет токов КЗ в сетях 0,4 кВ: Учеб. пособие. — 5-е изд. — СПб: ПЭИПК, 2003.
19. **Старшинов В. А.** Электрооборудование атомных электростанций. — М.: Высш. шк., 1988.
20. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.
21. **Электрическая часть электростанций:** Учеб. для вузов / С. В. Усов, Б. Н. Михалев, А. К. Черновец, Е. Н. и др.; Под ред. С. В. Усова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
22. **Федосеев А. М.** Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.
23. **Чернобровов Н. В., Семенов В. А.** Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
24. **Шабад М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: ПЭИПК, 2003.
25. **Электротехнический справочник.** В 3 т. Т 3. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. проф. МЭИ И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. — 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
26. **Ясвен П.** Отечественная НВА. Существует ли перспектива развития? // Новости электротехники. 2003. № 4 (22).

Содержание

| | |
|---|----|
| Предисловие | 3 |
| ГЛАВА ПЕРВАЯ. Основные характеристики асинхронных электрических двигателей | 6 |
| ГЛАВА ВТОРАЯ. Требования, предъявляемые к устройствам защиты электрических двигателей с напряжением питания 0,4 кВ | 23 |
| ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Защита электрических двигателей плавкими предохранителями | 37 |
| ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Защита асинхронных двигателей автоматическими выключателями | 43 |
| ГЛАВА ПЯТАЯ. Защита электродвигателей от коротких замыканий вторичными электрохимическими реле косвенного действия | 53 |
| ГЛАВА ШЕСТАЯ. Устройства контроля сопротивления заземления корпуса электродвигателя | 58 |
| ГЛАВА СЕДЬМАЯ. Предпусковой контроль сопротивления изоляции электрических двигателей | 61 |
| ГЛАВА ВОСЬМАЯ. Микроэлектронные и микропроцессорные защиты электродвигателей | 64 |
| ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. Принципы выполнения релейной защиты трансформаторов собственных нужд ТСН-6,3/0,4 кВ (10/0,4 кВ) и кабельных сетей 0,4 кВ | 66 |
| <i>Приложение</i> | 76 |
| Список литературы | 93 |

2432

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

СОЛОВЬЕВ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ

Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (495) 675-19-06, тел. 675-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Научный редактор **А. М. Александрова**

Редакторы: **Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская**

Худож.-техн. редактор **Т. Ю. Андреева**

Корректор **Е. П. Севостьянова**

Сдано в набор 16.02.07. Подписано в печать 27.03.07.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 6,0. Заказ БЭТ/03(99)-2007

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал “Энергетика за рубежом”

— приложение к журналу “Энергетик”

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу “Энергетик” — **“Энергетика за рубежом”**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал “Энергетика за рубежом” знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы журнала “Энергетика за рубежом”

— приложения к журналу “Энергетик”

87261 — для предприятий и организаций;

87260 — для индивидуальных подписчиков.

88983

Куртс

Об авторе



Соловьев Александр Леонидович — выпускник Пензенского политехнического института (университета), канд. техн. наук, доцент.

А. Л. Соловьев — автор 10 изобретений и 40 публикаций, среди которых брошюры: “Методические указания по выбору характеристик и установок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов серии SEPAM производства Шнейдер Электрик” (2005 г.), “Защита генераторов малой и средней мощности терминалами Сириус-ГС” (2006 г.), выпускаемые издательством ПЭИПК. В настоящее время и.о. зав. кафедрой “Релейная защита и автоматика электрических станций, сетей и энергосистем” Петербургского энергетического института повышения квалификации Минпромэнерго РФ.

Брошюра окажет помощь специалистам, занимающимся вопросами защиты и эксплуатации электродвигателей напряжением до 1 кВ