

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 1 (169)

О. Г. Захаров

**ЦИФРОВЫЕ
УСТРОЙСТВА
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.
АЛГОРИТМЫ
И УСТАВКИ**

Часть 2

Москва
НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»
2013

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

И. И. Батюк (*зам. председателя*), К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев, Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджикибаев

О. Г. Захаров

3 38 Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей. Алгоритмы и уставки (Часть 2). — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. — 82 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 1 (169)].

Рассмотрены цифровые устройства РЗ различных производителей и приведены описания используемых алгоритмов.

Приведены требования к РЗ электродвигателей, установленные в «Правилах устройства электроустановок», а также примеры расчетов и рекомендации по выбору уставок защиты для разных цифровых устройств.

Приведена информация по международным кодам ANSI алгоритмов защиты, применяемых для электродвигателей, и обширный систематизированный список литературы по цифровым устройствам, расчету уставок, а также нормативных документов.

Предназначено для специалистов, занимающихся настройкой и эксплуатацией цифровых устройств релейной защиты.

Предисловие

Для современного этапа развития энергетической отрасли России характерно широкое внедрение цифровых устройств защиты электродвигателей напряжением от 0,4 до 10 кВ.

Практически каждое предприятие, выпускающее цифровые устройства релейной защиты, предлагает ряд исполнения устройств, предназначенных для защиты асинхронных и асинхронных электродвигателей.

В этих устройствах предусмотрены как алгоритмы защиты от аварийных режимов, возникающих при работе любого электрического оборудования, так и специальные алгоритмы технологических защит, используемых в электроприводах.

В предлагаемой брошюре приведены систематизированные сведения об алгоритмах, обеспечивающих защиту электродвигателей и приводимых ими механизмов, и методики расчета уставок для этих алгоритмов.

Примеры расчета уставок, использованные в данной брошюре, основаны на материалах стандарта организации [40] и статьях [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52].

В брошюре приведены результаты исследований цифровых устройств БМРЗ-Д на физической модели [6], выполненные совместно со специалистами Вологодского государственного технического университета, а также использованы результаты работ, выполненных совместно с И. С. Фрейцисом [11, 12] на стендах ЦНИИ СЭТ.

Автор благодарит всех, кто любезно предоставил материалы по цифровым устройствам и ответил на возникшие у него при подготовке рукописи вопросы, и выражает особую признательность И. И. Батюку, поддержавшему идею издания брошюры.

Автор будет признателен всем, кто сочтет возможным поделиться своим мнением о данной брошюре (E-mail: olegzaharov@yandex.ru).

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

Алгоритмы защиты от замыканий на землю

Алгоритмы релейной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6 – 10 кВ реагирует на составляющие тока, напряжения, и (или) мощности нулевой последовательности I_0 , U_0 [22].

Для контроля тока I_0 в схемах защиты используют специальные трансформаторы тока нулевой последовательности — ТТНП (ТТНП1 – ТТНП4 на рис. 4.1).

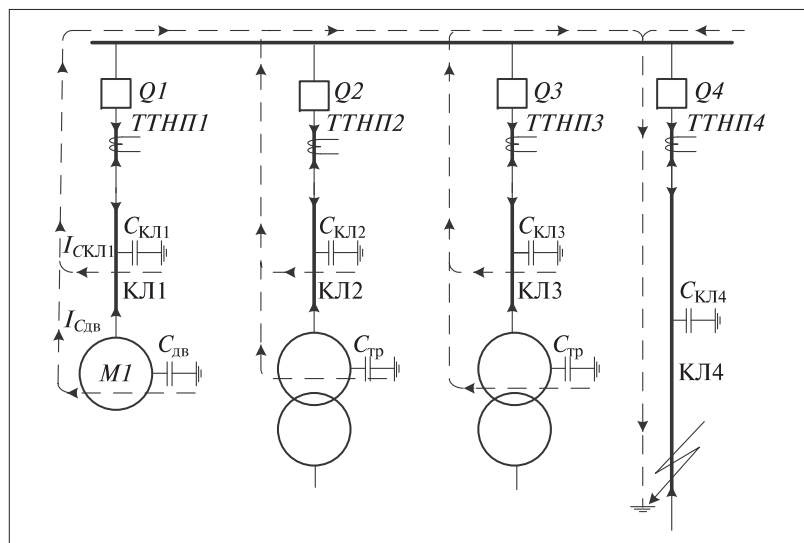


Рис. 4.1. Фрагмент схемы сети с изолированной нейтралью

Трансформаторы ТТНП устанавливают либо в ячейке распределительного устройства, либо у выводов электродвигателя.

Пусть в кабельной линии $КЛ4$ возникло однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). После окончания переходного процесса, связанного с перезарядом емкостей сети $C_{КЛ1} - C_{КЛ4}$, двигателя $C_{дв}$ и трансформаторов $C_{тр}$, весь суммарный емкостный ток $I_{C\Sigma}$ двух неповрежденных фаз этой сети будет протекать через точку ОЗЗ.

Через другие присоединения сети, где замыкания отсутствуют, будет протекать свой емкостный ток защищаемых присоединений, направленный в точку ОЗЗ. Поэтому для исключения ложных срабатываний необходимо выбирать значение уставки срабатывания защиты, таким, чтобы оно превышало собственный емкостной ток защищаемого присоединения.

Согласно требованиям ПУЭ в сети с изолированной нейтралью суммарный емкостной ток $I_{C\Sigma}$ (иногда в технической литературе можно встретить другой термин — *остаточный ток*) не должен превышать:

- 30 А — при напряжении сети 6 кВ;
- 20 А — при напряжении сети 10 кВ.

В электроустановках с компенсирующими устройствами защиты от ОЗЗ предусматривают в тех случаях, когда в нормальных условиях работы суммарный емкостной ток $I_{C\Sigma}$ превышает 10 А.

Применение тех или иных алгоритмов защиты от ОЗЗ в ПУЭ связано с наличием или отсутствием устройств компенсации в распределительной сети. Например, при мощности электродвигателя, не превышающей 2 МВт, и отсутствии устройств компенсации данную защиту предусматривают при токах замыкания на землю, равных или превышающих 10 А. Для электродвигателей мощностью более 2 МВт такая защита должна предусматриваться при токах замыкания на землю, равных или превышающих 5 А.

Защита от ОЗЗ должна действовать на отключение асинхронного электродвигателя. В схеме защиты синхронного электродвигателя алгоритм защиты от ОЗЗ должен одновременно формировать сигнал на автомат гашения поля (АГП) при его наличии (см. табл. 1.4, 1.5, ч. 1).

В зависимости от значения суммарного тока $I_{C\Sigma}$ защита от ОЗЗ может действовать на сигнализацию (при токах меньших, чем установленные в ПУЭ) или на отключение защищаемого электродвигателя.

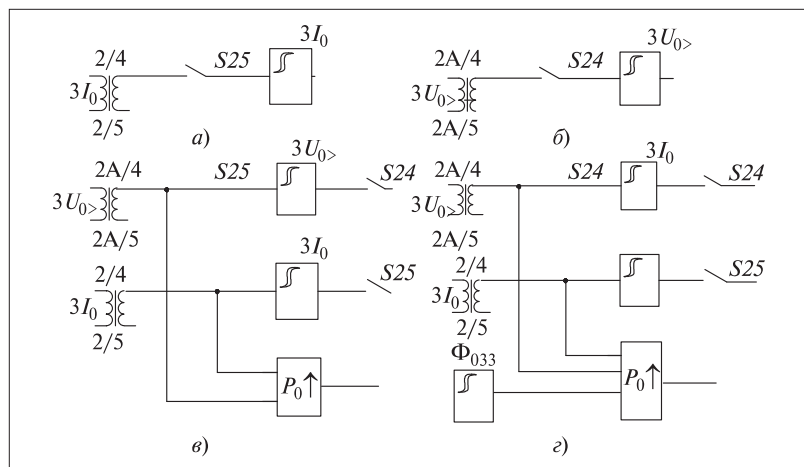


Рис. 4.2. Аналоговые входы в блоках БМРЗ для алгоритмов ОЗЗ

Если схема управления электродвигателем не требует замедления действия защиты, то защиту от ОЗЗ выполняют без выдержки времени. При введении выдержки времени в защиту от ОЗЗ рекомендуется применять токовую защиту (токовое реле) с током срабатывания от 50 до 200 А (первичные значения) для быстрого отключения электродвигателя при возникновении двойных замыканий на землю.

Задержку по времени срабатывания защиты от ОЗЗ рекомендуется устанавливать нулевой. При необходимости отстройки от переходных процессов выдержка времени защиты может быть задана равной 0,1 с. При увеличении выдержки срабатывания рекомендуется применять двухступенчатую защиту от ОЗЗ, в которой вторая ступень работает без выдержки времени.

В блоках серий БМРЗ и БМРЗ-100 [56, 37] защиты от ОЗЗ могут быть выполнены одно- или двухступенчатыми с контролем:

- тока нулевой последовательности (рис. 4.2, а);
- напряжения нулевой последовательности (рис. 4.2, б);
- направления мощности нулевой последовательности (рис. 4.2, в).

Диаграмма направленности ОЗЗ может изменяться с помощью специального элемента Φ_{033} (рис. 4.2, з).

Измерения напряжения, тока и направления мощности нулевой последовательности обычно выполняют по первой гармонической составляющей сигнала.

В некоторых устройствах [75] для алгоритма защиты от ОЗЗ использовано значение тока высших гармоник, но уставку срабатывания нужно задавать во вторичных значениях тока $3I_0$. При расчете уставки следует иметь в виду, что сумма токов высших гармоник не превышает 5 % тока первой гармоники.

В некоторых исполнениях устройств БМРЗ предусмотрено измерение высших гармоник тока $3I_{0в.г}$ в диапазоне частот от 150 до 650 Гц, причем текущее значение этого тока можно увидеть на дисплее блока или на мониторе компьютера, что помогает при выявлении поврежденного фидера.

Пример 4.1. *Рассмотрим расчет ненаправленной защиты от замыканий на землю для асинхронного двигателя серии А4, работающего в сети с изолированной нейтралью.*

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

В схеме применен трансформатор типа ТЗР, имеющий коэффициент трансформации $k_I = 1/18$ (см. приложение).

Уставку срабатывания защиты электродвигателя от ОЗЗ по току нулевой последовательности, А, определяют по соотношению:

$$3I_{0>} = \frac{k_{отс}}{k_{воз}} k_{бр} (I_{С.дв} + I_{С.кл}), \quad (4.1)$$

где $k_{отс} = 1,2$ — коэффициент отстройки защиты от ОЗЗ для блоков БМРЗ (для электромеханических реле коэффициент отстройки защиты $k_{отс} = 1,3$); $k_{в} = 0,95$ — коэффициент возврата защит для блоков БМРЗ; $k_{бр}$ — коэффициент броска емкостного тока, обусловленного перезарядом емкостей электрической сети при ОЗЗ; $I_{С.дв}$ — емкостный ток защищаемого электродвигателя, А; $I_{С.кл}$ — емкостный ток кабельной линии, соединяющий электродвигатель с ячейкой, А.

Коэффициент $k_{бр}$, показывает ослабление броска аperiodической составляющей емкостного тока.

Для электромеханических и статических реле принимают $k_{бр} = 3 \div 5$, а для блоков БМРЗ — $k_{бр} = 2$.

Для оценки полученных результатов определим емкостный ток двигателя двумя способами.

Первый способ. Для определения емкостного тока первым способом нужно знать полную мощность электродвигателя $S_{\text{ном.дв}}$ и использовать одну из двух эмпирических формул, А:

- для асинхронного электродвигателя с номинальным напряжением 6 кВ:

$$I_{C,\text{дв}} \approx 0,017 S_{\text{ном.дв}}, \quad (4.2)$$

- для асинхронного электродвигателя с номинальным напряжением 10 кВ:

$$I_{C,\text{дв}} \approx 0,03 S_{\text{ном.дв}}, \quad (4.3)$$

В связи отсутствием в исходных данных для расчета информации о полной мощности электродвигателя, воспользуемся следующей формулой, МВ·А:

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\cos \varphi \cdot \eta}, \quad (4.4)$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ — номинальная мощность на валу электродвигателя, МВт; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; η — коэффициент полезного действия.

Подставив в формулу (4.4) исходные данные, найдем полную мощность электродвигателя:

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{0,63}{0,88 \cdot 0,952} = 0,752 \text{ МВ·А.}$$

Зная полную мощность и номинальное напряжение электродвигателя по формуле (4.2) можно найти его емкостный ток

$$I_{C,\text{дв}} \approx 0,017 \cdot 0,752 \approx 0,0128 \text{ А.}$$

Более точно емкостный ток электродвигателя, А, можно определить по формуле, приведенной в [18],

$$I_{C,\text{дв}} = 2\pi f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} C_{\text{дв}} U_{\text{ном.дв}}, \quad (4.5)$$

где $C_{\text{дв}}$ — электрическая емкость двигателя, Ф; $U_{\text{ном.дв}}$ — номинальное напряжение двигателя, В; $f_{\text{ном}}$ — номинальная частота питающей сети, Гц.

Электрическую емкость явнополюсных синхронных двигателей, Ф, находят по формуле

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{40^4 \sqrt{S_{\text{ном.дв}}^3} \cdot 10^{-6}}{3(U_{\text{ном.дв}} + 3600)^3 \sqrt{n}}, \quad (4.6)$$

где n — синхронная частота вращения двигателя, мин⁻¹.

Электрическую емкость неявнополюсных синхронных двигателей и асинхронных двигателей, Ф, вычисляют по формуле

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 S_{\text{ном.дв}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \sqrt{U_{\text{ном.дв}} (1 + 0,08 U_{\text{ном.дв}})}}. \quad (4.7)$$

Второй способ. Прежде чем найти емкостной ток двигателя по формуле (4,7) найдем электрическую емкость электродвигателя:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot 0,752 \cdot 10^{-6}}{1,2 \sqrt{6 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}} = 3,93 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Используя полученные расчетные значения можно по формуле (4.5) найти емкостный ток электродвигателя:

$$I_{C,\text{дв}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 3,93 \cdot 10^{-9} \cdot 6000}{1,73} \approx 0,01 \text{ А.}$$

Сравнивая результаты, вычислений $I_{C,\text{дв}}$ по первому и второму способам, видим, что они совпадают.

Согласно (4.1) в сети с изолированной нейтралью суммарный ток I_{Σ} состоит из двух составляющих — емкостного тока двигателя $I_{C,\text{дв}}$ и емкостного тока кабельной линии $I_{\text{скл}}$.

Первая составляющая уже найдена, поэтому можно продолжить расчет для определения значения $I_{\text{скл}}$.

Для кабелей с бумажной изоляцией точное значение $I_{\text{скл}}$, А, можно найти по табл. П.4. (см. приложение) [23] или определить по приближенной формуле, рекомендованной в этой же работе:

$$I_{C.кл} \approx \frac{U_{номКЛ} l}{10}, \quad (4.8)$$

где $U_{номКЛ}$ — номинальное линейное напряжение кабельной линии, кВ; l — длина кабельной линии, км.

Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена точное значение удельного емкостного тока необходимо запрашивать у завода изготовителя на каждую партию кабельной продукции.

Для продолжения расчета уставок определим емкостный ток кабельной линии, используя данные, приведенные в табл. П.4 (см. приложение), и формулу (4.8):

$$I_{C.кл} \approx 1,25 \cdot \frac{40}{1000} = 0,05 \text{ А.}$$

Знание емкостных токов линии и двигателя позволят определить параметр срабатывания защиты по току для алгоритма защиты от ОЗЗ.

После подстановки значений в формулу (4.1) получим:

$$3I_{0_с} = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,0128 + 0,05) \approx 0,159 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ по току нулевой последовательности

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{I_{O33\Sigma}^{(1)}}{3I_{0_с}}. \quad (4.9)$$

Значение $I_{O33\Sigma}^{(1)}$ (в данном примере дано в исходных данных для расчета. В сетях с резистивным заземлением нейтрали суммарное значение тока ОЗЗ, А, определяют по формуле

$$I_{O33 N \Sigma}^{(1)} = \sqrt{I_{CN \Sigma}^2 + I_R^2}, \quad (4.10)$$

где $I_{C\Sigma}$ — суммарный емкостный ток сети; I_R — активный ток, протекающий через резистор заземления нейтрали.

Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ по току нулевой последовательности находим по формуле (4.9):

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{1,4}{0,159} = 8,8.$$

Полученное значение коэффициента чувствительности превышает минимальное значение, установленное в ПЭУ и равное 1,5.

По формуле (4.2), было найдено первичное значение тока срабатывания, т. е. тока, протекающего в первичной обмотке ТТНП. Ток во вторичной обмотке ТТНП, к которой подключены входные цепи цифровых устройств защиты, А, определяем по формуле

$$3I_{0 \text{ втор}} \geq \frac{3I_0}{K_I} = \frac{0,159}{18} = 0,0088 \text{ А} \approx 0,01 \text{ А} \quad (4.11)$$

Значение коэффициента трансформации трансформатора тока нулевой последовательности типа ТЗР приведено в приложении и равно 1/18.

После подстановки значений в формулу (4.11) получим

$$3I_{0 \text{ втор}} \geq \frac{0,159}{18} = 0,0088 \text{ А} \approx 0,01 \text{ А.}$$

Для повышения стабильности срабатывания защиты принимаем выдержку времени первой ступени защиты от замыканий на землю равной 0,1 с (см. элемент А3 на рис. 4.3).

Пороговый элемент А1 срабатывает при достижении током $3I_0$ уставки Программный ключ S27 позволяет исключить данную ступень алгоритма защиты от ОЗЗ из работы, а ключ S28 исключает действие данной ступени на отключение или сигнализацию.

Рис. 4.3. Фрагмент алгоритма двухступенчатой защиты от ОЗЗ

В тех случаях, когда защита от ОЗЗ работает с выдержкой времени (для отстройки от переходных процессов), необходимо использовать защиту от двойных замыканий на землю, работающую без выдержки времени с уставкой, выбираемой из диапазона от 50 до 200 А [17].

Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от максимального тока небаланса, соответствующего пусковому току электродвигателя.

В сетях с резистивным заземлением нейтрали через высокоомный резистор токи обратной последовательности преобразуются в токи нулевой последовательности.

Параметр срабатывания защиты от двойных замыканий на землю по току, А, определяем по формуле

$$3I_{0>>} = k_{отс} k_{нес} I_{пуск.дв} = k_{отс} k_{нес} k_{пуск} I_{ном.дв}, \quad (4.12)$$

где $k_{отс} = 1,05$ — коэффициент отстройки; $k_{нес}$ — коэффициент несимметрии; для сетей с изолированной нейтралью $k_{нес} = 0,015$; для сетей с резистивным заземлением нейтрали $k_{нес} = 0,025$; $I_{пуск.дв}$ — пусковой ток электродвигателя, А; $k_{пуск}$ — коэффициент пуска; $I_{ном.дв}$ — номинальный ток электродвигателя, А.

В связи с введением выдержки времени необходимо произвести расчеты уставки срабатывания второй ступени защиты от ОЗЗ, обеспечивающей защиту от двойных замыканий на землю, по формуле (4.12). Для этого необходимо определить номинальный ток электродвигателя по формуле (2.1), используя исходные данные (см. приложение), приведенной в ч. 1:

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3}U_{ном.дв}\eta \cos \varphi} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,952 \cdot 0,88} \approx 72 \text{ А.}$$

Уставка срабатывания защиты от двойных замыканий на землю

$$3I_{0>>} = 1,05 \cdot 0,015 \cdot 5,5 \cdot 72 \approx 6,2 \text{ А.}$$

Полученный результат значительно меньше значений, рекомендованных ПЭУ, поэтому независимо от результата вычисления уставка должна быть выбрана из диапазона 50 – 100 А. Исходя из этого, принимаем $3I_{0>>} = 100 \text{ А}$.

Вторая ступень защиты (см. элемент А2 на рис. 4.3) от замыканий на землю (защита от двойных замыканий на землю) обычно работает без выдержки времени, т. е. $T_{озз} > = 0$.

Направленную защиту от ОЗЗ (см. рис. 4.2, в, г) обычно применяют:

- для обеспечения селективности действия защиты от ОЗЗ;
- для повышения чувствительности защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью.

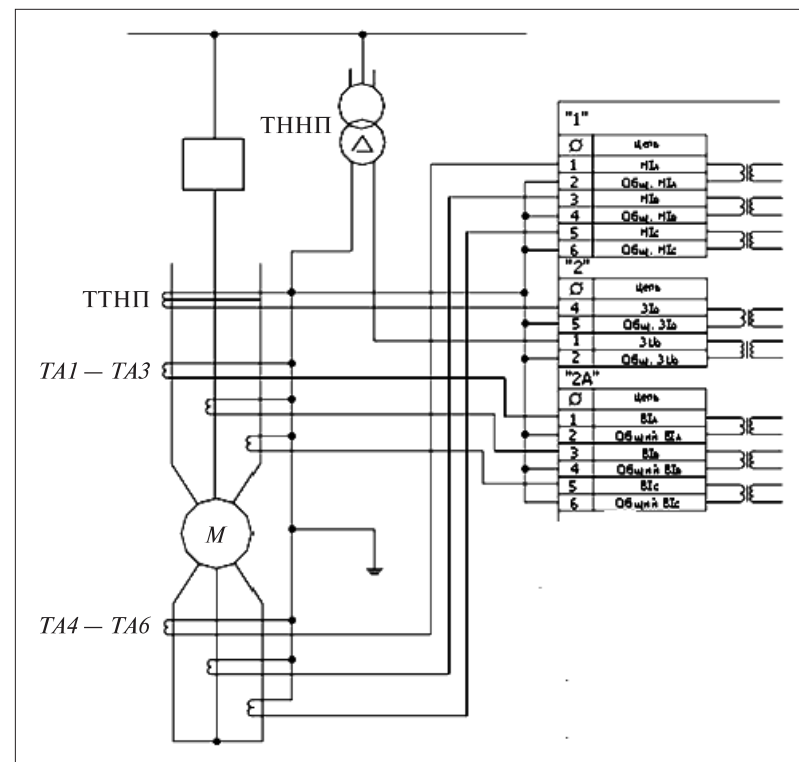


Рис. 4.4. Подключение трансформаторов тока и напряжения на аналоговые входы цифрового устройства БМРЗ

Для правильной работы алгоритма направленной защиты от ОЗЗ на соответствующие аналоговые входы цифрового устройства релейной защиты должны быть подключены вторичные обмотки ТТНП и трансформаторов напряжения нулевой последовательности (ТННП) (рис. 4.4).

В блоках «Сириус-Д», предусмотрена возможность получения сигнала $3U_0$ при отсутствии трансформатора напряжения нулевой последовательности расчетным путем по формуле (1.1), приведенной в ч. 1:

$$3U_0 = U_A + U_B + U_C.$$

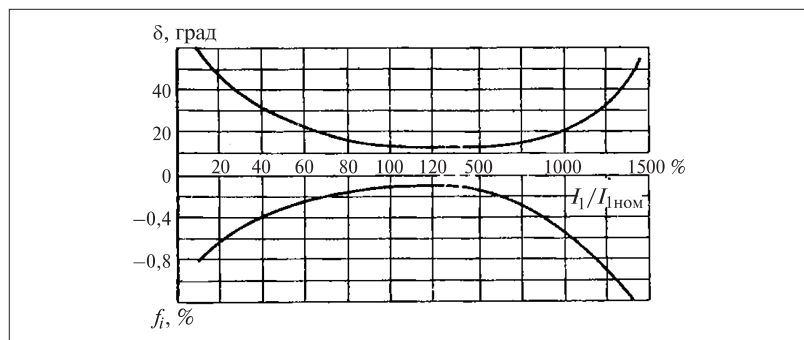


Рис. 4.5. Токовая f_i и угловая δ погрешности некомпенсированного ТТНП ($I_1/I_{ном}$ — кратность первичного тока к номинальному току ТТНП)

В сетях с точной компенсацией емкостных токов применение как направленных, так и ненаправленных защит от ОЗЗ вызывает известные затруднения [16].

Направленную защиту в сетях с изолированной нейтралью рекомендуется применять только в тех случаях, когда уставка срабатывания защиты от ОЗЗ $3I_0 >$ равна или больше суммарного значения тока ОЗЗ сети $I_{ОЗЗ}^{(1)}$.

Дополнительное условие для применения направленной защиты — суммарный ток ОЗЗ на защищаемом присоединении должен быть не менее 40 % номинального тока ТТНП, что обеспечивает угловую погрешность ТТНП менее 36° (рис. 4.5 [3]).

Из-за отсутствия информации об угловой погрешности ТТНП выполнение расчета направленной защиты от ОЗЗ может вызывать затруднения.

В большинстве цифровых устройств алгоритм направленной защиты от ОЗЗ обеспечивает селективное определение поврежденного фидера:

- при устойчивых металлических и дуговых однофазных замыканиях;
- при отсутствии перекомпенсации нейтрали;
- при заземлении нейтрали через резистор.

При перемежающихся и прерывистых дуговых замыканиях, а также при перекомпенсации нейтрали, селективность определения поврежденного фидера не обеспечивается.

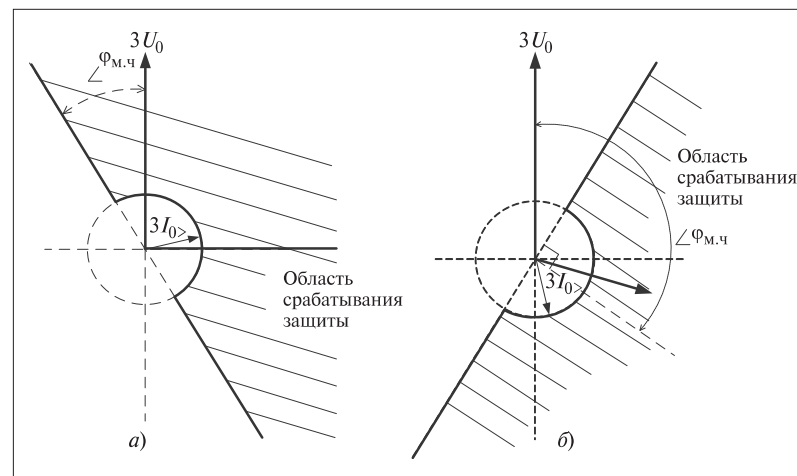


Рис. 4.6. Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с изолированной (а) и с заземленной через высокоомный резистор (б) нейтралью

Защиту рекомендуется выполнять с выдержкой времени 0,1 с, что позволяет отстроиться от переходных процессов, аналогичным процессам, возникающим при ОЗЗ.

В устройствах БМРЗ предусмотрена регулировка угла максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ (см. рис. 4.2, з).

Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{м.ч}$ равным -36° (рис. 4.6, а). В этом случае емкостный ток сети на поврежденном присоединении будет отставать от напряжения $3U_0$ на 90° , а смещение характеристики на указанный угол позволяет компенсировать возможные угловые погрешности трансформаторов тока нулевой последовательности.

Для сети с заземленной через высокоомный резистор нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{м.ч}$ равным $+45^\circ$. Это обусловлено тем, что вектор тока ОЗЗ находится в IV квадранте (рис. 4.6, б).

Направление мощности нулевой последовательности алгоритм защиты от ОЗЗ определяет при значении напряжения $3U_0$, равным некоторому минимальному значению. Например, для устройства «Сириус-Д» $3U_{0min} = 1$ В, а для устройства БМРЗ — $3U_{0min} = 0,5$ В.

При меньших значениях напряжения направление мощности не определяется и алгоритм направленной защиты не срабатывает. Поэтому в алгоритме защиты от ОЗЗ следует предусматривать переход из режима «направленная защита» в режим работы «ненаправленная защита» при повреждении измерительных цепей напряжения. В этом случае следует учитывать возможность неселективного действия защиты от ОЗЗ.

Расчет угла между вектором тока $3I_0$ и вектором напряжения $3U_0$ при ОЗЗ осуществляют по суммарному емкостному току ОЗЗ сети и номинальному сопротивлению резистора нейтрали по формуле

$$\varphi_{I, U_0} = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{I_R}{\sqrt{I_C^2 + I_R^2}}\right), \quad (4.13)$$

где I_R — активная составляющая тока ОЗЗ, А; I_C — емкостная составляющая тока ОЗЗ, А.

После определения угла рекомендуется проверить корректность работы реле направления мощности нулевой последовательности для поврежденного присоединения.

Пример 4.2. Расчет направленной защиты от замыканий на землю для синхронного электродвигателя СТД-6300-2, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

В исходных данных для расчета приведена емкость статорных обмоток этого электродвигателя, поэтому емкостный ток электродвигателя $I_{СДВ}$ находим по формуле (4.5):

$$I_{СДВ} = [2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3 \cdot (0,11/3) \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3] / 1,73 \approx 0,004 \text{ А.}$$

$$I_{СДВ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3 \cdot (0,11/3) \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3}{1,73} \approx 0,004 \text{ А.}$$

Данный электродвигатель подключен тремя кабелями с бумажной изоляцией, что позволяет в данном примере для определения емкостного тока кабельных линий применить формулу (4.8):

$$I_{С_{кл}} \approx 3 \cdot \frac{10 \cdot 0,1}{10} = 0,3 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ (первичные значения) находим по формуле (4.1):

$$3I_{0>} = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,004 + 0,3) = 0,768 \text{ А.}$$

В связи с тем, что ток срабатывания защиты от ОЗЗ $3I_{0>}$ оказался больше суммарного емкостного тока сети $I_{033\Sigma}^{(1)}$, заданного в исходных данных для расчета, необходимо применить направленную защиту от озз.

Зная $I_{033\Sigma}^{(1)}$, уставку срабатывания данной защиты $I_{с.3}$ выбираем такой, чтобы значение коэффициента чувствительности было не менее 1,5:

$$I_{с.3} < \frac{I_{033\Sigma}^{(1)}}{1,5}. \quad (4.14)$$

Произведя вычисления получим

$$I_{с.3} < \frac{0,5}{1,5} = 0,333 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания $I_{с.3} = 0,3 \text{ А.}$

Коэффициент чувствительности защиты от озз по току нулевой последовательности находим по формуле (4.9), используя рассчитанное значение $3I_0$ и приведенное в исходных данных для расчета значение $I_{033\Sigma}^{(1)}$:

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{0,5}{0,3} = 1,67.$$

Полученное значение коэффициента чувствительности превышает минимальное значение, установленное в ПЭУ.

Уставку срабатывания во вторичных значениях находим по формуле (4.11), учитывая, что в схеме использован трансформатор тока нулевой последовательности типа ТЗР (см. приложение, табл. П5):

$$3I_{0\text{втор}} \geq \frac{0,3}{18} = 0,00167 \approx 0,01 \text{ А.}$$

Для повышения стабильности срабатывания защиты принимаем выдержку времени первой ступени защиты от замыканий на землю равной 0,1 с. В связи с введением выдержки времени необходимо произвести расчеты уставки срабатывания второй ступени защиты от ооз, обеспечивающей защиту от двойных замыканий на землю, по формуле (4.12).

Выполнение расчетов по этой формуле требует знания номинального тока электродвигателя, определить который можно по формуле (2.1), приведенной в ч. 1, используя исходные данные (см. приложение):

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном.дв}}\eta \cos \varphi} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,975 \cdot 0,9} \approx 415 \text{ А.}$$

Для расчета уставки срабатывания защиты от двойных замыканий на землю воспользуемся формулой (4.12):

$$3I_{0>>} = 1,05 \cdot 0,025 \cdot 7 \cdot 415 \approx 76 \text{ А}$$

Полученный результат попадает в диапазон значений, рекомендованных в ПЭУ и равных 50 – 100 А.

Исходя из опыта применения такой защиты, принимаем $3I_{0>>} = 100 \text{ А}$.

Вторая ступень защиты от замыканий на землю (защита от двойных замыканий на землю) работает без выдержки времени.

В алгоритмах защиты от ооз в блоках БМРЗ могут быть предусмотрены выходные реле ооз (рис. 4.7), срабатывающие с выдержкой времени после формирования команды на отключение выключателя или включения сигнализации. Выдержка времени может быть постоянной или регулируемой.

В некоторых цифровых устройствах релейной защиты электродвигателей напряжением до 1000 В (см., например, [76, 77] вместо алгоритма защиты от ооз используют другие способы определения замыканий на землю, не требующие наличия трансформаторов тока и нулевой последовательности (см. ч. 1, рис. 1.12 и 1.14).

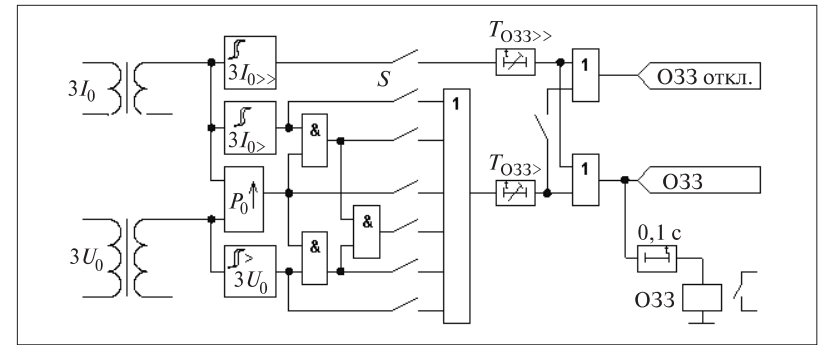


Рис. 4.7. Алгоритм защиты от ОЗЗ с дополнительным выходным реле

Перед пуском электродвигателя устройство РДЦ-03 производит измерение сопротивления изоляции обмоток электродвигателя, для чего вывод I_3 (контакт 1 соединителя ХТ1 на рис. 1.14, ч. 1) соединяют с одним из выводов обмоток электродвигателя, например с выводом, подключенным к контакту I_C^* .

Программой управления устройством предусмотрена подача тестового напряжения на вывод I_3 и измерения тока, протекающего через изоляцию обмоток под действием приложенного напряжения.

Если через обмотки протекает ток, не превышающий допустимого значения, то дается разрешение на включение электродвигателя. Уставка этой защиты задается в значениях сопротивления изоляции из диапазона от 0,2 до 1,0 МОм.

Во время работы электродвигателя программой работу устройства предусмотрено вычисление мгновенных значений токов всех фаз. При равенстве этой суммы нулю полагают, что токи утечки в фазах равны и замыкание одной или двух фаз на землю нет. Если же сумма мгновенных значений отлична от нуля и превышает уставку, то питание электродвигателя отключают.

Уставку по току утечки задают в процентах номинального тока электродвигателя, выбирая значение из диапазона от 5 до 10 % $I_{\text{ном}}$.

* На практике значение $I_{\text{ооз}}^{(1)}$ находят экспериментальным путём или по методике, описанной в [23].

ГЛАВА ПЯТАЯ

Алгоритмы защиты электродвигателей от перегрузки

В соответствии с требованиями ПУЭ защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях, перегрузка которых возможна:

- из-за технологических особенностей работы приводимого ими механизма;
- из-за особо тяжелых условий пуска и самозапуска (длительность прямого пуска непосредственно от сети не менее 20 с);
- из-за чрезмерного увеличения продолжительности пуска при понижении напряжения в сети.

На электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, вызванным особенностью работы приводимого им механизма, защита, как правило, должна действовать на сигнал и обеспечивать автоматическую разгрузку механизма.

Защита от перегрузки может действовать на отключение электродвигателя:

- при невозможности его своевременной разгрузки без останова;
- при отсутствии постоянного обслуживающего персонала;
- при тяжелых условиях запуска и самозапуска.

На электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту, действующую на сигнал и отключение электродвигателя при повышении температуры или прекращении действия вентиляции.

Согласно требованиям ПУЭ, для защиты электродвигателей от перегрузки следует предусматривать контроль тока в одной фазе.

Защита должна иметь зависимую или независимую от тока выдержку времени, отстроенную от длительности пуска электродви-

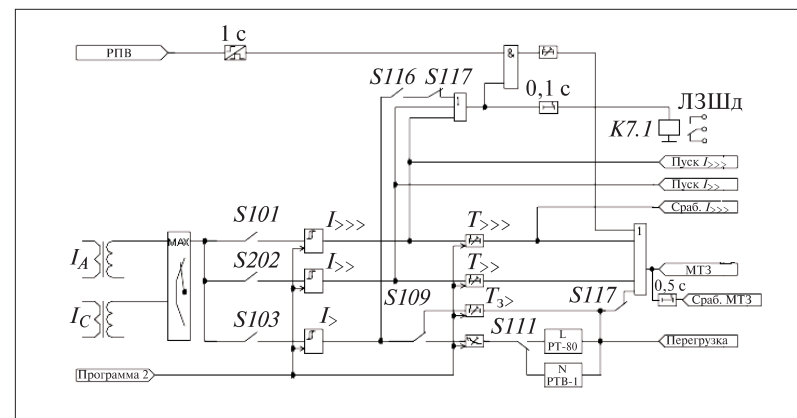


Рис. 5.1. Алгоритм МТЗ с контролем тока двух фаз

гателя в нормальных условиях и самозапуска после действия АВР и АПВ. Выдержка времени защиты от перегрузки синхронных электродвигателей, во избежание излишних срабатываний при длительной форсировке возбуждения, должна быть по возможности близкой к наибольшей допустимой по тепловой характеристике электродвигателя.

В схемах управления электродвигателями, защищаемыми от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, необходимо контролировать ток в двух фазах питающей сети.

На электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту, действующую на сигнал и отключение электродвигателя при повышении температуры или прекращении действия вентиляции.

Отсюда видно, что в ПУЭ не содержится специальных требований для цифровых устройств защиты электродвигателей.

Обычно для защиты электродвигателей от перегрузки в цифровых устройствах релейной защиты используют третью ступень МТЗ, обеспечивающую контроль тока в двух (рис. 5.1) или трех фазах (см. рис. 2.2, ч. 1).

Однако времятоковые характеристики такой защиты не всегда совпадают с перегрузочной характеристикой электродвигателя, несмотря на то, что в некоторых устройствах может быть предусмотрено несколько времятоковых характеристик. Например, в

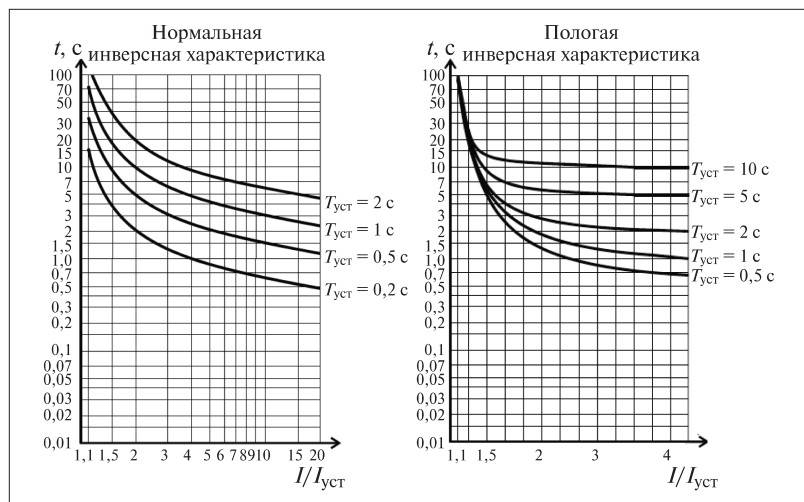


Рис. 5.2. Примеры времятоковых характеристик третьей ступени алгоритма МТЗ

устройстве «Сириус-Д» можно задать одну из шести характеристик. Для примера на рис. 5.2 показаны две такие характеристики.

В устройствах БМРЗ выбор характеристики производят программным ключом S111 (см. рис. 5.1).

К достоинствам защиты от симметричных перегрузок, выполняемой по максимальному фазному току, следует отнести ее простоту и легкость расчета уставок [61].

К недостаткам такой защиты от перегрузки следует отнести отсутствие учета температуры:

- окружающей среды;
- статорной обмотки от ранее полученного теплового импульса.

В блоках БМРЗ предусмотрены и другие защиты от перегрузок (см. табл. 1.2 – 1.6, ч. 1):

- защита от симметричных перегрузок [45];
- защита с помощью алгоритма «тепловая модель электродвигателя».

Для более полного использования перегрузочной способности электродвигателя в алгоритме защиты от симметричных перегрузок, реализованном в блоках БМРЗ, использована математическая модель, графически представленная на рис. 5.3.

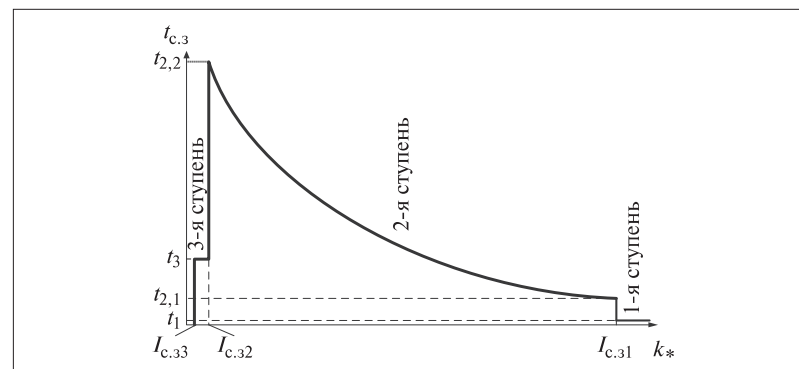


Рис. 5.3. Характеристика алгоритма защиты от перегрузок

Первая ступень алгоритма имеет независимую характеристику и срабатывает при протекании тока $I_{c.31}$ в течение промежутка времени $t_{2,1}$, реагирует на механическую блокировку ротора двигателя, обеспечивая быстрое отключение двигателя от источника питания. Одновременно эта ступень выполняет функцию ближнего резервирования максимальной токовой отсечки [46].

Пример 5.1. *Расчет уставок для алгоритма защиты от симметричных перегрузок асинхронного двигателя серии А4 мощностью 800 кВт.*

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

Расчет начинаем с определения тока срабатывания *первой ступени защиты* от перегрузки (первичные значения) $I_{c.31}$, А, который должен быть отстроен от пускового тока электродвигателя:

$$I_{c.31} = \frac{1,2k_{\text{пуск}}}{k_{\text{воз}}} I_{\text{ном.дв}}, \quad (5.1)$$

где $k_{\text{пуск}}$ — кратность пускового тока электродвигателя; $k_{\text{воз}}$ — коэффициент возврата (значение коэффициента $k_{\text{воз}}$ приводится в документации на конкретное исполнение цифрового устройства релейной защиты. Для устройств БМРЗ $k_{\text{воз}} = 0,95$).

Подставив расчетные данные получим

$$I_{c.31} = \frac{1,2 \cdot 5,5}{0,95} \cdot 57 = 396 \text{ А} = 6,95 I_{\text{ном.дв}}.$$

Для отстройки от бросков пускового тока электродвигателя принимаем $t_{c.3} = 0,1$ с. При таком значении выдержки времени будет исключено неправильное действие защиты при подпитке точки КЗ на шинах или присоединениях питающей сети.

Вторая ступень рассматриваемой защиты имеет инверсную характеристику и действует на отключение электродвигателя.

Время срабатывания защиты, с, определяем по формуле, учитывая тепловую постоянную времени A охлаждения статора защищаемого электродвигателя,

$$t_{c.3} = \frac{A}{k_i^2 - 1}, \quad (5.2)$$

где k_i — кратность тока статорной обмотки электродвигателя ($k_i = I/I_{\text{ном}}$)

В расчетах защит электродвигателей значение тепловой постоянной времени охлаждения статора A должен указывать производитель электродвигателя. Если в документации значение этой величины отсутствует, можно воспользоваться формулой, с, приведенной в [13]:

$$A = t_{\text{доп}}(k_i^2 - 1), \quad (5.3)$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время работы при кратности тока k_i .

Эта формула позволяет оценить минимально допустимое значение постоянной времени охлаждения статора в тех случаях, когда известны значения кратности тока и допустимого времени работы электродвигателя при этой кратности тока.

Используемый в примере электродвигатель соответствует требованиям ГОСТ 183–74, поэтому он должен выдерживать протекание тока, равного $1,5I_{\text{ном}}$, в течение 2 мин. Это позволяет нам определить постоянную времени A по формуле (5.3), подставив значения $k_i = 1,5$ и $t_{\text{доп}} = 120$ с (2 мин):

$$A = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с.}$$

В зависимости от типа и мощности защищаемого электродвигателя значение A может находиться в диапазоне от 60 до 300 с.

Полученный результат ($A = 150$ с) вводится в качестве уставки на устройство БМРЗ, процессор которого рассчитывает время сра-

батывания первой ступени в зависимости от кратности тока k_i . Расчет производится по формуле (5.2). В частности, при $k_i = 1,08$ время срабатывания защиты

$$t_{c.3} = \frac{150}{1,08^2 - 1} = 901 \text{ с.}$$

Ток срабатывания второй ступени защиты от симметричных перегрузок, A , определяют по формуле

$$I_{c.3.2} = (k_i/k_B) I_{\text{ном.дв.}} \quad (5.4)$$

Подставив значения $k_i = 1,08$, $k_B = 0,95$, получим

$$I_{c.3.2} = \frac{1,08}{0,95} \cdot 57 = 64,8 \text{ А} = 1,14 I_{\text{ном.дв.}}$$

Время срабатывания второй ступени защиты находит процессор цифрового блока по заданной постоянной A и определяемой им кратности тока статорной обмотки k_i по формуле (5.2).

Третья ступень данной защиты имеет независимую характеристику срабатывания и действует на сигнализацию, т. е. рассчитана для применения на объектах с дежурным персоналом.

Ток срабатывания третьей ступени, A , находим по формуле

$$I_{c.3.3} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_B} I_{\text{ном.дв.}} \quad (5.5)$$

Если двигатель работает без технологических перегрузок, то время срабатывания этой ступени $t_{c.3.3}$ выбирают от 10 до 20 с, но обязательно больше, чем время пуска электродвигателя.

Если же для приводимого электродвигателем механизма характерно наличие технологических перегрузок, то время срабатывания этой ступени выбирают таким, чтобы оно превышало время технологической перегрузки.

Но и в этом случае оно не может быть меньше времени пуска электродвигателя.

Ток срабатывания третьей ступени вычислим по формуле (5.5), в которой приняты значения коэффициентов $k_{\text{отс}} = 1,05$ и $k_B = 0,95$:

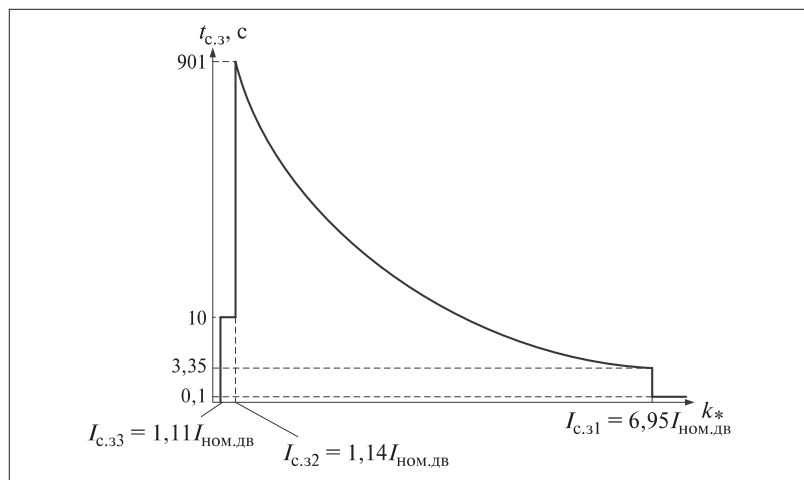


Рис. 5.4. Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя серии А4 мощностью 80 Вт

$$I_{c.33} = \frac{1,05}{0,95} \cdot 57 = 63 \text{ A} = 1,11 I_{\text{НОМ.ДВ}}$$

В связи с тем, что технологические перегрузки данного электродвигателя отсутствуют, а время его пуска равно 5 с, принимаем время срабатывания третьей ступени равным 10 с.

По результатам расчета строим характеристику защиты электродвигателя от симметричных перегрузок, приведенную на рис. 5.4.

В связи с отсутствием в данном алгоритме контроля теплового состояния электродвигателя, схему защиты рекомендуется дополнить датчиками, контролирующими:

- работу независимой системы вентиляции электродвигателя;
- температуру статора электродвигателя.

Защита электродвигателей с помощью алгоритма «Тепловая модель электродвигателя» (рис. 5.5) предназначена для предотвращения повреждения изоляции электродвигателя, вследствие теплового действия токов обусловленных симметричными и несимметричными перегрузками, (блокировкой ротора, затянувшимся пуском и самозапусками, обрывами фаз питающей сети и т.д.)

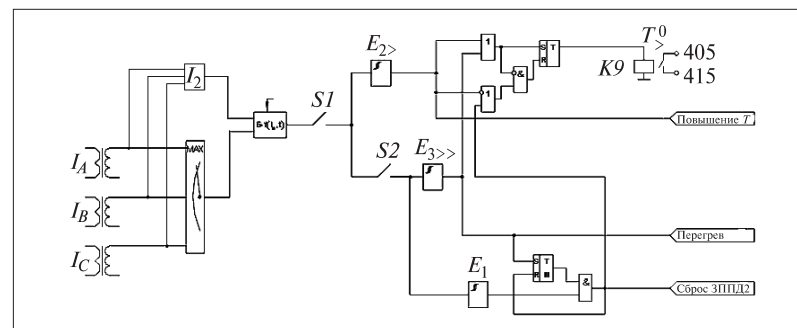


Рис. 5.5. Алгоритм «Тепловая модель электродвигателя»

Данный алгоритм позволяет оценить перегрев двигателя косвенно — по значению и длительности протекания тока в обмотках статора. Поэтому все сказанное выше о необходимости введения в схему защиты датчиков температуры и работы независимого вентилятора остается в силе.

Часто в электродвигателях в обмотках и активном железе статора устанавливают датчики температуры (см. рис. 1.13, ч. 1). Таким образом обеспечивается тепловая защита электродвигателя, основанная на результатах непосредственного измерения температуры, что позволяет наиболее полно использовать перегрузочные возможности электродвигателя.

На рис. 5.6 показаны кривые нагревания:

- для физической модели электродвигателя (кривая 2, получена путем прямых измерений);
- для математической модели, используемой в БМРЗ (кривые 1 и 3).

Кривая 1 получена в блоках серии БМРЗ-Д при тепловых параметрах, которые определены экспериментальным путем и откорректированы методами интерполяции, а кривая 3 — при параметрах, которые определены путем расчетов по паспортным данным физической модели. Как видно, параметры тепловой модели в блоках серии БМРЗ-Д можно подобрать так, что будет обеспечиваться достаточно точное ее функционирование с погрешностями не более 10 % (кривые 1 и 2), что вполне приемлемо для средств релейной защиты.

Следует отметить, что ГОСТ Р 52776—2007 допускает, в зависимости от класса изоляции, увеличивать предельно допустимое

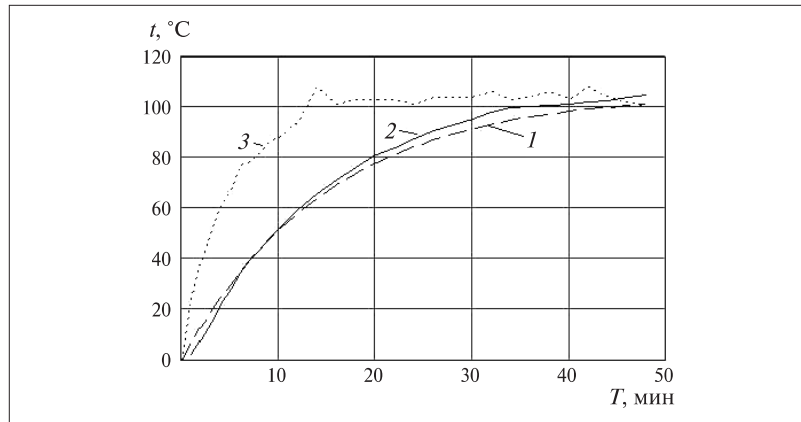


Рис. 5.6. Кривые нагрева электродвигателя

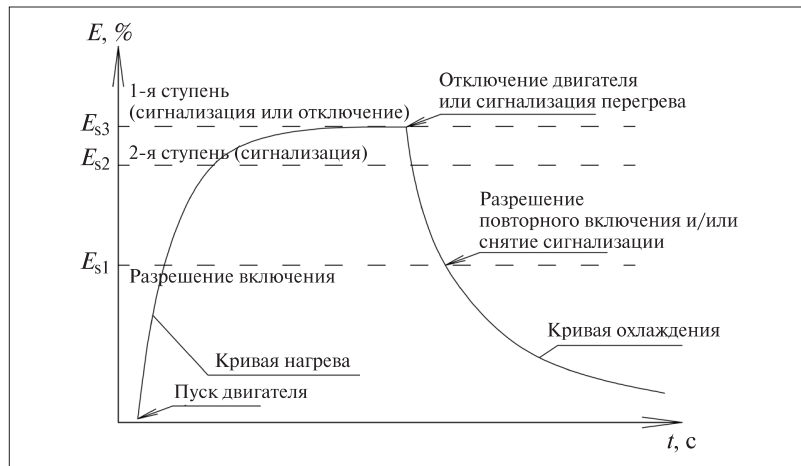


Рис. 5.7. Графическое представление алгоритма «Тепловая модель электродвигателя»:

E_{s1} — уставка, при которой разрешено включение электродвигателя после срабатывания защиты, %; E_{s2} — уставка пуска второй ступени защиты (действует на сигнализацию), %; E_{s3} — уставка пуска первой ступени защиты (действует на сигнализацию или на отключение), %.

значение перегрева (при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]), но не более, чем на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. приложение, табл. ПЗ).

Рассмотрим подробнее график работы тепловой модели электродвигателя, используемой в цифровых устройствах серии БМРЗ [10] (рис. 5.7).

При отсутствии информации о значениях постоянных времени нагрева и охлаждения T_{e1} и T_{e2} в документации электродвигателя, их определяют экспериментальным путем по методике, описанной ниже.

Относительный перегрев статорных обмоток электродвигателя $E_{\text{нагр}}$, %, за временной интервал работы (нагрева) электродвигателя $t_{\text{нагр}}$ рассчитывает процессор цифрового устройства релейной защиты по выражению

$$E_{\text{нагр}} = 100 \cdot \left(\frac{I_{\text{экрв}}}{I_{\text{ш}}} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{e1}}} \right) + E_0 e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{e1}}}, \quad (5.6)$$

где $I_{\text{экрв}}$ — эквивалентный ток электродвигателя, А; $I_{\text{ш}}$ — расчетный ток двигателя (выбирается равным номинальному току двигателя); T_{e1} — постоянная времени нагрева электродвигателя, мин; T_{e2} — постоянная времени охлаждения электродвигателя, мин; E_0 — относительный перегрев двигателя на момент начала процесса нагрева, %*.

$t_{\text{нагр}}$ — время работы электродвигателя (время нагрева), мин.

Относительное охлаждение электродвигателя описывается формулой

$$E_{\text{охл}} = E_0 e^{-\frac{t_{\text{охл}}}{T_{e2}}}, \quad (5.7)$$

где $t_{\text{охл}}$ — время охлаждения, мин.

Возможность задания различных постоянных времени нагрева и охлаждения позволяет учитывать худшие условия охлаждения остановленного двигателя, в котором вентилятор закреплен на валу.

Алгоритм защиты «Тепловая модель электродвигателя» рекомендуется выполнять с двумя ступенями, действующими на сиг-

* Перегрев электродвигателя при длительной номинальной нагрузке принят за 100 %. При температуре обмоток равной температуре окружающей среды $E_0 = 0\text{ }%$.

нализацию. На объектах без постоянного обслуживающего персонала рекомендуется использовать одну ступень.

Пример 5.2. *Расчет уставок защиты асинхронного двигателя серии А4 мощностью 800 кВт для алгоритма «Тепловая модель электродвигателя».*

Исходные данные приведены в приложении, вариант 2.

Ток $I_{ш}$, рассчитанный по формуле (5.6), принимаем равным номинальному току электродвигателя:

$$I_{ш} = I_{ном.дв} = 57 \text{ А.} \quad (5.8)$$

В выражении (5.6) при вычислениях используют значение эквивалентного тока $I_{эКВ}$ и времени работы электродвигателя $t_{нагр}$. Вычислительная программа находит значение эквивалентного тока $I_{эКВ}$, А, по формуле:

$$I_{эКВ} = \sqrt{I_{\phi}^{2max} + 3I_2^2}, \quad (5.9)$$

где $I_{\phi max}$ — значение максимального из фазных токов, А; I_2 — значение тока обратной последовательности, А.

Для проведения вычислений по формуле (5.6) необходимо знать максимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} . Для этого используем формулу, связывающую между собой величины, определяющие процесс нагрева электродвигателя [20]:

$$A / (Te1 \cdot 60) = \ln \left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{max}} \right), \quad (5.10)$$

где k_{max} — предельная кратность перегрева относительно перегрева при номинальном токе (см. приложение).

После преобразований формулы (5.10) получим, мин,

$$T_{e1} = A / \left[60 \ln \left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{max}} \right) \right]. \quad (5.11)$$

При отсутствии информации о тепловой постоянной времени охлаждения обмотки статора можно воспользоваться формулой

(5.3) [13], которая позволяет оценить минимально допустимое значение A .

Как было сказано выше (см. пример 5.1), согласно требованиям стандартов [27, 36], трехфазные двигатели отечественного производства мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора, должны в течение 2 мин выдерживать ток, равный $1,5I_{ном}$. Для электродвигателей с такими характеристиками $A = 150$. В зависимости от типа и мощности защищаемого электродвигателя значение A может находиться в диапазоне от 60 до 300 с.

Зная постоянную времени охлаждения статора можно найти постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} (в том случае, когда электродвигатель соответствует требованиям стандартов [27, 36]):

$$T_{e1} = \frac{150}{\ln \left(\frac{2^2 - 1}{2^2 - 1,278} \right)} \approx 1603 \text{ с} \approx 26,7 \text{ мин.}$$

Значение k_{max} принято равным 1,278, так как двигатель с изоляцией класса F используется при температуре, соответствующей классу изоляции В.

Для определения параметра E_{s1} предварительно необходимо найти значение нагрева двигателя за время пуска

$$E_{пуск} = k_{пуск}^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{пуск}}{T_{e1}}} \right) \cdot 100 \%. \quad (5.12)$$

В зависимости от типа электродвигателя значение $k_{пуск}$ может находиться в диапазоне от 3 до $8I_{ном.дв}$. Согласно исходным данным для расчета $k_{пуск} = 5,5I_{ном.дв}$.

Подставив данные в формулу, получим:

$$E_{пуск} = 5,5^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{10}{1603}} \right) = 18,8 \%.$$

Расчетное допустимое значение относительного перегрева E_{s1} , %, при котором разрешен пуск машины находим по формуле

$$E_{s1} \leq 100 - E_{пуск}. \quad (5.13)$$

После подстановки значений получаем

$$E_{S1} \leq 100 - E_{\text{пуск}} = 100 - 18,8 = 81,2 \%$$

Полученное значение округляем в меньшую сторону и принимаем $E_{S1} = 80 \%$.

Параметры пуска тепловой защиты электродвигателя на сигнализацию и отключение E_{S2} и E_{S3} определяют по формуле

$$E_{S2,3} = 100 \% \cdot \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} \right)^2, \quad (5.14)$$

где 100% — относительная температура нагрева электродвигателя при номинальном токе; $I_{\text{дв}}$ — ток, потребляемый электродвигателем; $I_{\text{ном.дв}}$ — номинальный ток электродвигателя.

При определении параметра E_{S2} (для второй ступени алгоритма, работающей на сигнализацию) учитываем возможность длительной работы электродвигателя в сети с напряжением, равным $110 \% U_{\text{ном}}$ [30], и поэтому отношение токов принимаем равным $\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} = 0,9$ (т. е. перегрузка возникает при токе, большем $0,9 I_{\text{ном}}$).

Подставив в формулу приведенное отношение токов, получим

$$E_{S2} = 100 \cdot (0,9)^2 \approx 81 \%$$

При определении параметра E_{S3} (для первой ступени алгоритма, работающей на сигнализацию или отключение) учитываем возможность длительной работы электродвигателя в сети с напряжением, равным $90 \% U_{\text{ном}}$ [30], и поэтому отношение токов принимаем равным $\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} = 1,10$ (т. е. перегрузка возникает при токе, большем $1,1 I_{\text{ном}}$).

Подставив в формулу приведенное отношение токов, получим

$$E_{S3} = 100 \cdot (1,10)^2 \approx 121 \%$$

Относительный перегрев при охлаждении остановленного двигателя процессор рассчитывает по формуле (5.61).

Постоянную времени охлаждения T_{e2} выбираем сообразно эффективности работы системы охлаждения на остановленном

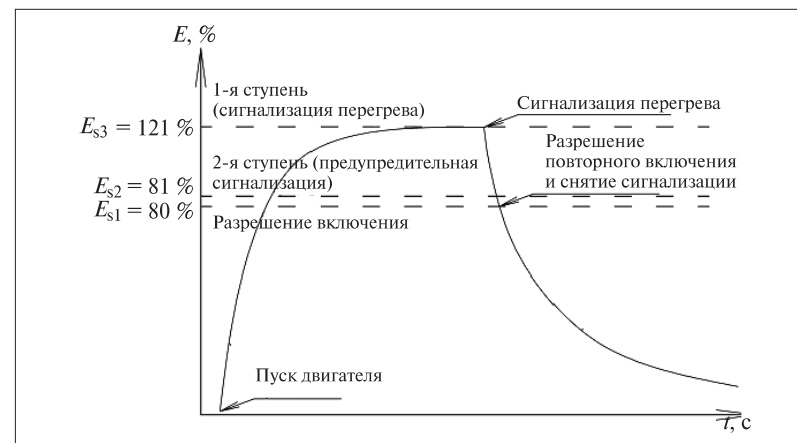


Рис. 5.8. Расчетная характеристика алгоритма «Тепловая модель электродвигателя»

электродвигателе. При наличии системы охлаждения, эффективность которой не зависит от частоты вращения вала, значение T_{e2} принимаем равной постоянной времени нагрева T_{e1} . Если же электродвигатель охлаждается вентилятором, закрепленным на валу, то постоянную времени T_{e2} , выбираем в 2 – 4 раза больше постоянной времени нагрева T_{e1} .

Поскольку в рассматриваемом электродвигателе вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя, принимаем постоянную охлаждения двигателя в 4 раза больше постоянной нагревания:

$$T_{e2} = 4T_{e1} \approx 107 \text{ мин.} \quad (5.15)$$

Полученная по результатам расчетов характеристика алгоритма «Тепловая модель электродвигателя» приведена на рис. 5.8.

Для более полного использования перегрузочных возможностей машины рекомендуется при проведении пусконаладочных работ экспериментально определять реальные значения постоянных времени нагрева и охлаждения как это описано ниже и в [11, 12, 53].

Постоянные времени нагрева T_{e1} и охлаждения T_{e2} определяют экспериментальным путем, оценивая скорости нагревания и охлаждения электродвигателя.

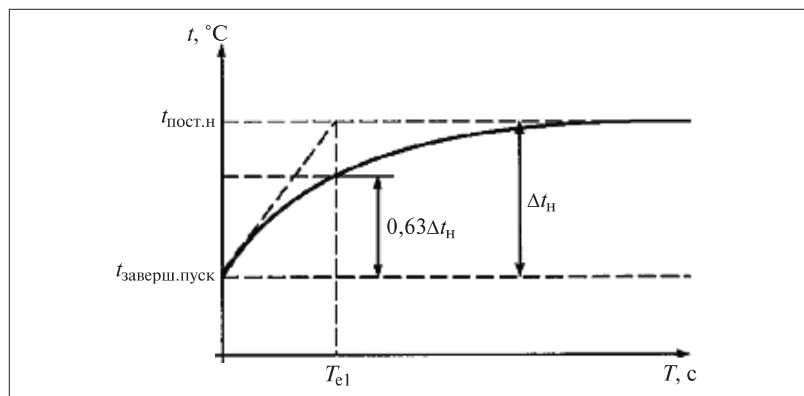


Рис. 5.9. График нагревания электродвигателя

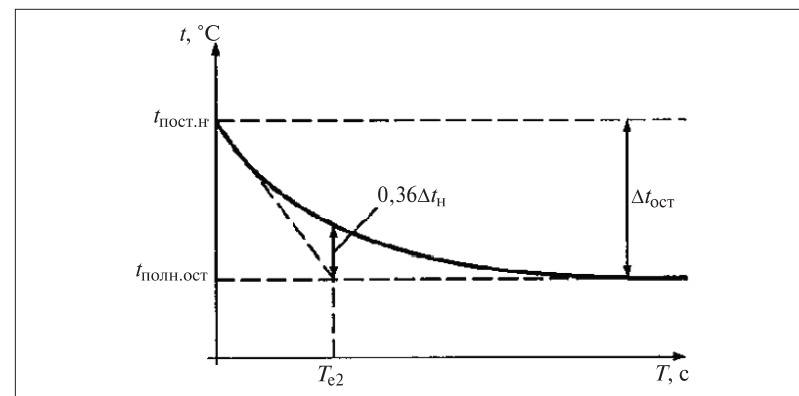
При наличии в двигателе встроенных датчиков температуры температуру двигателя определяют по их показаниям. Если встроенные датчики отсутствуют, то для определения температуры наружной поверхности статора электродвигателя используют переносные термометры. В этом случае желательно обеспечивать температуру окружающей среды постоянной.

Перед проведением эксперимента электродвигатель останавливают на время, необходимое для полного остывания, как внешней поверхности двигателя, так и его внутренних частей.

Продолжительность остывания в зависимости от его конструктивных особенностей и габаритов. При отсутствии независимого охлаждения процесс остывания может продолжаться от 10 до 20 ч. Независимое охлаждение остановленного электродвигателя существенно сокращает продолжительность охлаждения до 1 – 2 ч.

После измерения температуры холодного двигателя производится его пуск и снимается характеристика нагрева двигателя — зависимость температуры от времени работы при постоянной нагрузке, составляющей не менее 50 % номинальной (рис. 5.9).

Температуру двигателя необходимо измерять каждые 60 с. Для повышения точности желательно выполнить не менее 100 измерений. Для сокращения продолжительности процесса можно применить метод, описанный в статьях [11, 12] и таким образом определить установившееся значение температуры при постоянной нагрузке.



Как правило, постоянная времени охлаждения в 2 – 4 раза больше постоянной времени нагрева.

После задания в блоке постоянных времени T_{e1} и T_{e2} , а также расчетного тока двигателя $I_{ш}$ необходимо проверить правильности работы тепловой модели.

Проверка осуществляется аналогично описанному выше, при этом кроме текущей температуры двигателя каждые 60 с фиксируется значение перегрева, индицируемое на дисплее цифрового устройств БМРЗ.

После завершения эксперимента на основе полученных значений строится график процессов нагрева и охлаждения. На графике установившееся значение перегрева, индицируемое на дисплее БМРЗ, приравнивается к установившейся температуре двигателя при постоянной нагрузке.

Погрешность тепловой модели в каждой точке измерения оценивают по формуле, %:

$$\Delta t = \frac{t_{т.м} t_{дв.уст} - t_{дв}}{t_{т.м.уст}} \quad (5.18)$$

где $t_{т.м}$ — текущее значение перегрева, отображаемое на дисплее устройства БМРЗ, %; $t_{дв.уст}$ — установившееся значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, (С; $t_{т.м.уст}$ установившееся значение перегрева, отображаемое на дисплее устройства БМРЗ, %; $t_{дв}$ — текущее значение превышения температуры электродвигателя относительно температуры холодного электродвигателя, (С.

Если значение Δt не превышает ± 5 °С, настройка алгоритма «Тепловая модель электродвигателя» считается успешной.

В устройстве РДЦ-01-054 [76] время срабатывания защиты от перегрузки электродвигателя по току рассчитывается процессором устройства по формуле, с:

$$t_{ср} = \frac{Q}{k_i^2 - b^2}, \quad (5.19)$$

где Q — постоянная, зависящая от времени пуска электродвигателя; k_i — кратность тока перегрузки; $b = 1,05$ — постоянная величина.

Сравнивая эту формулу с формулой (5.2), можно увидеть их идентичность.

Таблица 5.1. Значения постоянной Q

Время пуска, с, для устройств		Постоянная Q или Q_T
РДЦ-01-054	РДЦ-06	
1		30
2		75
3		120
4		180
5		255
6		270
7		280
8		290
9		295
10 – 25	10 – 300	300

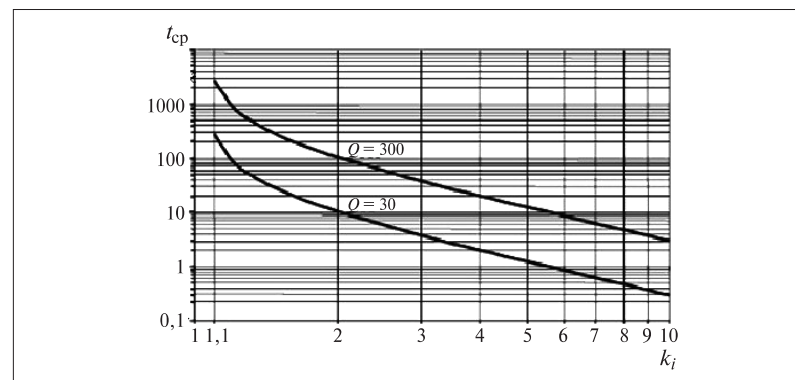


Рис. 5.11. Зависимость времени срабатывания от перегрузки

Для упрощения выбора значения уставки срабатывания в документации на это устройство приведена таблица, в которой даны значения постоянной Q в зависимости от времени пуска электродвигателя (табл. 5.1). Обратим внимание на то, что максимальное значение постоянной Q равно 300.

Графически зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока электродвигателя показана на рис. 5.11.

Алгоритмы защиты синхронного двигателя от асинхронного режима

Согласно требованиям ПУЭ для синхронных электродвигателей (СД) должна предусматриваться защита от асинхронного режима с помощью реле, реагирующего на увеличение тока в обмотках статора с независимой от тока характеристикой выдержки времени.

Эта защита может быть совмещена с защитой от токов перегрузки и отстроена по времени от тока пускового режима и тока, соответствующего форсировке возбуждения.

ПУЭ допускает применение защиты с зависимой от тока характеристикой для СД с отношением короткого замыкания (ОКЗ) более 1.

Из теории электрических машин [15] известно, что ОКЗ представляет собой отношение тока возбуждения $i_{в0}$, соответствующего номинальному напряжению $E_0 = U_{ном}$ по характеристике холостого хода, к току возбуждения $i_{в.н.}$, соответствующему номинальному току $I_{ном} = I_{к3}$ по характеристике трехфазного короткого замыкания:

$$ОКЗ = \frac{i_{в0}}{i_{в.н.}} = \frac{E_n}{E_{0к}}. \quad (6.1)$$

Пример характеристики КЗ для синхронного генератора приведен на рис. 6.1. Для синхронных явнополюсных машин значение ОКЗ находится в пределах 0,4 – 1,4 [15].

При выполнении схемы защиты должны применяться меры по предотвращению ее несрабатывания при биениях тока в асинхронном режиме. Допускается применение и других мер защиты,

обеспечивающих надежное действие защиты СД при возникновении асинхронного режима.

Защита СД от асинхронного режима должна действовать с выдержкой времени на одну из схем управления, предусматривающих:

- 1) ресинхронизацию СД;
- 2) ресинхронизацию СД с автоматической кратковременной разгрузкой механизма до такого уровня, при котором обеспечивается втягивание СД в синхронизм (при допустимости кратковременной разгрузки по условиям технологического процесса);
- 3) отключение СД и повторный автоматический пуск;
- 4) отключение СД (при невозможности его разгрузки или ресинхронизации, при отсутствии необходимости автоматического повторного пуска и ресинхронизации по условиям технологического процесса).

Как известно, длительная работа СД в асинхронном режиме приводит к тепловым перегрузкам и перегреву обмотки статора и демпферных контуров ротора. Защита СД от потери возбуждения, как правило, выполняется на основе максимальной токовой защиты с регулируемым временем возврата. Однако, такая схема не позволяет защитить СД, работающие с технологическими перегрузками.

Поэтому целесообразно всегда выполнять защиту от асинхронного режима аналогично защите синхронных генераторов — на основе реле сопротивления [19].

По методике, приведенной в [7], проанализируем изменение сопротивления на выводах питания СД (рис. 6.2).

При нормальном режиме работы (с опережающим $\cos \varphi = 0,9$) вектор полного сопротивления прямой последовательности на выводах питания двигателя находится во 2-м квадранте (двигатель отдает реактивную мощность и потребляет активную).

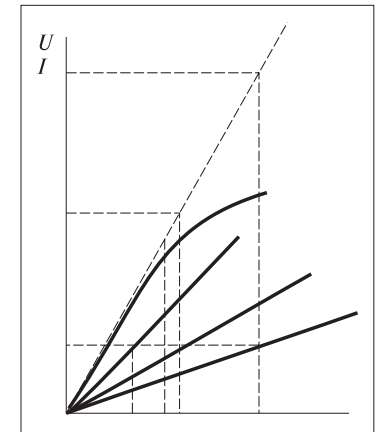


Рис. 6.1. Пример характеристики КЗ синхронного генератора [15]

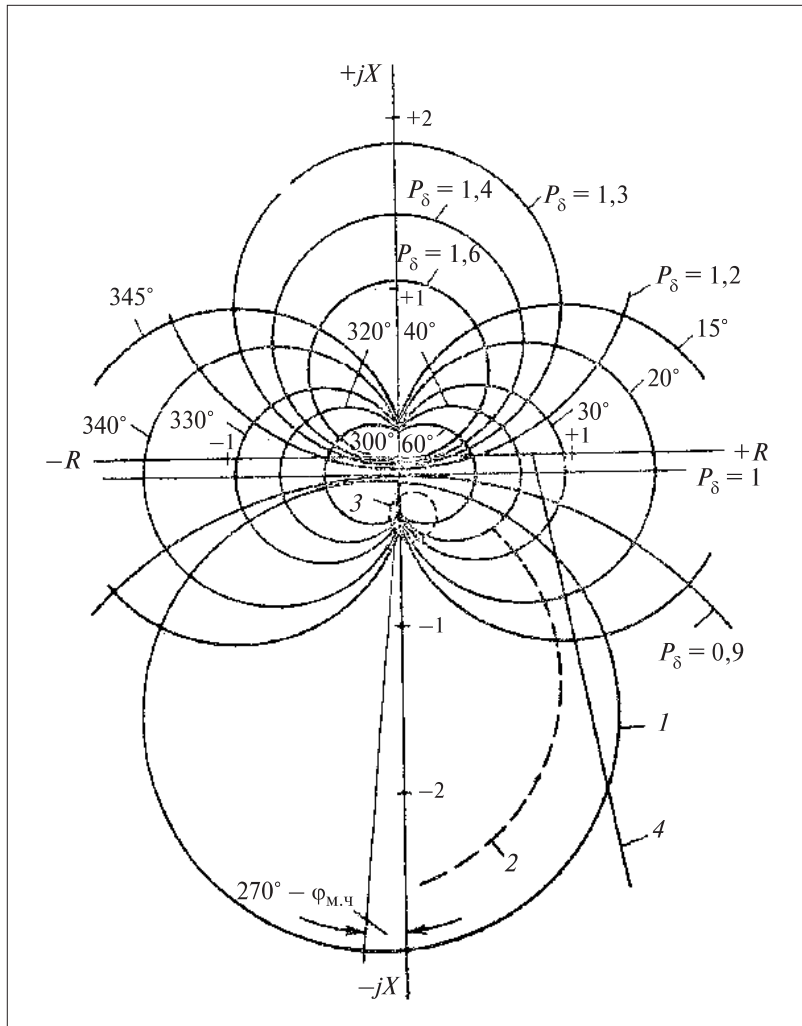


Рис. 6.2. Круговые диаграммы полного сопротивления на выводах синхронной машины и характеристика реле

При потере возбуждения двигатель начинает потреблять из сети значительную реактивную мощность, но продолжает потреблять и активную, а вектор полного сопротивления смещается в 3-й квадрант.

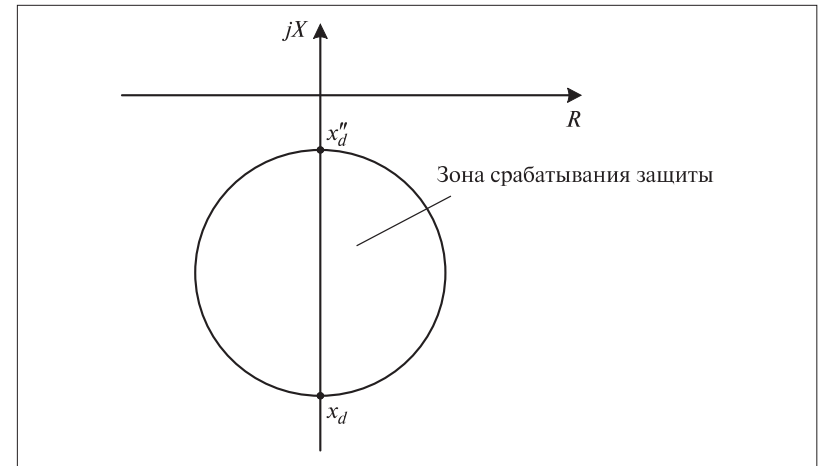


Рис. 6.3. Характеристика области срабатывания защиты

Согласно экспериментальным исследованиям [7], сопротивление на выводах СД при потере возбуждения, может изменяться в диапазоне значений:

$$\text{от } fx_d'' \text{ до } gx_d, \quad (6.2)$$

где fx_d'' — сверхпереходное сопротивление СД, Ом; x_d — индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом; f и g — коэффициенты, изменяющиеся в пределах 0,3 – 0,5 и 1,1 – 1,4 соответственно.

Учитывая это, в блоках БМРЗ характеристика области срабатывания защиты СД от асинхронного режима выполняется в виде окружности, расположенной симметрично на комплексной плоскости относительно оси jX (рис. 6.3).

Окружность с центром на оси jX проходит через точки, находящиеся в диапазонах значений fx_d'' и gx_d .

Пример 6.1. *Расчет уставок для алгоритма защиты СД типа СДТД-4000-2 от асинхронного режима.*

Исходные данные приведены в приложении.

1. Для того, чтобы найти сверхпереходное сопротивление и сопротивление прямой последовательности СД в именованных еди-

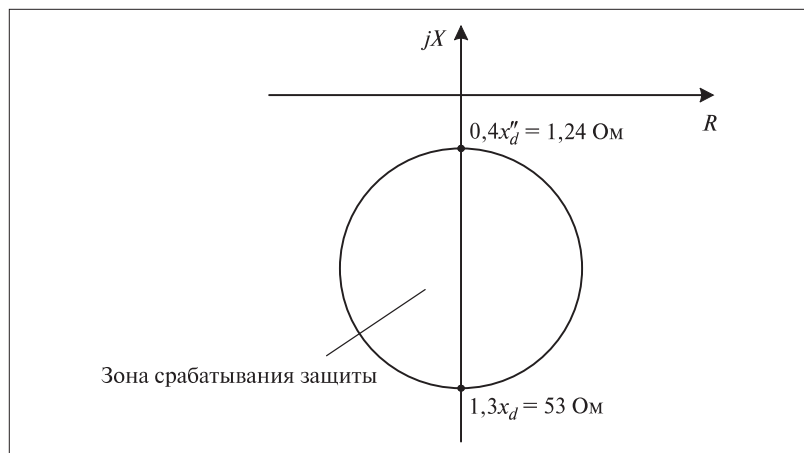


Рис. 6.4. Характеристика защиты для СД типа СТД-4000-2

ницах, необходимо знать базисное сопротивление, найти которое, используя расчетные данные, можно по формуле:

$$r_6 = \frac{U_{\text{ном.дв}}^2 \cdot 1000}{S_{\text{ном.дв}}} = \frac{10^2 \cdot 1000}{4560} = 22 \text{ О м.} \quad (6.3)$$

2. Сверхпереходное сопротивление в именованных единицах по известному значению базисного сопротивления определяют по формуле:

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot r_6}{100} = \frac{14,29 \cdot 22}{100} \approx 3,1 \text{ О м.} \quad (6.4)$$

3. Индуктивное сопротивление в именованных единицах находят по формуле:

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot r_6}{100}. \quad (6.5)$$

Произведя вычисления, получим:

$$x_d = \frac{185,1 \cdot 22}{100} \approx 40,7 \text{ О м.}$$

Учитывая сказанное выше о возможном диапазоне изменения сопротивления СД (6.2), выбираем точки пересечения оси jX — 1,24 Ом и 53 Ома и строим характеристику защиты от потери возбуждения (перехода в асинхронный режим) для СД типа СТД-4000-2 (рис. 6.4).

Время срабатывания защиты принимают от 1 до 2 с. Работа алгоритма защиты СД от асинхронного режима автоматически блокируется при наличии:

- сигнала включения автомата гашения поля (АГП), формируемого блоком цифровой релейной защиты;
- внешнего сигнала на включение АГП (например, при управлении процессом гашением поля в ручном режиме).

Достоинством алгоритма защиты СД от асинхронного режима является корректность процесса выявления факта потери возбуждения, а также простая методика расчета уставок.

Зависимость правильной работы данного алгоритма от исправности измерительных цепей напряжения является его недостатком, который можно устранить, предусмотрев в цифровом устройстве алгоритм контроля исправности этих цепей.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

Алгоритм «Функция опережающего отключения»

В предыдущей главе был рассмотрен алгоритм защиты от асинхронного режима на основе реле сопротивления. Рассмотрим теперь алгоритм защиты, позволяющий отключить СД заблаговременно, еще до фактического его перехода в асинхронный режим [6].

Как известно, мощность, потребляемая синхронным двигателем от питающей его энергосистемы, описывается выражением:

$$P_{\text{дв}} = \frac{UE_{\text{дв}}}{X_{\text{экв}}} \sin \delta, \quad (7.1)$$

где U — напряжение на шинах энергосистемы; $E_{\text{дв}}$ — ЭДС электродвигателя; $X_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление, включающее сопротивление электродвигателя и всех элементов питающей сети; δ — фазовый угол между ЭДС электродвигателя и напряжением энергосистемы.

Мощность электродвигателя $P_{\text{дв}}$ при увеличении угла δ сначала возрастает, достигая максимума при $\delta = 90^\circ$, а затем падает и становится равной нулю при $\delta = 180^\circ$ (рис. 7.1).

При заданных значениях $E_{\text{дв}}$ и U максимум мощности при $\delta = 90^\circ$ зависит от сопротивления питающей сети. При синхронной частоте вращения относительные значения мощности двигателя и момента численно равны, поэтому кривая $P = f(\delta)$ является и характеристикой вращающего момента двигателя.

Характеристика момента сопротивления изображена прямой линией: $P_0 = f(\delta)$. Точки a и b пересечения этой линии с угловой

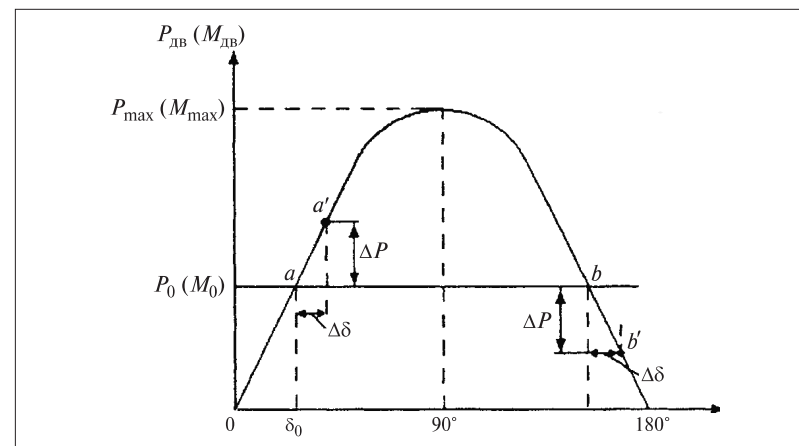


Рис. 7.1. Угловая характеристика СД

характеристикой определяют возможные режимы работы двигателя, но двигатель может устойчиво работать только в точке a (соответствует углу δ_0).

Действительно, при работе в точке a и случайном кратковременном увеличении угла δ на величину $\Delta\delta$ увеличивается и электромагнитный момент синхронного двигателя на величину ΔP , под влиянием которого его ротор несколько ускоряется.

При этом угол δ уменьшается, и после нескольких колебаний возвращается к значению δ_0 . При случайном кратковременном уменьшении угла δ ротор несколько притормаживается, угол δ возрастает и после нескольких колебаний вновь возвращается к значению δ_0 . Поэтому восходящая ветвь угловой характеристики (см. рис. 7.1) называют областью устойчивой работы СД.

Если же подобное кратковременное увеличение угла на $\Delta\delta$ произойдет в точке b , то электромагнитный момент не увеличится, а уменьшится, что вызовет дальнейшее прогрессивное увеличение угла δ , в результате чего двигатель выйдет из синхронизма. Следовательно, нисходящая ветвь угловой характеристики — зона неустойчивой работы.

Положение точки a на кривой зависит от нагрузки двигателя, отношения $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$ и $\cos\varphi$ двигателя. Чем меньше нагрузка двигателя,

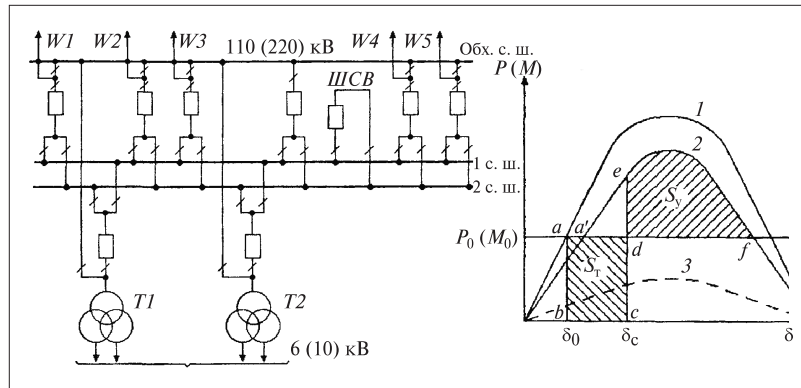


Рис. 7.2. Типовая схема подстанции с двигательной нагрузкой (а) и характеристика мощности СД при возникновении КЗ (б)

ля и чем больше отношение $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$, тем больше запас устойчивости. Чем точка a расположена ближе к вершине кривой, тем запас статической устойчивости меньше.

Обычно двигатели конструируют для работы с опережающим коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,9$. При переходе в режим работы с $\cos\varphi = 1$ или отстающим коэффициентом мощности устойчивость СД уменьшается вследствие уменьшения ЭДС двигателя.

Например, для двигателя типа СТД-12500-2 при его работе с номинальной нагрузкой, опережающим коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,9$ и $\Delta\delta \approx 45^\circ$ запас устойчивости составляет 42 %.

При работе с номинальной нагрузкой при $\cos\varphi = 1$ и $\delta_0 \approx 62^\circ$ запас устойчивости уменьшается до 12 %. При нагрузке, составляющей 80 % номинальной, $\cos\varphi = 1$ и $\delta_0 \approx 57^\circ$ запас устойчивости составляет всего 20 %*.

Рассмотрим пример поведения СД при возникновении близкого трехфазного КЗ на одной из отходящих линий $W1 - W5$ (рис. 7.2, а).

Пусть перед возникновением возмущения СД работал устойчиво с моментом сопротивления на валу M_0 (см. рис. 7.2, б, кривая 1) и углом δ_0 и развивал мощность P_0 . При возникновении КЗ вра-

щающий момент СД становится равным нулю (точка b на рис. 7.2, б). Пока КЗ не отключено, СД тормозится, при этом угол возрастает до значения δ_c .

Площадь S_T , ограниченную точками a, b, c, d , называют площадкой торможения, а ее площадь соответствует энергии торможения СД.

В момент отключения КЗ синхронный двигатель начинает работать в точке e на кривой 2, соответствующей новому режиму работы энергосистемы. Площадь S_V , ограниченную точками d, e, f , называют площадкой ускорения, а ее площадь соответствует энергии ускорения двигателя.

Если $S_V > S_T$, то устойчивость СД сохраняется, а новый режим работы после нескольких колебаний установится в точке a' . В том случае, когда $S_T > S_V$, синхронный двигатель теряет устойчивость.

При удаленном КЗ на смежной линии или при несимметричном КЗ напряжение прямой последовательности в линии связи СД — энергосистема не снижается до нуля.

Характеристика такого режима показана штриховой линией 3 на рис. 7.2, б. В этом случае площадка торможения S_T будет меньше, без нижней части отрезаемой кривой 3, что делает этот режим работы СД более легким, чем при близком КЗ.

Резюмируя, можно утверждать, что на динамическую устойчивость СД оказывают влияние:

- вид, удаленность и длительность КЗ¹;
- нагрузка СД².
- условия послеаварийного режима³.

Например, опаснее отключение одной из двух питающих линий 110 (220) кВ, чем отключение любой другой отходящей от шин подстанции 110 (220) кВ линии, поскольку в первом случае снижается вся угловая характеристика мощности.

Если внешнее возмущение приводит к потере устойчивости СД, то в начальной фазе, когда возникло КЗ, генераторы начинают ускоряться, а двигатели тормозиться. Потери в цепи КЗ созда-

¹ Наибольшее влияние на устойчивость СД оказывают близкие КЗ (особенно трехфазное КЗ).

² Чем больше нагрузка СД в предшествующем режиме, тем опаснее внешние возмущения.

³ Более опасен такой послеаварийный режим, в котором сопротивление внешней сети больше по сравнению с сопротивлением сети в режиме, предшествующем аварийному.

* При питании СД от шин бесконечной мощности.

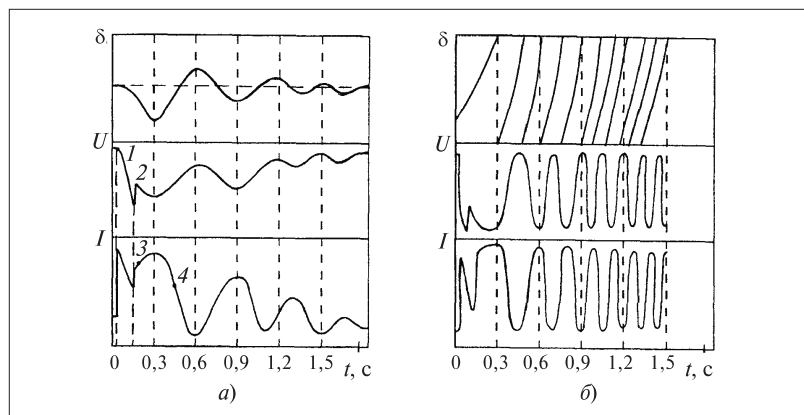


Рис. 7.3. Переходный процесс без потери (а) и с потерей (б) устойчивости: U — напряжение на шинах секции; I — ток ввода; δ — угол

ют дополнительный тормозной момент, который, притормаживая генератор, замедляет рост угла δ , а притормаживая двигатель, способствует увеличению угла δ .

Увеличению угла δ двигателей способствуют и повышенные по сравнению с мощными синхронными генераторами активные потери в статоре и роторе двигателя. После отключения КЗ угол δ и частота скольжения продолжают быстро увеличиваться из-за тормозного момента приводного механизма. Поэтому связка «энергосистема — узел с синхронной нагрузкой» более критична к внешним возмущениям по сравнению со связкой из двух энергосистем.

Характер переходного процесса устойчивости узла нагрузки с СД показан на рис. 7.3.

Известно, что СД сохраняют синхронный выбег, пока генерируемое ими напряжение не снизится до значения примерно $0,4U_{\text{ном.дв}}$, в пределах этого критерия все СД узла нагрузки можно представить одним электродвигателем, особенно если их мощность, инерционные постоянные и нагрузка примерно одинаковы, поэтому все изложенное выше для одного двигателя справедливо и для узла нагрузки с СД.

Если внешнее возмущение не приводит к нарушению устойчивости группы СД, то переходный процесс носит характер затухающих колебаний, показанных на рис. 7.3, а.

Точки 1 и 2 соответствуют началу и отключению внешнего КЗ в сети 110 кВ. В процессе качаний ток через ввод периодически изменяется, достигая в максимуме при наиболее тяжелых, но устойчивых процессах четырехкратного начального значения, в минимуме — 0,3 начального значения. При максимуме тока напряжение снижается до $0,3U_{\text{ном.дв}}$, в этих условиях может пускаться максимальная токовая защита ввода (точка 3). Продолжительность протекания тока, при котором происходит пуск МТЗ, не превышает 0,5 с. После уменьшения тока МТЗ возвращается (точка 4). С тем, чтобы не происходило излишнее срабатывание МТЗ, необходимо выдержку времени ее срабатывания выбирать не менее 1 с. Полная длительность переходного процесса составляет 2 — 3 с.

Приведенные графики показывают характер переходных процессов в линиях связи, на вводах к секциям, от которых питаются СД, и на сборных шинах. Для конкретных узлов нагрузки с СД значения тока, напряжения и скорости протекания переходных процессов могут быть установлены только при их конкретном моделировании или путем натуральных экспериментов.

Алгоритм «Функция опережающего отключения» (рис. 7.4) выявляет наличие условий, при которых электродвигатель перейдет в асинхронный режим и производит отключение СД с опережением, до возникновения опасных процессов, связанных с асинхронным ходом.

Алгоритм «Функция опережающего отключения» (ФОО) предназначен для отключения синхронного двигателя δ и содержит три ступени — грубую, точную и резервную.

Пуск алгоритма ФОО производится при возникновении КЗ во внешней сети, которое фиксируется по факту одновременного скачкообразного снижения напряжения, активной мощности и увеличения тока прямой или обратной последовательности.

После пуска алгоритма во время переходного процесса (длительность этого процесса, как правило, составляет не более 250 мс) происходит накопление информации, необходимой для работы точной ступени.

В этот период времени по результатам каждого измерения проводится проверка условий срабатывания грубой ступени, которая определяет условия перехода синхронного двигателя в асинхрон-

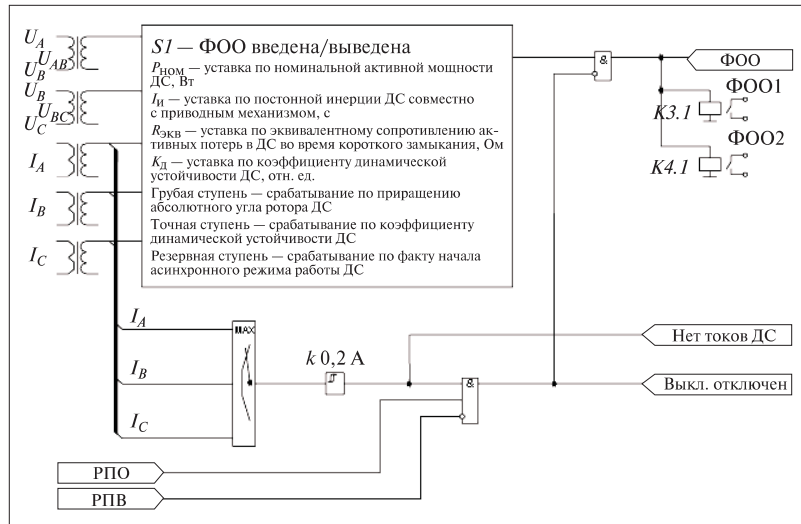


Рис. 7.4. Алгоритм «Функция опережающего отключения» ФОО

ный режим по факту достижения приращения угла ротора, определяемого по эмпирической формуле, рад:

$$\Delta\delta_{\text{ср}} = 2,8 - 1,1 \frac{P_{\text{доав}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (7.2)$$

где $P_{\text{доав}}$ — мощность синхронного двигателя в доаварийном режиме; $P_{\text{ном}}$ — уставка по номинальной мощности СД, определяемая по формуле, Вт:

$$P_{\text{ном}} = \frac{1000 P_{\text{ном.дв}}}{K_I K_U}, \quad (7.3)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; K_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока; K_U — коэффициент трансформации трансформаторов напряжения.

Приращение угла $\Delta\delta_{\text{ср}}$, рад, процессор цифрового устройства рассчитывает в течение всего переходного процесса по выражениям:

$$\Delta\delta = \int_{t_0}^t s dt; \quad (7.4)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{\text{доав}} - P - R_{\text{экр}} \sum i^2) dt, \quad (7.5)$$

где s — скольжение ротора синхронного двигателя в текущий момент времени; P — текущая мощность синхронного двигателя в переходном процессе, Вт; $R_{\text{экр}}$ — эквивалентное сопротивление активных потерь СД в режиме КЗ, Ом; $\sum i^2$ — сумма квадратов текущих мгновенных значений фазных токов СД, А; T_J — постоянная инерции двигателя совместно с приводом, с.

Эквивалентное сопротивление активных потерь в синхронном двигателе во время КЗ $R_{\text{экр}}$ определяют по формуле, Ом:

$$R_{\text{экр}} = (R_{\text{экр.дв}} + R_{\text{экр.с}}) \frac{K_I}{K_U}, \quad (7.6)$$

где K_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока; K_U — коэффициент трансформации трансформаторов напряжения; $R_{\text{экр.дв}}$ — приведенное к напряжению статора эквивалентное сопротивление активных потерь в синхронном двигателе, Ом, рассчитывается по паспортным данным синхронных двигателей (см. приложение); $R_{\text{экр.с}}$ — активное сопротивление внешней сети от зажимов синхронного двигателя до точки подключения измерительных трансформаторов напряжения, Ом.

Постоянную инерции двигателя совместно с приводом T_J находят по соотношению, с:

$$T_J = \frac{GD_{\text{дв}}^2 n_{\text{ном.дв}}^2 + GD_{\text{мех}}^2 n_{\text{ном.мех}}^2}{365 P_{\text{ном.дв}}}, \quad (7.7)$$

где $GD_{\text{дв}}^2$ — собственный маховый момент двигателя, ; $GD_{\text{мех}}^2$ — маховый момент приводного механизма, т·м²; $n_{\text{ном.дв}}$ — номинальная частота вращения двигателя, мин⁻¹; $n_{\text{ном.мех}}$ — номинальная скорость вращения приводного механизма, мин⁻¹; $P_{\text{ном.дв}}$ — номинальная мощность двигателя, кВт.

Например, для газоперекачивающих агрегатов с СТД-12500-2 $T_J = 3,33$ с, а с СТД-4000-2 $T_J = 3,25$ с. Если сработала грубая ступень алгоритма ФОО, то выдается команда на отключение двигателя.

Если грубая ступень не сработала, то после отключения КЗ вступает в работу точная ступень, которая осуществляет переход

СД в асинхронный режим после сравнения энергий (площадей) торможения и ускорения (см. рис. 7.2, б).

Для устойчивой работы двигателя должно выполняться соотношение:

$$\frac{S_y - S_T}{S_y} \geq k_d, \quad (7.8)$$

где k_d — коэффициент динамической устойчивости.

Значение k_d , определенное экспериментально для случая, когда установленная мощность генераторов существенно превышает мощность защищаемого электродвигателя, равно 0,22. В случаях соизмеримой мощности генераторов энергосистемы и двигателя для определения значения k_d требуется проведение специальных расчетов.

Расчет значений энергий ускорения S_y и торможения S_T процессор выполняет в течение всего переходного процесса. Если грубая или точная ступени не сработали, можно говорить о сохранении устойчивости СД, и поэтому алгоритм ФОО возвращается в исходное состояние.

В алгоритме ФОО предусмотрена резервная ступень, отключающая СД после его перехода в асинхронный режим с возбуждением. Эта ступень запускается на время 0,4 с после возврата грубой и точной ступеней.

Команда на отключение СД формируется, если в течение 60 мс одновременно выполняются условия:

$$\left. \begin{array}{l} P < P_{\text{доав}}; \\ U < 0,8U_{\text{ном}}; \\ I > 1,5I_{\text{ном}}. \end{array} \right\} \quad (7.9)$$

Резервная ступень работает также при отказе грубой и точной ступеней. Кроме этого предусмотрено срабатывание резервной ступени при неправильно введенных уставках.

В алгоритме предусмотрено задание трех уставок:

- постоянной инерции двигателя с приводом T_j (7.7). Уставку выбирают из диапазона значений от 1,00 до 9,99;
- эквивалентного сопротивления $R_{\text{эв}}$ (7.6), задаваемого в диапазоне от 0,00 до 2,00;
- коэффициента динамической устойчивости k_d , задаваемого в диапазоне от 0,00 до 0,50.

Дискретность задания всех уставок 0,01.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

Алгоритмы защиты от затянутого пуска, блокировки ротора и колебаний нагрузки

В этом разделе рассмотрим алгоритмы, относимые в литературе к технологическим [3], так как они предназначены для защиты электродвигателей в тех случаях, которые не вызваны теми или иными аварийными режимами в электрической сети или в электродвигателе.

Первые из таких алгоритмов — алгоритмы защиты от затянутого пуска (ЗЗП) и блокировки (заклинивания) ротора (ЗБР).

Ранее в главе 2 (см. ч. 1) было показано, как используется в цифровых устройствах изменение тока, потребляемого электродвигателя в зависимости от нагрузки, для определения режимов работы электродвигателя (см. рис. 2.4, ч. 1).

В частности, микропроцессорное устройство защиты определяет что пуск электродвигателя состоялся, если после получения команды на включение фазные токи возросли до заранее предусмотренного значения.

Во всех исполнениях устройств БМРЗ возрастание фазного тока от нуля до 0,5 А после получения команды «Пуск» интерпретируется как запуск электродвигателя (рис. 8.1).

Непрерывно получаемая информация о значении фазных токов электродвигателя использована в алгоритмах защиты электродвигателя от затянутого пуска ЗЗП и блокировки ротора ЗБР (рис. 8.2).

В функциональной схеме предусмотрен отдельный контроль токов обмоток для каждой частоты вращения.

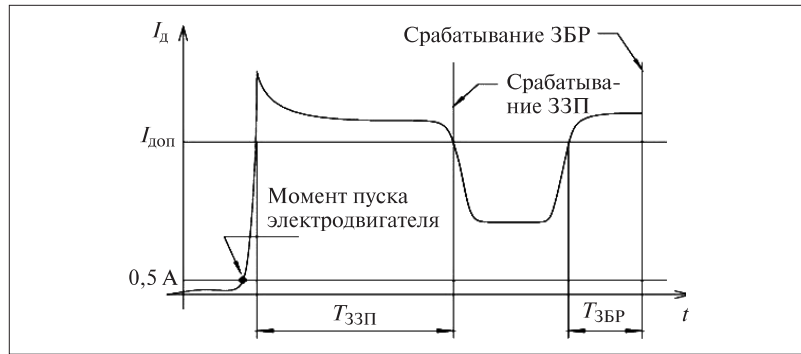


Рис. 8.1. Изменение тока электродвигателя при пуске и заклинивании ротора

Ключи $S1$ и $S2$ позволяют вывести из работы алгоритмы защиты обмотки первой и второй частот вращения.

Исключить действие защит на отключение обмоток электродвигателя первой и второй частот вращения от сети можно с помощью программных ключей $S4$ и $S3$ соответственно.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в ПУЭ, после срабатывании ЗЗП второй частоты вращения на отключение, алгоритм формирует сигнал на переход электродвигателя со второй частоты на первую (см. сигнал «2-1 по перегреву»).

С помощью ключа $S5$ можно исключить формирование данного сигнала.

Алгоритм производит отключение защищаемого двигателя при:

- затынутом пуске, когда, после определения факта пуска электродвигателя (на рис. 8.1 обозначен как «Момент пуска электродвигателя»), значение тока, потребляемого электродвигателем, превышает значение уставки пускового тока $I_{доп1}$ в течение времени $T_{п1}$;
- пуске электродвигателя с заклинённым ротором или при недопустимой нагрузке;
- при заклинивании ротора после выхода двигателя на рабочий режим (рис. 8.3).

В алгоритме предусмотрено задание следующих выдержек времени:

- $T_{п1}$ и $T_{п2}$, отсчет которых начинается после установления факта пуска электродвигателя при том, что ток, потребляемый электродвигателем находится в диапазоне $I_{доп} > I_B > 0,1I_{доп}$;

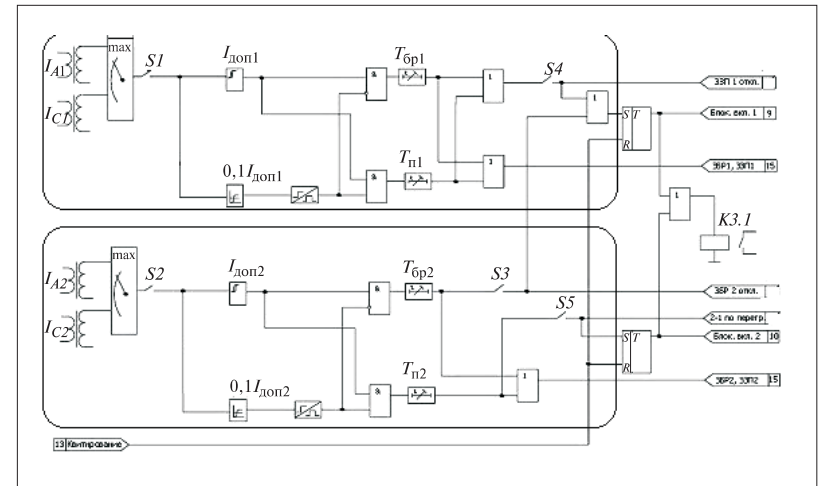


Рис. 8.2. Функциональная схема алгоритмов ЗЗП и ЗБР в блоке БМРЗ

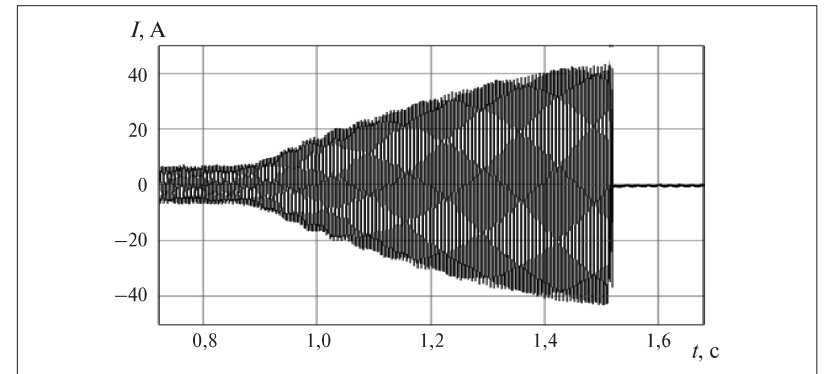


Рис. 8.3. Осциллограмма токов электродвигателя при заклинивании ротора

- $T_{бр1}$ и $T_{бр2}$, отсчет которых начинается, если ток, потребляемый электродвигателем превысил уставку по току после установления факта пуска электродвигателя.

В соответствии с рис. 8.1 выдержки времени $T_{бр1}$ и $T_{бр2}$ должны быть меньше, чем выдержки времени $T_{п1}$ и $T_{п2}$.

Если алгоритм одновременно формирует два сигнала, блокирующие подачу напряжения питания на обмотки первой и второй

частот вращения, то срабатывает выходное реле $K.1$ и формирует выходной сигнал «Блокирование по перегреву».

В устройстве РДЦ-06 [77] алгоритм защиты от заклинивания ротора асинхронного электродвигателя работает аналогично.

Допустимое время протекания тока через обмотки электродвигателя при заклинивании ротора, т. е. работы электродвигателя с повышенной нагрузкой, определяется на основе тепловой постоянной электродвигателя Q_T (см. табл. 5.1).

Тепловая постоянная Q_T зависит от конструктивных особенностей электродвигателя, системы его охлаждения и электрохимической постоянной времени.

В общем случае, при заданном значении Q_T время работы электродвигателя с увеличенной нагрузкой обратно пропорционально квадрату тока перегрузки. Поэтому при настройке устройства необходимо задать коэффициент нагрузки k_H , характеризующий превышение тока при заблокированном роторе по отношению к номинальному току электродвигателя, и время задержки T_3 . На основании графиков, характеризующих процессы нагревания и охлаждения электродвигателя (рис. 8.4) и табличных данных (см. табл. 5.1), процессор устройства определяет время отключения электродвигателя.

При работе компрессорных и вентиляторных установок возможно возникновение колебаний нагрузки [37], или помпажа [8].

Для защиты таких установок необходимо использовать цифровые устройства релейной защиты, имеющие защиту от колебаний нагрузки (ЗКН).

Принцип действия алгоритма ЗКН основан на выявлении колебаний активной мощности электродвигателя, период которых находится в диапазоне от 2 до 8 с, а амплитуда которых превышает некоторое заранее заданное значение ΔP_{\min} (рис. 8.5).

Структурная схема алгоритма ЗКН, используемая в блоках серии БМРЗ-ДС [74] приведена на рис. 8.6.

На вход алгоритма поступают пять аналоговых сигналов — два напряжения (U_{AB} , U_{BC}) и три тока (I_A , I_B , I_C). Значение тока обратной последовательности I_2 процессор вычисляет на основании измеренных значений фазных токов. На вход алгоритма поступает также сигнал защиты от несимметричных режимов $ЗНР$.

Работа $ЗКН$ блокируется при пуске $ЗНР$, при напряжении ниже $0,8U_{\text{ном}}$, а также при токе обратной последовательности $I_2 > 0,2I_{\text{ном}}$.

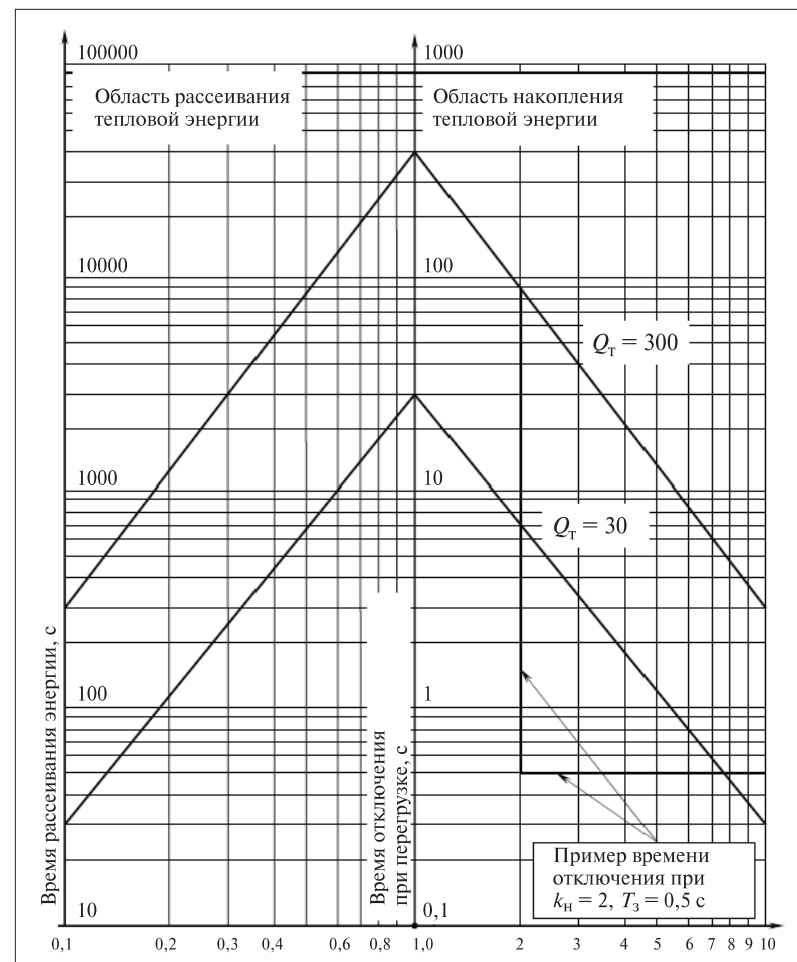


Рис. 8.4. Пример графического определения времени отключения электродвигателя в зависимости от значениях Q_T

Предположим, что электродвигатель работает с постоянной нагрузкой (рис. 8.7), а в момент времени t_1 возникает первое колебание нагрузки, превышающее значение ΔP_{\min} , которое, возможно, является началом помпажных колебаний.

Тогда запускается реле $ЗКН1$ и зажигается индикатор «Пуск» на лицевой панели блока (рис. 8.8). Если очередное колебание ак-

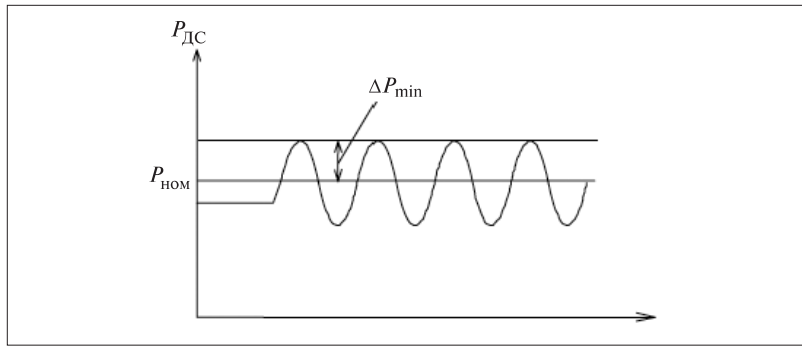


Рис. 8.5. Колебания активной нагрузки

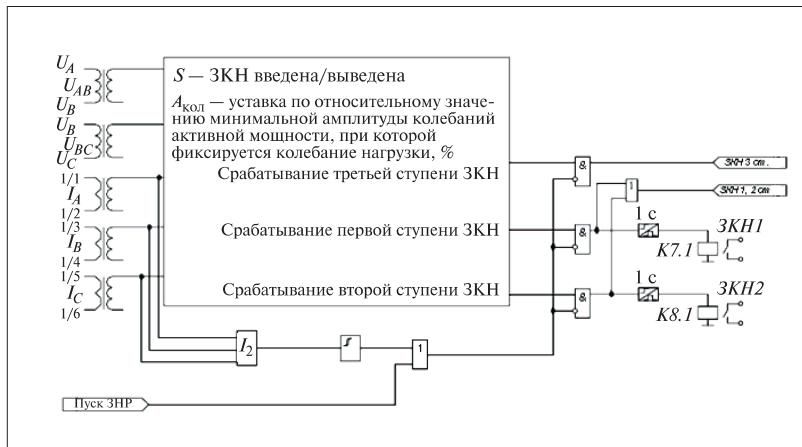


Рис. 8.6. Структурная схема алгоритма ЗКН

тивной мощности, превышающее заданную уставку ΔP_{\min} , не будет зафиксировано в течение 10 с, то произойдет возврат ступени защиты *ЗКН1* в исходное состояние.

Если колебания нагрузки продолжаются, то в момент времени t_2 вновь срабатывает реле *ЗКН1*.

После срабатывания реле *ЗКН1* начинает мигать индикатор «Сраб», а индикатор «Пуск» продолжает мигать. После окончания промежутка времени $t_2 - t_3$ возможно два варианта продолжения работы алгоритма.

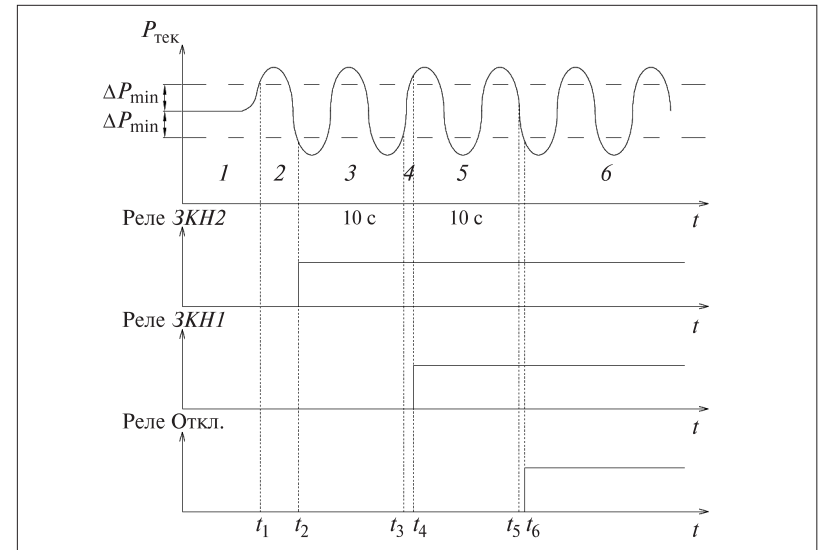


Рис. 8.7. Последовательность работы ступеней алгоритма ЗКН

Первый из них соответствует тому случаю, когда на интервале времени $t_3 - t_4$ колебаний нагрузки сверх ΔP_{\min} не происходит. В этом случае *ЗКН* возвращается в исходное состояние.

Если же за промежуток времени $t_3 - t_4$ выявлено колебание нагрузки, превышающей ΔP_{\min} , то срабатывает реле *ЗКН2*, после чего индикаторы «Пуск» и «Сраб» продолжают мигать.

Реле *ЗКН2*, срабатывая, запускает выдержку времени, а алгоритм продолжает контролировать

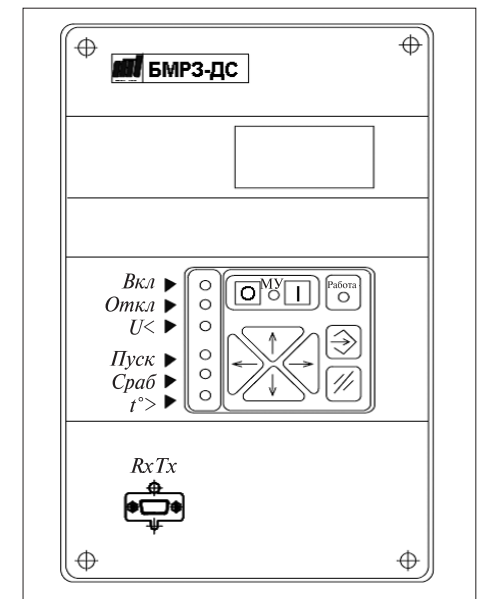


Рис. 8.8. Лицевая панель блока БМР3-ДС

колебания нагрузки. После окончания промежутка времени $t_4 - t_5$ возможно два варианта продолжения работы алгоритма.

Когда колебания нагрузки прекращаются, то происходит возврат *ЗКН* в исходное состояние.

Если же за промежуток времени $t_4 - t_5$ алгоритм фиксирует изменения нагрузки на величину, превышающую ΔP_{\min} , то срабатывает третья ступень защиты и формируется сигнал на отключение электродвигателя и индикатор «*Сраб*» начинает светиться постоянно.

При исчезновении оперативного питания и последующем его восстановлении состояние индикаторов сохраняется.

В качестве уставки *ЗКН* задают относительное значение амплитуды колебаний $A_{\text{кол}}$, вычисляемое по формуле:

$$A_{\text{кол}} = \frac{\Delta P_{\min}}{P_{\text{ном.дв}}}, \quad (8.1)$$

где ΔP_{\min} — минимальная амплитуда колебаний мощности синхронного двигателя, кВт; $P_{\text{ном.дв}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Значение уставки $A_{\text{кол}}$ выбирают из диапазона от 0,05 до 0,99. Изменять уставку можно с дискретностью 0,01.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

Алгоритмы

«Защита минимального напряжения», «Защита от несимметричного режима работы» и «Защита от обрыва фазы», «Защита от потери питания»

Согласно требованиям [17] в электроустановке должна быть предусмотрена защита минимального напряжения (ЗМН), обеспечивающая отключение электродвигателей неотчетственных механизмов.

Отключение таких электродвигателей необходимо для обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов и создания условий для быстрого восстановления напряжения после отключения КЗ.

Суммарная мощность отключаемых ЗМН электродвигателей, приводящих эти механизмы, определяется возможностями источника питания и сети по обеспечению самозапуска электродвигателей ответственных потребителей.

Выдержки времени защиты минимального напряжения выбирают в диапазоне от 0,5 до 1,5 с, т. е. больше времени действия быстродействующих защит от многофазных КЗ.

Уставку ЗМН по напряжению выбирают, как правило, не выше 70 % номинального напряжения.

Алгоритм ЗМН может быть использован для отключения неотчетственных синхронных электродвигателей, а также для предупреждения несинхронного включения отключенных двигателей, если токи выключения превышают допустимые значения.

В электроустановках промышленных предприятий в случаях, когда не может быть осуществлен одновременный самозапуск

всех электродвигателей ответственных механизмов¹, их следует разделять на группы, запуск которых (групп электродвигателей) осуществляют по одному из параметров — напряжению, времени, току и т. д.

Для электродвигателей ответственных механизмов, самозапуск которых после останова недопустим по технологическим требованиям или по условиям безопасности, следует применять ЗМН с выдержкой времени не более 10 с и уставкой по напряжению не выше 50 % номинального напряжения.

Алгоритм ЗМН следует также использовать для обеспечения надежности пуска АВР электродвигателей резервируемых механизмов.

На электродвигателях с изменяемой частотой вращения ответственных механизмов, самозапуск которых допустим и целесообразен, ЗМН должна производить автоматическое переключение электродвигателя на низшую частоту вращения.

В блоках БМРЗ алгоритм ЗМН (рис. 9.1) обеспечивает защиту асинхронного электродвигателя от работы при пониженном и несимметричном питании, блокирует включение двигателя при неправильном порядке чередования фаз [71], а также при обрыве фазы.

На вход алгоритма поступают два линейных напряжения U_{AB} и U_{BC} . Блок *A1* выделяет их максимальное значение, которое поступает на пороговый элемент, проверяющий выполнение условия $U_{\max} > 0,8U_{\text{ном}}$.

Блок *A2* определяет значение напряжения прямой последовательности U_1 , которое в дальнейшем используется для формирования нескольких выходных сигналов.

Сигнал «*Посл. фаз*» формируется при одновременном выполнении двух условий:

- $U > 0,8U_{\text{ном}}$;
- $U_1 < 0,2U_{\text{ном}}$.

Этот сигнал действует на схему управления выключателем без выдержки времени, блокируя пуск двигателя при неправильном чередовании фаз или обрыве фазы.

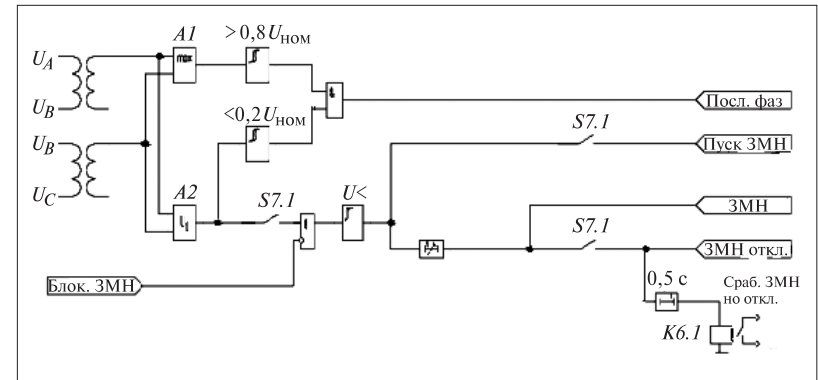


Рис. 9.1. Структурная схема алгоритма ЗМН

Напряжение прямой последовательности U_1 используется также в двухступенчатой ЗМН.

Первая ступень защиты предназначена для отключения неотчетственных электродвигателей, которые не участвуют в процессе самозапуска.

Напряжение срабатывания этой ступени $U_{<}$ выбирают из диапазона, В:

$$U_{<} = (0,6 \div 0,7)U_{\text{ном.дв.}} \quad (9.1)$$

Рекомендуемое время срабатывания этой ступени:

$$T_{<< \text{ЗМН}} = 0,5 \div 0,9 \text{ с.} \quad (9.2)$$

В некоторых исполнениях блоков БМРЗ предусмотрена вторая ступень алгоритма ЗМН, предназначенная для отключения всех электродвигателей при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса и техники безопасности.

Напряжения срабатывания второй ступени выбирают меньшим, чем

рекомендовано в (9.1), из диапазона, В:

$$U_{<} = (0,4 \div 0,5)U_{\text{ном.дв.}} \quad (9.3)$$

Уставка по времени срабатывания защиты выбирается в зависимости от скорости затормаживания основных АД, что позволя-

¹ Речь идет об электродвигателях, сохранение которых в работе после кратковременных перерывов питания или понижения напряжения, обусловленных отключением КЗ, действием АПВ или АВР, необходимо по технологическим условиям и допустимо по условиям техники безопасности.

ет осуществить последовательный запуск механизмов при невозможности их одновременного пуска.

Если присоединенные массы на валу АД значительны и электродвигатели затормаживаются медленно, то время срабатывания защиты выбирают из диапазона:

$$T_{<<3\text{МН}} = 6 \div 9 \text{ с.} \quad (9.4)$$

Если электродвигатели затормаживаются быстро, то уставку защиты по времени выбирают менее 6 с.

В устройствах релейной защиты РДЦ-06 [76] алгоритм защиты по напряжению контролирует максимальное и минимальное напряжения (рис. 9.2).

При достижения напряжением значения $U_{\text{махвкл}}$ алгоритм включает индикатор U (см. рис. 1.12, ч. 1), который начинает работать в мигающем режиме. Одновременно начинается отсчет выдержки времени. Если после истечения заданной выдержки времени напряжение не снизится до значения $U_{\text{махоткл}}$, произойдет отключение реле управления $K1$ (см. рис. 1.12, ч. 1), индикатор U начинает светиться постоянно и срабатывает реле аварии $K2$.

При уменьшении напряжения до уставки $U_{\text{махоткл}}$, аварийный режим отключается.

При настройке устройства можно задать значение $U_{\text{махоткл}}$, а значение $U_{\text{махвкл}}$ определяется коэффициентом возврата, значение которого не регулируется.

Алгоритм аналогично действует и при снижении напряжения до значения $U_{\text{минвкл}}$ — начинается отсчет выдержки времени и включается мигающий режим работы светодиода U (см. рис. 1.12, ч. 1).

Если после истечения выдержки времени напряжения остается ниже $U_{\text{миноткл}}$, происходит отключение реле управления $K1$, светодиод U начинает светиться постоянно и срабатывает реле $K2$, сигнализирующее об аварии.

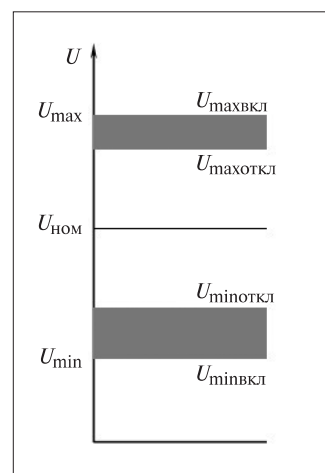


Рис. 9.2. Диапазоны контроля напряжения

При увеличении напряжения до уставки $U_{\text{миноткл}}$, аварийный режим отключается.

При настройке устройства можно задать значение $U_{\text{миноткл}}$, а значение $U_{\text{махвкл}}$ определяется коэффициентом возврата, значение которого регулируется в диапазоне от 0,95 до 0,80.

Работа алгоритма контроля $U_{\text{мин}}$ блокируется при пуске электродвигателя.

Алгоритмом предусмотрено включение выдержек времени только после запуска электродвигателя, если же изменение напряжения произошло до пуска электродвигателя, то отключение реле $K1$ происходит без выдержки времени.

Если в рассмотренном ранее алгоритме ЗМН (см. рис. 8.9) защита от неправильного чередования фаз действует постоянно, то в устройстве РДЦ-06 [76] алгоритм, контролирующий порядок чередования фаз, запрещает включение реле $K1$ управления пускателем электродвигателя (см. рис. 1.12 и 1.14, ч. 1). Одновременно срабатывает реле $K2$, формирующее сигнал «Авария» и красный светодиод ABC (см. рис. 1.12, ч. 1), сигнализирующий о неправильном порядке чередования фаз питающего напряжения.

После изменения порядка чередования фаз, запрет на включение реле $K1$ снимается, гаснет светодиод ABC и выключается реле $K2$.

Помимо защиты от неправильного чередования фаз, в устройствах защиты электродвигателей применяют алгоритмы «Защита от несимметричных режимов» (ЗНР) (рис. 9.3, а) и «Защита от обрыва фазы» (ЗОФ) (рис. 9.3, б), контролирующие ток обратной последовательности I_2 , для чего в обоих алгоритмах предназначен блок $A1$.

Пороговый элемент $A2$, предусмотренный в этих алгоритмах, срабатывает в том случае, когда значение тока обратной последовательности I_2 превышает 0,3 тока прямой последовательности.

Здесь необходимо отметить, что при работе электродвигателя в неполнофазном режиме значения токов прямой и обратной последовательностей равны, а ток в каждой из неповрежденных фаз составляет от 1,6 до 2,5 номинального тока электродвигателя. Работа трехфазных электродвигателей в таком режиме приводит к недопустимому разогреву зубцов ротора, пазовых клиньев и бандажных колец.

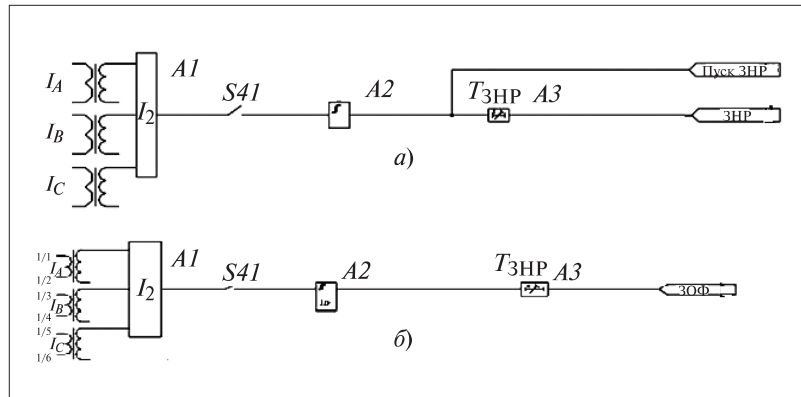


Рис. 9.3. Структурные схемы алгоритмов ЗНР (а) и ЗОФ (б)

Учитывая возможность обрыва фазы на линии внешнего электроснабжения рекомендуется применять алгоритмы ЗНР и ЗОФ на всех электродвигателях.

Уставка срабатывания элемента $A2$ задается как значение тока обратной последовательности, выбираемое в диапазоне от 0,2 до 10,0 А с дискретностью 0,1 А.

Элемент $A3$ обеспечивает задержку по времени срабатывания алгоритмов ЗНР и ЗОФ. Задержка может быть задана с дискретностью 1 с в диапазоне от 1 до 50 с.

Выход «Пуск ЗНР» (см. рис. 9.3, а), сигнал которого формирует­ся без выдержки времени, используется в других алгоритмах защиты электродвигателей, предусмотренных в устройстве.

В некоторых устройствах, где порядок чередования фаз проверяется перед пуском двигателей, вместо алгоритма ЗНР или ЗОФ предусмотрен контроль асимметрии тока нагрузки [76, 77].

Для контроля асимметрии тока на вход устройства должно поступать три аналоговых сигнала от трансформаторов тока (см. рис. 1.14, ч. 1). В устройстве предусмотрено задание уставки по асимметрии тока нагрузки в диапазоне от $0,20 I_{\text{раб}}$ до $0,55 I_{\text{раб}}$.

Рассмотренные алгоритмы позволяют реализовать в устройствах защиты электродвигателей контроль трансформаторов тока. Признаком неисправности этих трансформаторов служит одновременное выполнение двух условий:

- $I_2 > 0,3 I_1$;
- $I_{\phi} < I_{\text{ном.дв}}$.

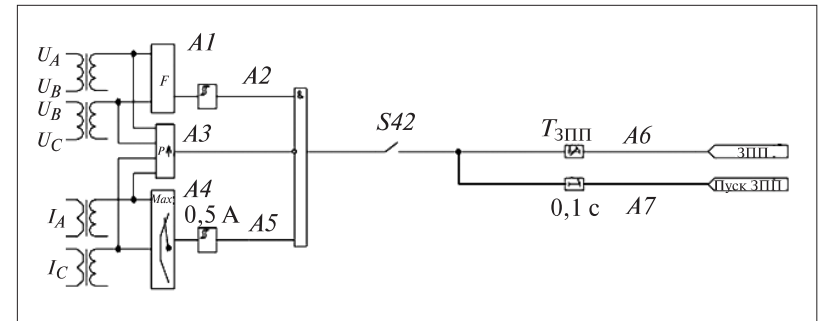


Рис. 9.4. Структурная схема алгоритма ЗПП

Для исключения подпитки внешней сети от СД, продолжающих вращаться после потери питания, в устройствах защиты электродвигателей применяют алгоритм ЗПП (рис. 9.4). Особенно актуально применение алгоритма ЗПП при медленном снижении напряжения на отключенной секции.

Для обеспечения правильной работы, алгоритм ЗПП должен реагировать на снижение частоты и изменение направления активной мощности.

Отметим, что алгоритм ЗМН, рассмотренный в данной работе ранее, не может быть использован в качестве основного для ЗПП из-за значительной длительности процесса снижения напряжения на шинах СД.

Элемент $A1$ обеспечивает контроль частоты напряжения, а пороговый элемент $A2$ — сравнивает текущее значение частоты с уставкой.

Уставку срабатывания реле минимальной частоты $F_{\text{ЗПП}} < D$ необходимо выбирать меньше частоты срабатывания первой ступени АЧР-1 (от 48,3 до 48,4 Гц) [2].

Пуск защиты происходит при выполнении следующих условий:

- снижении частоты ниже уставки $F_{\text{ЗПП}} < D$;
- обратном направлении мощности P ;
- наличии фазных токов.

Элемент $A3$ определяет направления мощности P (для каждой из пар входных сигналов I_A, U_{BC} и I_C, U_{AB} (рис. 9.5).

В связи с тем, что реле направления мощности включено по 90-градусной схеме, уставку $\phi_{с.з}$ рекомендуется выбирать из диапазона от 30 до 60° [22].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАВОК

Асинхронные электродвигатели

Двухскоростной двигатель АДО-1600/1000-10/12

Мощность на валу двигателя для первой частоты вращения:

$$P_{\text{ном.дв1}} = 1000 \text{ кВт.}$$

Мощность на валу двигателя для второй частоты вращения:

$$P_{\text{ном.дв2}} = 1600 \text{ кВт.}$$

Коэффициент мощности для первой частоты вращения:

$$\cos\varphi_1 = 0,53.$$

Коэффициент мощности для второй частоты вращения:

$$\cos\varphi_2 = 0,8.$$

Номинальное напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ.}$

КПД для первой частоты вращения: $\eta_1 = 0,92.$

КПД для второй частоты вращения: $\eta_2 = 0,95.$

Кратность пускового тока для первой частоты вращения:

$$k_{\text{пуск1}} = 6,7.$$

Кратность пускового тока для второй частоты вращения:

$$k_{\text{пуск2}} = 6,5.$$

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$I_{\text{ш}}^{(3)} = 8 \text{ кА.}$$

Двигатель участвует в процессе самозапуска, который может осуществляться как на первой, так и на второй частоте вращения.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (проектное значение) — не более 0,5 Ом.

Электродвигатели серии А4

Двигатель мощностью 1000 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 1000 \text{ кВт.}$

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,89.$

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ.}$

КПД: $\eta = 0,955.$

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,7.$

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$I_{\text{ш}}^{(3)} = 3,5 \text{ кА.}$$

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель участвует в самозапуске.

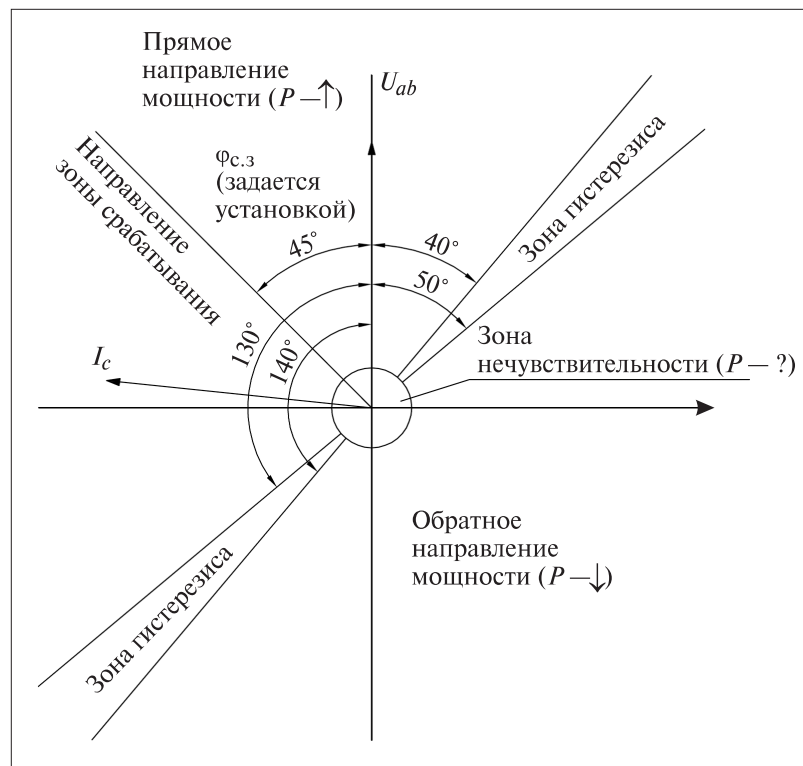


Рис. 9.5. Характеристика реле направления мощности

Отметим, что наличие элемента А3, определяющего направление мощности позволяет выполнить эту защиту быстродействующей.

Элемент А4 выбирает максимальное значение из фазных токов, после чего пороговый элемент А5 сравнивает это значение с уставкой и формирует сигнал о том, что значение фазного тока не менее заданного, т. е. двигатель находится в работе.

После окончания выдержки времени, задаваемой элементом А6, алгоритм ЗПП выдает сигнал на отключение.

На основании опыта эксплуатации синхронных двигателей на объектах ОАО «Газпром» рекомендуется задавать уставку срабатывания защиты по времени от 0,3 до 0,4 с [4].

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны вывода нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Двигатель мощностью 630 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 630$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,88$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ.

КПД: $\eta = 0,952$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 5$ кА.

Электродвигатель подключен медным кабелем с бумажной изоляцией, площадью сечения 185 мм² и длиной 40 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ сети на вводах питания АД, в которой работает этот двигатель, составляет $I_{\text{озз}\Sigma}^{(1)} = 1,4$ А.

Трансформатор тока нулевой последовательности типа ТЗР.

Двигатель мощностью 800 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 800$ кВт.

Номинальный ток двигателя: $I_{\text{ном.дв}} = 57$ А.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Пуск прямой от питающей сети.

Охлаждение обмоток статора — косвенное. Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя.

Вариант 1.

Двигатель соответствует требованиям ГОСТ 183–74.

Время пуска (по проекту): $t_{\text{пуск}} = 5$ с.

Вариант 2.

Кратность пускового момента: $k_{\text{м}} = 1,9$.

Номинальная частота вращения двигателя: $\omega_{\text{ном}} = 1000$ об/мин.

Двигатель соответствует требованиям ГОСТ Р 52776–2007.

Время пуска (по проекту): $t_{\text{пуск}} = 10$ с.

Класс изоляции двигателя: F (с использованием по классу В).

Асинхронный электродвигатель ДАЗО-2000-6

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 2000$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ.

КПД: $\eta = 0,961$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 7$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 5$ кА.

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель в самозапуске не участвует.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа АО-3150-6000

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 3150$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,83$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ.

КПД: $\eta = 0,968$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя и на вводах УПП: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 5$ кА.

Пуск двигателя плавный, в соответствии с настройками УПП, максимальная кратность пускового тока: $k_{\text{упп}} = 4$.

Двигатель участвует в самозапуске (в том числе и при переключении ячеек питания).

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Синхронные электродвигатели

Электродвигатель типа СДНЗ

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 6300$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

КПД: $\eta = 0,964$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 10$ кА.

Пуск двигателя асинхронный, прямой, от полного напряжения сети с включенным резистором в цепь обмотки возбуждения.

Двигатель не участвует в самозапуске.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа СТД-4000-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 4000$ кВт.

Полная мощность двигателя: $S_{\text{ном.дв}} = 4560$ кВ·А.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Сверхпереходное сопротивление двигателя: $x'_d = 14,29$ %.

Сопротивление двигателя: $x_d = 185,1$ %.

Электродвигатель типа СТД-3200-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 3200$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

КПД: $\eta = 0,972$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6,63$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 1,7$ кА.

Пуск двигателя реакторный, после завершения пуска двигатель продолжает работать через токоограничивающий бетонный реактор типа БР-10-1000-035.

Двигатель в самозапуске не участвует.

Длительно допустимый ток реактора: 1000 А

Номинальное индуктивное сопротивление реактора: 0,35 Ом

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа СТД-6300-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 6300$ кВт.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

КПД: $\eta = 0,975$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6,28$.

Двигатель подключен тремя медными кабелями с бумажной изоляцией сечением 185 мм² длиной 100 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ на частоте 50 Гц сети, в которой работает этот СД, составляет $I_{\text{озз}}^{(1)} = 0,5$ А.

Есть необходимость использования ОЗЗ с выдержкой времени для отстройки от переходных режимов.

Общие характеристики синхронных электродвигателей

В табл. П.1 — П.3 приведена информация о емкости статорных обмоток и эквивалентном сопротивлении для некоторых типов синхронных электродвигателей в зависимости от напряжения и мощности, а также о допустимом перегреве изоляции обмоток.

Таблица П.1. Емкость статорных обмоток

Тип СД	Мощность, кВт	Емкость, мкФ, при напряжении	
		6 кВ	10 кВ
СТД-5000-2	5000	0,085	0,11
СТД-6300-2	6300	0,11	0,11
СТД-8000-2	8000	0,11	0,17
СТД-10000-2	10000	0,15	0,17
СТД-1250002	125000	0,15	0,22

Таблица П.2. Эквивалентное сопротивление электродвигателей

Тип СД	Номинальное напряжение, кВ	$R_{\text{экв.дв}}$, Ом
СТД-4000-2	6	0,210
СТД-4000-2	10	0,600
СТД-12500-2	6	0,067
СТД-12500-2	10	0,197

Таблица П.3. Допустимая кратность перегрева

Класс изоляции*	Предельно допустимая температура перегрева, °С	k_{max}
A (A)	65	1,000
E (A)	80	1,231
B (E)	90	1,125
F (B)	115	1,278
H (F)	140	1,217

* В скобках в виде класса изоляции указана фактическая температура, при которой работают обмотки электродвигателя. Например, если обмотка, имеющая изоляцию класса В, работает при температуре, не превышающей 80 °С, считается, что она используется как изоляция класса Е.

Сведения об удельном емкостном токе линии, выполненной кабелем с бумажной изоляции, приведены в табл. П.4.

Таблица П.4. Удельный емкостной ток в зависимости от напряжения сети

Площадь сечения жил кабеля, мм ²	Удельный емкостной ток I_C , А/км, при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
16	0,40	0,55
25	0,50	0,65
35	0,58	0,72
50	0,68	0,80
70	0,80	0,92
95	0,90	1,04
120	1,00	1,16
150	1,18	1,30
185	1,25	1,47
240	1,45	1,70

Значения коэффициентов трансформации для некоторых типов трансформаторов тока нулевой последовательности ТТНП приведены в табл. П.5.

Таблица П.5. Коэффициенты трансформации ТТНП

Тип трансформатора тока	Коэффициент трансформации
ТЗЛ	1/25
ТЗЛМ	1/25
ТЗР	1/18
ТЗРЛ	1/30

Список литературы

Книги и статьи в печатных изданиях

1. **Александров А. М.** Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. **Александров В. Ф., Езерский В. Г., Захаров О. Г., Малышев В. С.** Частотная разгрузка в энергосистемах. В 2-х частях (Вып. 8 (104) Алгоритмы и устройства; Вып. 9 (105) Аварийные режимы и уставки). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007.
3. **Трансформаторы тока.** В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель и др. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **Беляев А. В.** Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными двигателями большой мощности. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004
5. **Баглейбтер О. И., Сабраманиан С.** Использование дополнительного торможения ДЗЛ в переходных режимах // Релейщик. 2011. № 1. Июль. С. 34.
6. **Булычев А. В., Езерский В. Г., Захаров О. Г., Поздеев Н. Д.** Исследование цифровых устройств серии БМРЗ-Д для защиты электродвигателей на физической модели // Энергетик. 2006. № 3. С. 19 – 22.
7. **Вавин В. Н.** Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор. М.: Энергоиздат, 1982.
8. **Воронцовский А. В.** Современные центробежные компрессоры. М.: Премиум Инжиниринг, 2007.
9. **Емельянец А. С., Петров С.** Логика ЦРЗА и цепей вторичной коммутации. Опасности непрофессиональных решений // Новости электротехники. 2011, № 2 (68).
10. **Захаров О. Г.** Снижение требований к РЗА недопустимо // Новости электротехники. 2011. № 2 (68).
11. **Захаров О. Г., Фрейцис И. И.** Метод определения коэффициента загрузки асинхронного электродвигателя // Вопросы судостроения. Сер. Судовая электротехника и связь. 1985. Вып. 42. С. 78.
12. **Захаров О. Г., Фрейцис И. И.** Энергосберегающий метод испытаний на нагревание судового электрооборудования // Вопросы судостроения. Сер. Промышленная энергетика. 1983. Вып. 3. С. 82.
13. **Корогодский В. И., Кужекков С. Л., Паперно Л. Б.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.

14. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1980.
15. **Костенко Л. М., Пиотровский Л. М.** Электрические машины. В 2-х частях. М.: Энергия, 1973.
16. **Манилов А. М.** Способ повышения чувствительности защит от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. 2011. № 4(27). С. 52.
17. **Правила устройства электроустановок.** М.: Госэнергонадзор России, 1998.
18. **Слодарж М. И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: Энергия, 1977.
19. **Соловьев А. Л.** Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС». М.: НТФ «Энергопрогресс», 2009.
20. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
21. **Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Петрова Т. Е.** Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006.
22. **Чернобровов Н. В. Семенов В. А.** Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998.
23. **Шабад М. А.** Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ. СПб.: ПЭИПК, 2001.
24. **Шабад М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматике распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2008.
25. **Шабад М. А.** Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетная проверки (Конспект лекций). СПб.: ПЭИПК, 2010.
26. **Шнеерсон Э. М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.
30. **ГОСТ 13109–97.** Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
31. **ГОСТ 26522–85.** Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения.
32. **ГОСТ 27514–87.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
33. **ГОСТ 29176–91.** Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока.
34. **ГОСТ 50254–92.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания.
35. **ГОСТ 50270–92.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
36. **ГОСТ Р 52776–2007.** Национальный стандарт РФ. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики (введен с 01.01.2008).
37. **РД 153-34.0-20.527–98.** Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.
38. **РД 153-34.0-35.301-2002.** Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
39. **РД 34.35.310–97.** Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматике энергосистем. М.: ОРГРЭС, 1997.
40. **СТО ДИВГ-046-2012.** Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10 кВ. Расчет уставок. Методические указания. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2012.

Нормативные документы

27. **ГОСТ 183–74.** Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия (отменен 01.07.2010).
28. **ГОСТ 7746–2001.** Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
29. **ГОСТ 8865–93.** Межгосударственный стандарт. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.

Статьи и информационные материалы в Интернете

41. **Алгоритмы** защиты, выполняемые БМРЗ в кодах ANSI // http://bmrz-zakharov.narod.ru/new/_ANSI.htm.
42. **Блокирование** или блокировка // Материал размещен в «Лексиконе релейщика»: <http://maximarsenev.narod.ru/Slovar/blok.htm>.
43. **Блокирование** // <http://rza.org.ua/glossary/read/Blokirovanie.html>.
44. **Блокировка** // <http://rza.org.ua/glossary/read/Blokirovka.html>.

45. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Новый алгоритм защиты электродвигателей от перегрузки // http://olgezaharov.narod.ru/2011/overload_new.htm.
46. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Токовая отсечка // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/to.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh-ustrojstv-relejno>.
47. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 2. Дифференциальная защита электродвигателя // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/DZT.DTO.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh-ustrojstv-relejnoj-z>.
48. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 3. Алгоритм дифференциальной защиты электродвигателя с торможением // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/DZT.DTO2.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh>.
49. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 4. Защита от замыканий на землю // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/ZZ2.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh-ustrojstv-relejn/> и <http://www.mnip.ru/analytics/212582>.
50. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 5. Защита электродвигателей от перегрузки // <http://www.bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/overload.htm>.
51. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 6. Защита электродвигателей от перегрузки с помощью алгоритма «тепловая модель электродвигателя» // <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh-ustrob/> и <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/overload2.htm>.
52. **Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г.** Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 7. Уставки для алгоритма защиты синхронного двигателя от асинхронного режима // <http://elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyh-ustrojstv-relej>.
53. ДИВГ.648228.001 Д3. Методические указания по расчету уставок защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6 – 10 кВ // http://rzdoro.narod.ru/mtr_1.files/murz_6_10.pdf.
54. **Езерский В. Г.** Комбинированная защита от однофазных замыканий на землю // <http://www.energo-info.ru/content/view/3546/108>.
55. **Защита** от аварийных режимов работы асинхронных электродвигателей // <http://www.normalizator.com/manuals/articles/motor-protection>.
56. **Информация** об алгоритмах, выполняемых блоками БМРЗ и БМРЗ-100 различных исполнений и модификаций // Материал размещен на странице: <http://bmrz-zakharov.narod.ru/algorithmu.htm>.
57. **Ионистор** // <http://maximarsenev.narod.ru/ionistor.htm>.
58. **Исследование** цифровых устройств защиты электродвигателей серии БМРЗ-Д на физической модели // <http://www.olgezaharov.narod.ru/BMRZ-D.pdf>.
59. **Коэффициент** чувствительности // Материал размещен в «Лексиконе релейщика» (см. <http://maximarsenev.narod.ru/links.html>) на странице: http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/k_ch.htm.
60. **Коды ANSI** для релейной защиты // <https://docs.google.com/leaf?id=0B7WejzPe4ruvOTY0MGExOGQtZmM2My00NjQ0LWE0NzEtZjcxNDU1NzM2ZDE3&sort=name&layout=list&num=50>.
61. **Онлайн-расчеты** уставок релейной защиты // <http://www.online-electric.ru/rza>.
62. **Резервирование** при отказе выключателя // <http://maximarsenev.narod.ru/SUROV.pdf>.
63. **Резервирование** при отказе выключателя // <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/surov2.htm>.
64. **Рекомендации** по выбору алгоритмов защит электродвигателей, предусмотренных в блоках БМРЗ и БМРЗ-100 // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/Zash.htm>.
65. **Уставки УРОВ** по времени // <http://maximarsenev.narod.ru/Razn/UROV.htm>.
66. **Устройства** защиты электродвигателей МРЗС-05Д // <http://www.rza.org.ua/urza/a-215.html>.
67. **Фазное** или линейное // http://miforelist.narod.ru/lin_faz.htm.
68. **Флегинский Н. М.** Расчет уставок релейной защиты линий 6-10 кВ с микропроцессорными защитами с зависимыми характеристиками // <http://www.rza.org.ua/article/a-92.html>.
69. **Флегинский Н. М.** Расчеты токов короткого замыкания с учетом изменения коэффициента трансформации трансформаторов // <http://www.rza.org.ua/article/a-96.html>.
70. **Чувствительность** (релейной защиты) // Материал размещен в «Лексиконе релейщика» (см. <http://maximarsenev.narod.ru/links.html>) на странице: <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/chuvst.htm>.
71. **Чередование** фаз // <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/Alternation.htm>.

72. **Чаронов В. Я., Борисов Л. Ф., Васинеж В. И., Рукавишников А.** Устройство для защиты синхронного двигателя от асинхронного режима. // Патент на изобретение // http://ntpo.com/patents_electronics/electronics_6/electronics_439.shtml.

Документация

73. **Блок** микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДА-01-02-12 / Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.015–001 РЭ. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2008.
74. **Блок** микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДС-00-01-11 / Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.023 РЭ. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2008.
75. **Микропроцессорные** устройства защиты электродвигателя «Сириус-Д», «Сириус-21-Д» / Руководство по эксплуатации. БПВА.656122.046 РЭ. Зеленоград: «Радиус-Автоматика», 2008.
76. **Реле** защиты двигателя РДЦ-01-054 / Руководство по эксплуатации ААПЦ.648239.026 РЭ.
78. Реле защиты двигателя РДЦ-06 / Руководство по эксплуатации ААПЦ.648239.013 РЭ. Киев: ПАО «Электротехнический завод», 2010.

Содержание

Часть 1 (Выпуск 12 (168))

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Цифровые устройства защиты электродвигателей	4
1.1. Сравнительные характеристики цифровых устройств	4
1.2. Испытание блоков БМРЗ на физической модели	22
ГЛАВА ВТОРАЯ. Алгоритм токовой отсечки	27
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Алгоритмы дифференциальных защит ДЗТ и ДТО	35
ПРИЛОЖЕНИЕ. Исходные данные для расчета уставок	69
Список литературы.	75

Часть 2 (Выпуск 1 (169))

Предисловие	3
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Алгоритмы защиты от замыканий на землю	4
ГЛАВА ПЯТАЯ. Алгоритмы защиты электродвигателей от перегрузки	20
ГЛАВА ШЕСТАЯ. Алгоритмы защиты синхронного двигателя от асинхронного режима	38
ГЛАВА СЕДЬМАЯ. Алгоритм «Функция опережающего отключения»	44
ГЛАВА ВОСЬМАЯ. Алгоритмы защиты от затянутого пуска, блокировки ротора и колебаний нагрузки	53
ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. Алгоритмы «Защита минимального напряжения», «Защита от несимметричного режима работы» и «Защита от обрыва фазы», «Защита от потери питания»	61
ПРИЛОЖЕНИЕ. Исходные данные для расчета уставок	69
Список литературы.	75

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

ЗАХАРОВ ОЛЕГ ГЕОРГИЕВИЧ

**Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей.
Алгоритмы и уставки
(Часть 2)**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23
Тел. (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

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

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

Корректор **Г. И. Эрли**

Сдано в набор 5.11.12. Подписано в печать 20.12.12.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 5,125. Заказ БЭТ/1(169)-2013.

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

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